

ELEMENTI DI SICUREZZA ELETTRICA

LE BASI LEGISLATIVE DELLA SICUREZZA

La prima fonte legislativa è la *Costituzione* dove si può leggere:

Art. 32: “La Repubblica tutela la salute come fondamentale diritto dell’individuo ed interesse della collettività ...”;

Art. 35: “La Repubblica tutela il lavoro in tutte le sue forme ed applicazioni ...”;

Art. 41: “L’iniziativa economica privata è libera. Non può svolgersi in contrasto con l’utilità sociale o in modo da arrecare danno alla sicurezza, alla libertà, alla dignità umana ...”.

Il *Codice civile* stabilisce:

Art. 2050: “Chiunque cagiona danni ad altri nello svolgimento di una attività pericolosa, per sua natura o per la natura dei mezzi adoperati, è tenuto al risarcimento se non prova di avere adottato tutte le misure idonee ad evitare il danno”;

Art. 2087: “L’imprenditore è tenuto ad adottare nell’esercizio dell’impresa le misure che secondo la particolarità del lavoro, l’esperienza e la tecnica, sono necessarie a tutelare l’integrità fisica e la personalità morale dei prestatori di lavoro”.

Il *Codice penale* sancisce:

Art. 437: “Chiunque omette di collocare impianti, apparecchi o segnali destinati a prevenire disastri o infortuni sul lavoro, ovvero li rimuove o danneggia, è punito con la reclusione da sei mesi a cinque anni; se dal fatto deriva un disastro o un infortunio la pena è la reclusione da tre a dieci anni”;

Art. 451: “Chiunque, per colpa, omette di collocare, ovvero rimuove o rende inservibili, apparecchi o altri mezzi destinati alla estinzione di un incendio o al salvataggio o al soccorso contro disastri o infortuni sul lavoro, è punito con la reclusione fino a un anno e con la multa da lire quarantamila a duecentomila”;

Nel settore elettrico è di fondamentale importanza la legge 1-3-1968 n.186: “Disposizioni concernenti la produzione di materiali, apparecchiature, macchinari, installazioni e impianti elettrici ed elettronici” che consta dei seguenti due articoli:

Art. 1: “Tutti i materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici devono essere realizzati e costruiti a regola d’arte.”

Art. 2: “I materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici realizzati secondo le Norme del CEI si considerano costruiti a regola d’arte.”

Si sottolinea infine che sono destinatari dell’obbligo della sicurezza, oltre all’imprenditore, tutti gli operatori di un processo produttivo, ciascuno in misura dipendente dalle capacità decisionali e di intervento che gli competono. Sono così responsabili della sicurezza, ciascuno per la propria parte: costruttori, venditori, noleggiatori di macchinari, di attrezzature e di impianti, progettisti, direttori dei lavori, collaudatori, ispettori, dirigenti, impiegati ed operai.

Condizione e modalità per il verificarsi di un infortunio elettrico possono essere estremamente variabili, in relazione ad una molteplicità di apparecchiature, di impianti e di condizioni di impiego. Anche se la legislazione ordinaria contiene esplicite disposizioni atte a favorire la sicurezza, la previsione del rischio e la formulazione di prescrizioni e misure atte a prevenire od a minimizzare il pericolo viene affidata ad appositi enti nazionali ed internazionali che provvedono ad emanare ed aggiornare periodicamente le Normative di Sicurezza. Nel caso dell’Italia tale attività viene svolta dal CEI. L’importanza delle Norme CEI è evidenziata già dalla legge 1-3-1968 n.186. La legge 18-10-1977 n.791 estende tale concetto anche al settore della sicurezza, come ribadito anche dalla legge 5-3-1990 n.46 (sostituita dal Decreto Ministeriale n. 37 del 22 gennaio 2008). L’adeguamento alle norme CEI costituisce dunque una condizione sufficiente, anche se non necessaria, al soddisfacimento delle condizioni sulla esecuzione a regola d’arte e secondo criteri di sicurezza.

