

# Introduzione agli impianti elettrici, pericolosità della corrente, impianti di messa a terra

dott. ing. Lucia FROSINI



Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Università di Pavia  
E-mail: lucia@unipv.it

1

*L. Frosini*

## Norme CEI

Il CEI, Comitato Elettrotecnico Italiano, fondato nel 1909, è un'associazione di diritto privato, senza scopo di lucro, responsabile in ambito nazionale della normazione tecnica in campo elettrotecnico, elettronico e delle telecomunicazioni, con la partecipazione diretta nelle corrispondenti organizzazioni di normazione:

- europea: CENELEC, Comité Européen de Normalisation Electrotechnique;
- Internazionale: IEC, International Electrotechnical Commission.

Il CEI propone, elabora, pubblica e divulga Norme tecniche che costituiscono il riferimento per la presunzione di conformità alla “regola dell’arte” di prodotti, processi, sistemi e impianti elettrici.

La Legge n. 186/1968 stabilisce infatti che “Tutti i materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici devono essere realizzati e costruiti a regola d’arte” e che gli stessi “realizzati secondo le norme del Comitato Elettrotecnico Italiano si considerano costruiti a regola d’arte”.

2

## Tensioni nominali dei sistemi elettrici

Secondo la norma CEI 64-8, si definisce **tensione nominale** la “tensione per cui un impianto o una sua parte è progettato”.

Ricordiamo che, nel caso di corrente alternata, il valore che definisce la tensione nominale è quello efficace.

Inoltre, per i sistemi trifase, si considera la tensione concatenata.

Nel normale esercizio di un impianto, la tensione effettiva di funzionamento è generalmente diversa da quella nominale, principalmente a causa delle cadute di tensione e della variabilità dei carichi.

I limiti di tolleranza permessi dipendono dal valore della tensione nominale: nel caso di sistemi elettrici a bassa tensione, questi limiti sono precisati nella norma CEI 8-6 e sono pari a  $\pm 10\%$  in condizioni ordinarie di esercizio.

## Tensioni nominali dei sistemi elettrici

Si definisce **sistema elettrico** la “parte di un impianto elettrico costituito dal complesso dei componenti elettrici aventi una determinata tensione nominale”.

In relazione alla loro tensione nominale i sistemi elettrici si dividono in:

■ sistemi di **categoria 0**:

$V_n \leq 50$  V a corrente alternata,  $V_n \leq 120$  V a corrente continua;

■ sistemi di **I categoria**:

$50$  V  $< V_n \leq 1000$  V a corrente alternata,  $120$  V  $< V_n \leq 1500$  V a corrente continua;

■ sistemi di **II categoria**:

$1000$  V  $< V_n \leq 30000$  V a corrente alternata,  $1500$  V  $< V_n \leq 30000$  V a corrente continua;

■ sistemi di **III categoria**:  $V_n > 30000$  V.

## Tensioni nominali dei sistemi elettrici

Nella pratica i sistemi elettrici si dividono in:

- **bassa tensione:**  $V_n \leq 1000$  V a corrente alternata,  $V_n \leq 1500$  V a corrente continua;
- **media tensione:**  $1000$  V  $< V_n \leq 30000$  V a corrente alternata,  $1500$  V  $< V_n \leq 30000$  V a corrente continua;
- **alta tensione:**  $V_n > 30000$  V.

In Italia, il sistema di corrente alternata trifase in bassa tensione viene normalmente distribuito con 4 conduttori (3 conduttori di linea e un conduttore di neutro), i cui valori nominali di tensione sono:

- 230 V fra fase e neutro;
- 400 V fra le fasi.

## Tensioni nominali dei sistemi elettrici

Le funzioni delle varie parti dei sistemi elettrici possono essere così classificate:

- produzione di energia elettrica, solitamente in media tensione;
- trasformazione dell'energia elettrica: da media ad alta tensione, da alta a media, da media a bassa;
- trasmissione dell'energia elettrica, ossia trasporto di notevoli quantità di energia a grandi distanze e con elevati valori di tensione, mediante linee aeree e/o in cavo;
- distribuzione dell'energia elettrica.

## Pericolosità della corrente elettrica

Il contatto di una persona con parti in tensione può determinare il passaggio di una corrente attraverso il corpo umano, con conseguenze che vanno dal lieve fastidio a danni anche mortali.