EFFETTI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO

Il passaggio di una corrente elettrica nei tessuti umani (elettrocuzione) ha effetti fisiologici largamente variabili, dipendenti dal valore della corrente, dalla sua frequenza, dalla durata del contatto, dalla sensibilità individuale e dalla zona del corpo in cui il fenomeno ha luogo. La *soglia di sensibilità* può variare da alcune decine di μA , per la lingua, a poco più di una decina di mA. L'elettrocuzione risulta pericolosa a causa dei seguenti fenomeni fisiologici:

1. *Tetanizzazione*: a causa dello stimolo elettrico sulle singole cellule, si manifesta la contrazione di un intero fascio muscolare, con una sintomatologia non diversa da quella del tetano (da cui il nome). Particolarmente pericoloso un contatto in corrente alternata: i tessuti muscolari sono interessati da una serie di stimoli che si ripetono in maniera regolare determinando uno stato di contrazione permanente che impedisce all'fortunato di interrompere il contatto. La massima corrente che attraversi il corpo e consenta ancora di "lasciare la presa" viene definita *corrente di rilascio*.
2. *Blocco respiratorio*: per valori piuttosto elevati di corrente (che accentuano i sintomi di contrazione muscolare) e soprattutto se la zona interessata è quella toracica, comprendente i muscoli respiratori, si può subire un danno da paralisi respiratoria, causa di danni irreversibili al cervello se tale blocco supera i 2 ÷ 3 minuti.
3. *Fibrillazione ventricolare*: i disturbi legati a cause elettriche investono anche il muscolo cardiaco, regolato nel suo pulsare da stimoli elettrici. Se a questi si sovrappongono altri stimoli esterni, di intensità adeguatamente alta, si può pervenire ad una perdita completa di quel coordinamento che rende possibile l'attività cardiaca.
4. *Ustioni*: bastano densità di corrente di pochi mA/mm² per qualche secondo per provocare ustioni apprezzabili, soprattutto sulle zone dotate di maggiore resistività, come la pelle. Oltre i 40 ÷ 50 mA/mm² si ha una carbonizzazione dei tessuti interessati, che, aumentando notevolmente la resistenza locale, può avere un effetto paradossalmente protettivo nei confronti di ulteriori più gravi danni.

La resistenza del corpo umano, che generalmente compete alla pelle, si fissa al valore convenzionale di 2 k Ω e se si assume come non pericolosa una corrente non superiore a 25 ÷ 30 mA, risultano non pericolose le tensioni fino a circa 50 ÷ 60 V: è sulla base di queste considerazioni che le Norme pongono un limite al livello di tensione sopportabile senza che intervenga qualche forma di protezione.

Gli incidenti di tipo elettrico vengono classificati in due categorie:

1. Un *contatto diretto* si verifica quando una o più parti del corpo vengono in tensione con parti di impianto elettrico normalmente in tensione (conduttore nudo, viti di fissaggio, morsettiera);
2. si parla invece di *contatto indiretto* quando la folgorazione è provocata dal contatto con ampie parti metalliche normalmente non in tensione (*massa*), che potrebbero però andare in tensione per un difetto di isolamento.

PROTEZIONI DAL CONTATTO INDIRETTO

La misura di protezione più usuale contro i contatti indiretti è quella di collegare la massa dell'apparecchio a terra, tramite un apposito conduttore, che prende il nome di conduttore di protezione. I requisiti della protezione dipendono dal tipo di sistema elettrico di alimentazione, ma in ogni caso si deve garantire *l'interruzione automatica del circuito* in caso di pericolo per le persone.

Quindi, i dispositivi di interruzione automatica del circuito devono intervenire in un tempo tanto più breve quanto maggiore è la tensione sulle masse, secondo una curva limite tensione - tempo compatibile con la protezione del corpo umano (curva di sicurezza) illustrata in figura 1. Un apparecchio, destinato ad essere protetto mediante interruzione automatica del circuito, è dotato di isolamento principale e la massa è munita di un morsetto dove collegare il conduttore di protezione; esso viene denominato *apparecchio di classe I*.