Ciò accade perché il corpo umano è costituito per la maggior parte da acqua, piena di ioni in movimento: pertanto, anche in condizioni normali, il meccanismo di funzionamento biologico del corpo umano è governato da un'attività elettrica con tensioni dell'ordine delle decine di mV.

Una corrente elettrica proveniente dall'esterno, sommandosi alle piccole correnti fisiologiche interne, può alterare le funzioni vitali dell'organismo, causando danni che possono anche essere irreversibili o addirittura letali.

Naturalmente gli effetti variano da un individuo all'altro: per ogni soggetto esiste un valore minimo di corrente al di sotto del quale non viene percepito alcuno stimolo ("soglia di percezione").

## Pericolosità della corrente elettrica

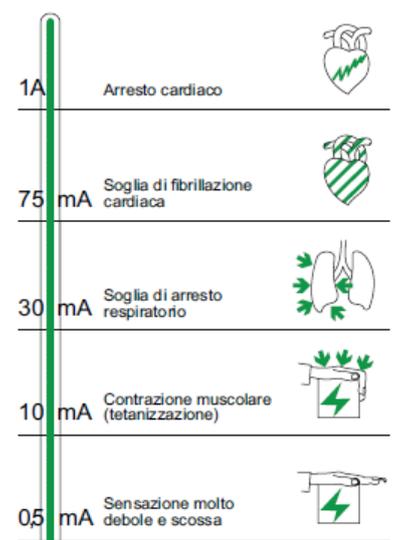
Inoltre, anche i diversi organi presentano una diversa soglia di percezione: la lingua può percepire qualche decina di  $\mu\text{A}$ , mentre la soglia di percezione dei polpastrelli è di 0,5 mA in corrente alternata (50 Hz) e 2 mA in corrente continua.

La corrente alternata a 50÷60 Hz è più pericolosa della corrente continua: in generale, infatti, il corpo umano è più sensibile alle variazioni di una grandezza che al suo valore costante (es. vibrazioni, sbalzi di temperatura, ecc.).

Oltre i 100 Hz però la pericolosità della corrente diminuisce.

I principali effetti deleteri prodotti da una corrente elettrica che attraversa il corpo umano sono i seguenti:

- 1) tetanizzazione;
- 2) arresto della respirazione;
- 3) fibrillazione ventricolare;
- 4) ustioni.



# 1) Tetanizzazione

I muscoli si muovono normalmente a seguito di uno stimolo elettrico trasmesso dal sistema nervoso.

Analogamente, una corrente elettrica di origine esterna può determinare il movimento dei muscoli: l'azione eccitomotora della corrente provoca la contrazione muscolare.

Al di sopra di una certa soglia di corrente ("limite di rilascio"), le contrazioni sono tali da impedire di rilasciare i muscoli contratti e di conseguenza è possibile rimanere "attaccati" alla parte in tensione (tetanizzazione).

Le soglie di tetanizzazione sono le seguenti:

- 10 ÷ 15 mA in corrente alternata a 50 ÷ 60 Hz;
- 100 ÷ 300 mA in corrente continua.

 Per rimanere a favore della sicurezza, si considera la soglia di 10 mA come limite della pericolosità della corrente alternata a frequenza industriale.

# 2) Arresto della respirazione

La corrente può produrre la paralisi della respirazione per uno dei seguenti motivi:

- per inibizione dei centri nervosi che la comandano,
- per tetanizzazione dei muscoli addetti alla respirazione,
- se il soggetto sviene, la lingua può ostruire le vie respiratorie: in questo caso, è sufficiente inclinare indietro la testa dell'infortunato e ristabilire la respirazione.

Il primo soccorso da prestare alla persona folgorata è la respirazione artificiale: il tempo per intervenire è di alcuni minuti, altrimenti il soggetto muore per asfissia.

Solitamente si considera una soglia di arresto respiratorio pari a 30 mA.

### 3) Fibrillazione ventricolare

Anche la contrazione del cuore è provocata normalmente da uno stimolo elettrico.

Una corrente elettrica esterna provoca un'alterazione nel funzionamento del cuore, fino a determinare la fibrillazione ventricolare: le fibrille del ventricolo si contraggono in modo scoordinato e il cuore non riesce più a spingere il sangue in periferia.

La fibrillazione ventricolare è un fenomeno irreversibile: non si ferma nemmeno se cessa il passaggio della corrente che l'ha innescato e prosegue fino alla morte dell'infortunato.