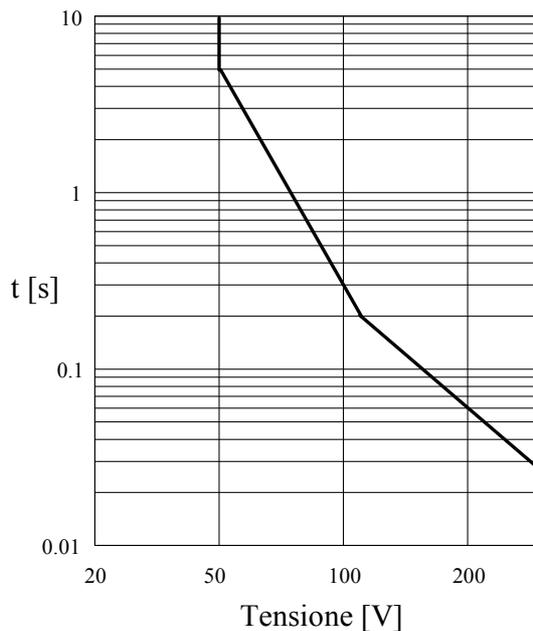


Figura 1.

IMPIANTO DI TERRA

Con il termine *terra* si indica la massa del terreno assunta convenzionalmente a potenziale nullo ovunque. Un *dispersore di terra* è un corpo metallico posto ad una certa profondità nel terreno, in buon contatto con questo e destinato a disperdere eventuali correnti. Il *conduttore di terra* provvede a realizzare il collegamento fra le parti da proteggere ed il dispersore di terra. Un *impianto di terra* è costituito dall'insieme dei dispersori e dei conduttori di terra.

Al fine di chiarire quanto definito sopra, si consideri un dispersore emisferico (vedi figura 2) di raggio R_0 che disperda in un terreno omogeneo, di conducibilità σ , una corrente I . A causa della caduta di tensione lungo il terreno, la tensione misurabile tra l'elettrodo ed i punti del terreno aumenta con la distanza r , in tutte le direzioni radiali. Per punti infinitamente lontani la tensione tra l'elettrodo ed il terreno è massima

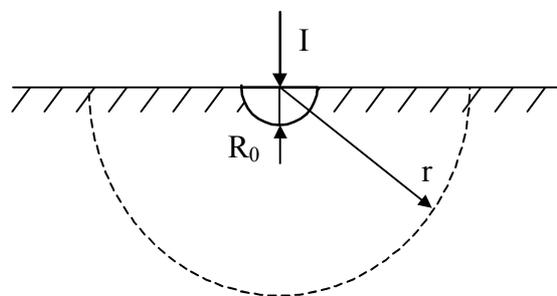


Fig. 2. – Dispersore di terra emisferico.

È possibile dimostrare che, nel caso considerato, la tensione è espressa da: $v(\mathbf{r}) = \frac{I}{2\pi\sigma} \frac{1}{\|\mathbf{r}\|}$

Si è posta a zero la tensione dei punti infinitamente lontani dal dispersore, come usuale. Questo punto convenzionale, in pratica abbastanza lontano da poterne trascurare il potenziale, costituisce una *terra di riferimento a potenziale zero*. Su tutti i punti della superficie del dispersore, ponendo $r = R_0$, il valore della tensione è:

$$V_t = \frac{I}{2\pi\sigma R_0}$$

V_t è detta *tensione totale di terra* e rappresenta la tensione tra l'elettrodo ed il punto a potenziale zero. La *resistenza totale di terra* si calcola quindi eseguendo il rapporto:

$$R_t = \frac{V_t}{I} = \frac{1}{2\pi\sigma R_0}$$

Il dispersore di terra risulta quindi rappresentabile con lo schema elettrico illustrato in figura 3, dove E indica l'elettrodo e TO il punto di terra a potenziale zero. Questo consente di conglobare nella resistenza R_t tutta l'opposizione incontrata dalla corrente I dispersa a terra.