La fibrillazione ventricolare può essere arrestata mediante la scarica di un condensatore sul torace del paziente, ossia tramite un apparecchio defibrillatore: questa scarica impulsiva azzerava i segnali elettrici derivanti dall'esterno e permette la regolare ripresa del funzionamento cardiaco sotto l'azione degli stimoli elettrici naturali. Il tempo per intervenire è limitato a qualche minuto, dopodiché sopraggiungono danni irreversibili al tessuto celebrale, non più irrorato dal sangue.

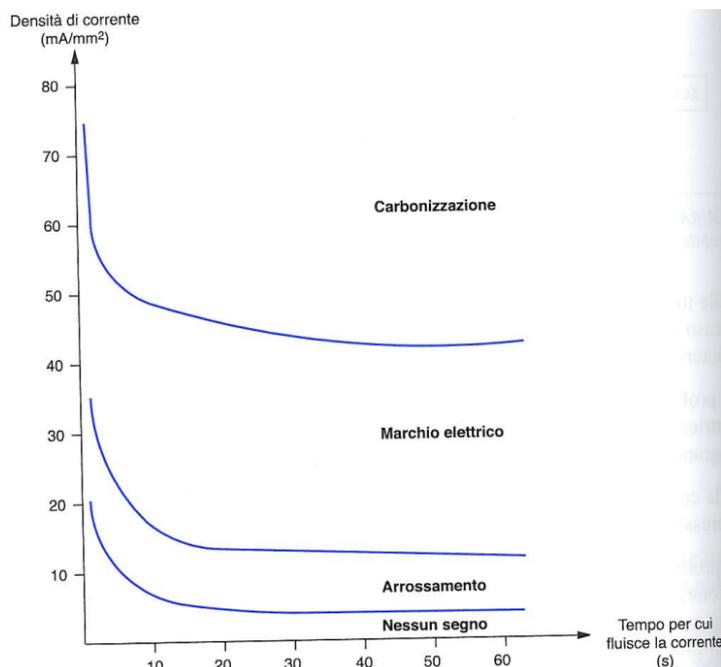
11

### 4) Ustioni

Il passaggio di corrente sviluppa calore per effetto Joule.

L'aumento di temperatura che produce l'ustione dipende dal quadrato della densità di corrente e dal tempo.

Il calore si sviluppa soprattutto sulla pelle perché presenta una resistenza maggiore: l'aumento di temperatura conseguente può determinare gravi ustioni (le ustioni sono profonde perché il calore si sviluppa all'interno dei tessuti).



12

## Limiti di pericolosità della corrente elettrica

La pericolosità di un valore di corrente aumenta con il tempo per cui fluisce attraverso la persona.

A seconda che la corrente sia alternata (in un range tra 15 e 100 Hz) o continua, si possono distinguere le seguenti tre zone sui grafici che hanno in ascissa la corrente e in ordinata il tempo:

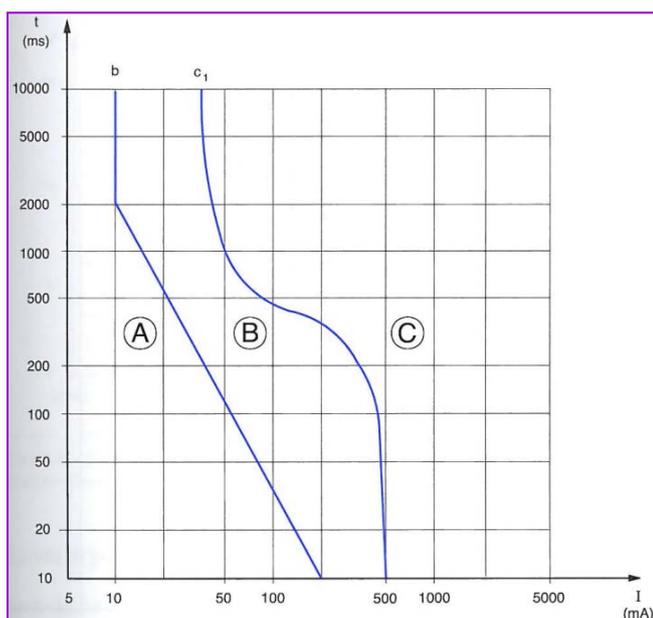
A) La corrente non determina effetti pericolosi: il limite di questa zona è la soglia di tetanizzazione);