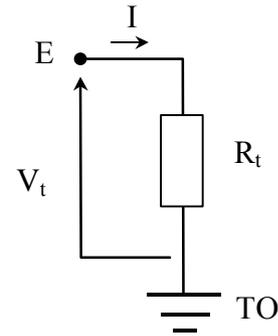


Fig. 3. – Schema elettrico equivalente del dispersore di terra.

In linea di principio, qualunque oggetto metallico che risulti posto in intimo contatto con il terreno può essere considerato un dispersore. Le Norme forniscono prescrizioni relative a qualità e dimensioni dei dispersori. Il materiale costitutivo deve essere tale da impedire un facile deterioramento dovuto all'umidità (la corrosione è responsabile di un aumento della resistenza di terra). I metalli comunemente impiegati sono il rame, l'acciaio rivestito di rame e i materiali ferrosi a pesante zincatura.

La resistenza di terra dipende dalla resistività del terreno entro il quale è immerso il dispersore e dalle sue dimensioni; Un metodo efficace per abbassare, anche di molto, la resistenza di terra consiste nel sostituire il terreno tutt'intorno al dispersore con grafite, torba, argilla o altro materiale a bassa resistività. L'operazione, compiuta durante la fase di installazione del dispersore, ha lo scopo di migliorare le condizioni di conducibilità nella zona immediatamente circostante il dispersore: è proprio questa zona, infatti, a fornire il maggior contributo nel calcolo della resistenza complessiva di terra. Un altro metodo consiste nel disporre una molteplicità di dispersori reciprocamente collegati, a costituire una efficace maglia di protezione il cui perimetro segue, con buona approssimazione, quello dell'edificio protetto.

Si consideri ora il caso (vedi figura 4.a) di una persona che tocca una massa collegata ad un dispersore di terra nel momento in cui si disperde una corrente I. Nell'ipotesi di trascurare tutti i parametri non resistivi, si può valutare la corrente che attraversa l'infortunato assumendo che sia: R_c la resistenza equivalente del corpo umano, R_{ct} una resistenza aggiuntiva tra corpo e terra (calze, scarpe, pavimento), R_n la resistenza equivalente del neutro verso terra, E la tensione di fase (220 V per il sistema di distribuzione in bassa tensione adottato in Europa).

Dal circuito equivalente (vedi figura 4.b) si ricava per la corrente di elettrocuzione I_c il valore (approssimato per eccesso):

$$I_c = E \frac{R_t}{R_n(R_t + R_c + R_{ct}) + R_t(R_c + R_{ct})}$$

Si conclude dunque che una resistenza di terra molto piccola offre un elevato grado di sicurezza, assorbendo la maggior aliquota della corrente di guasto. Inoltre, ad un basso valore della resistenza di terra è associata una corrente di guasto I_g tendenzialmente abbastanza elevata da provocare l'intervento di un interruttore automatico di massima corrente. Occorre aggiungere, però, che se la R_n tende a zero, la corrente I_c non dipende più da R_t vanificando così la messa a terra. L'efficacia della messa a terra dipende pertanto anche dalla presenza di una resistenza non nulla tra il neutro e la terra.

Una resistenza di terra relativamente alta vanifica la funzione protettiva dell'interruttore di massima corrente, che viene affidata ad un interruttore differenziale^(*), la cui sensibilità può essere scelta sulla base del valore della R_t effettivamente disponibile. La limitazione della tensione di contatto a 50 V imposta dalle Norme può essere espressa in funzione della corrente differenziale $I_{\Delta n}$ che determina l'intervento

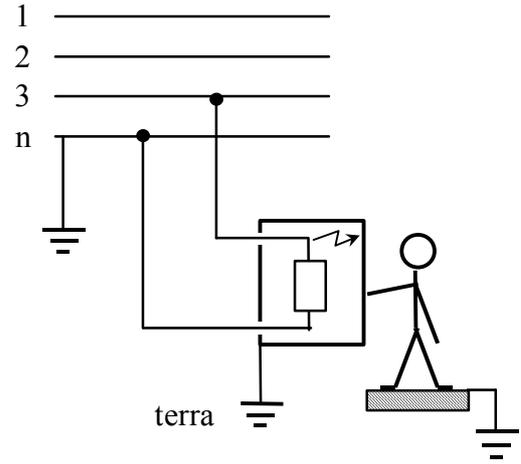


Fig. 4.a

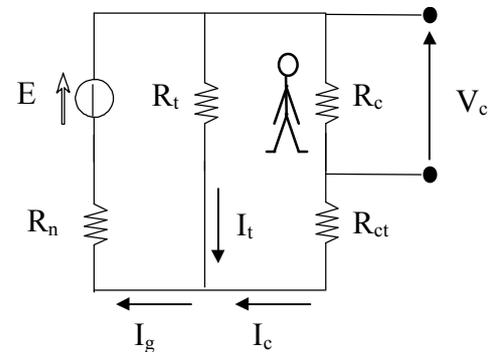
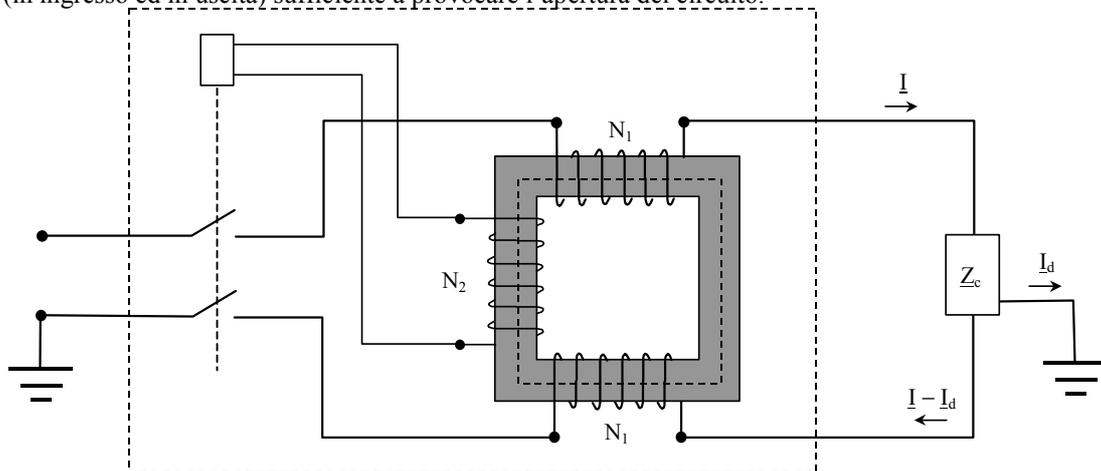


Fig. 4.b

(*) La linea tratteggiata di figura delimita i componenti che costituiscono lo schema di principio di un relè differenziale monofase. Intorno ad un nucleo magnetico toroidale vengono controavvolti due avvolgimenti di uguale numero di spire N_1 , percorsi dalla corrente fornita dall'alimentazione all'impedenza di carico Z_c . Se la corrente entrante è uguale a quella uscente, i flussi prodotti dai due avvolgimenti sono uguali e di segno opposto: il flusso netto nel nucleo è nullo. Se a causa di un guasto viene derivata verso terra una corrente I_d , la disuguaglianza fra la corrente entrante, I , e quella uscente, $I - I_d$, altera il precedente equilibrio fra i flussi di induzione: si manifesta un flusso netto che, concatenandosi con le N_2 spire di un terzo avvolgimento, vi determina una tensione e la circolazione di una corrente che, eccitando il relè, provoca l'apertura degli interruttori e il distacco dell'alimentazione. Questo dispositivo è caratterizzato dalla *sensibilità nominale*, definita come il valore minimo $I_{\Delta n}$ della differenza fra i valori efficaci delle correnti (in ingresso ed in uscita) sufficiente a provocare l'apertura del circuito.



dell'interruttore automatico: $R_t I_{\Delta n} < 50$.

Si deduce che una protezione differenziale è efficace anche per resistenza di terra relativamente elevata, come indica sinteticamente la tabella seguente, nella quale si è fatto riferimento ad alcuni dei valori più comuni di sensibilità $I_{\Delta n}$.

$I_{\Delta n}$ [A]	10	5	1	0.5	0.3	0.1	0.03	0.01
R_t [Ω]	5	10	50	100	167	500	1667	5000

L'efficienza del relè (interruttore) differenziale ad alta sensibilità come elemento di sicurezza personale giustifica il nome di *salvavita* con il quale viene comunemente indicato: i valori più comuni per $I_{\Delta n}$ sono di 10 e 30 mA, espressamente previsti da decreti e capitolati.

PROTEZIONI DAL CONTATTO DIRETTO

Le prescrizioni delle Norme sono di tipo essenzialmente passivo, intese soprattutto ad evitare che si verifichi il contatto diretto di persone con parti di impianto normalmente in tensione. A tale scopo occorre adottare misure di protezione totale nei luoghi accessibili a persone non consapevoli del rischio elettrico. Gli isolamenti impiegati devono soddisfare alle specifiche elettriche e meccaniche. In particolare, tutte le parti attive devono essere contenute entro involucri capaci di garantire una protezione totale in tutte le direzioni. Ove questo non sia possibile, occorre che siano rese inaccessibili con sbarramenti adeguati. Eventuali eccezioni riguardano apparecchi o parti di apparecchi che, per la loro specifica natura, non possono essere protetti nella maniera descritta (ad esempio la parte metallica di un portalampada). Le Norme ammettono l'apertura degli involucri isolanti, per ragioni di esercizio o di manutenzione, a patto che sia rispettata una delle seguenti condizioni:

- richieda l'uso di uno specifico attrezzo,
- richieda l'uso di una chiave, affidata, in un numero limitato di copie, a personale specializzato,
- determini la sconnessione automatica dalla rete delle parti in tensione (interblocco), con il ripristino dell'alimentazione reso possibile solo dopo la richiusura dell'involucro,
- l'apertura dell'involucro determini l'interposizione di una barriera intermedia supplementare, rimossa automaticamente solo dopo il ripristino delle condizioni di sicurezza precedenti.

Le misure di *protezione parziale* hanno lo scopo di prevenire solo i contatti accidentali e risultano del tutto inefficaci contro la maggior parte dei contatti intenzionali. Impiegate in locali accessibili solo al personale specializzato, consistono in ostacoli strategicamente disposti e nell'opportuno distanziamento delle parti in tensione e delle masse. Per gli ostacoli viene ammessa la possibilità di rimozione volontaria senza bisogno di speciali attrezzi. Il distanziamento è finalizzato a rendere impossibile l'accesso simultaneo a parti a tensione diversa. Il rispetto di questo obbligo si traduce nella definizione di un *volume di accessibilità* che ponga le parti in tensione fuori dalla "portata di mano" di operatori anche addestrati.

L'interruttore differenziale ad alta ($I_{\Delta n} = 30$ mA) o ad altissima sensibilità ($I_{\Delta n} = 10$ mA) costituisce l'unica forma di protezione attiva contro il contatto diretto. Tuttavia, il salvavita può risultare del tutto inefficace nel caso di contatto diretto bipolare. Nel caso il corpo umano sia isolato da terra, la protezione non interviene affatto, dal momento che non viene dispersa a terra nessuna corrente. Leggermente meno pericoloso il contatto bipolare se il corpo ha un contatto a terra: pur circolando nel corpo una corrente eventualmente letale, un'aliquota di corrente dispersa può provocare l'intervento dell'interruttore differenziale in un tempo sufficientemente breve.