B) Si hanno effetti fisiologici pericolosi, ma reversibili (contrazioni muscolari, difficoltà di respirazione); non si arriva alla fibrillazione ventricolare;

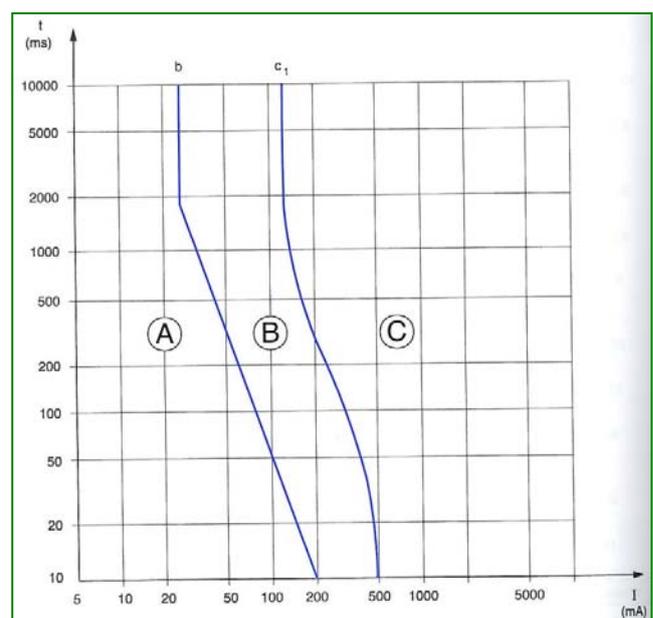
C) La corrente può innescare la fibrillazione ventricolare, l'arresto del cuore, ustioni gravi, con una probabilità crescente col tempo e con la corrente.

## Limiti di pericolosità della corrente elettrica

Effetti della corrente alternata (15 ÷ 100 Hz)



Effetti della corrente continua ascendente



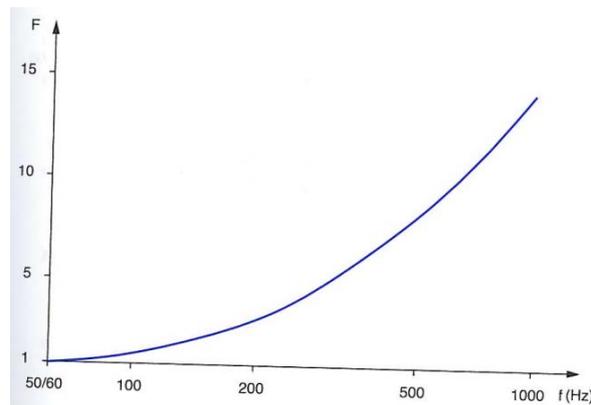
Si osserva che la corrente continua è più pericolosa nel caso “ascendente”, ossia diretta dai piedi verso la testa (polo positivo del generatore a terra), rispetto al caso “discendente”.

## Limiti di pericolosità della corrente elettrica

Le correnti alternate ad alta frequenza ( $> 100$  Hz) sono meno pericolose di quelle alternate a frequenza industriale.

Il motivo non è tanto dovuto all'effetto pelle della corrente ad alta frequenza, ma dal fatto che, all'aumentare della frequenza, diminuisce la durata della singola semionda, che costituisce lo stimolo elettrico elementare.

Le soglie di corrente indicate in precedenza vanno quindi moltiplicate per un opportuno coefficiente  $F$ , ottenuto in funzione della frequenza dal seguente grafico:



## Impedenza elettrica del corpo umano

Fino ad ora abbiamo considerato i limiti della pericolosità della corrente: ai fini pratici, interessa di più conoscere quale valore di tensione è in grado di far circolare attraverso il corpo umano un determinato valore di corrente.

Indicando con  $I_B$  la corrente che fluisce attraverso la persona e con  $Z_B$  l'impedenza del corpo tra i due punti di contatto, il prodotto:  $U_T = Z_B \cdot I_B$  è detto "tensione di contatto".

Risulta quindi importante definire, con buona approssimazione, il valore che assume l'impedenza del corpo umano tra i due punti di contatto, che si può ritenere composta da tre termini:

- Impedenza del punto di entrata e impedenza del punto di uscita, dovute al contatto elettrodo-pelle: hanno carattere ohmico-capacitivo, date le caratteristiche dielettriche dell'epidermide;
- Impedenza interna, di carattere ohmico, dipendente dal percorso della corrente.

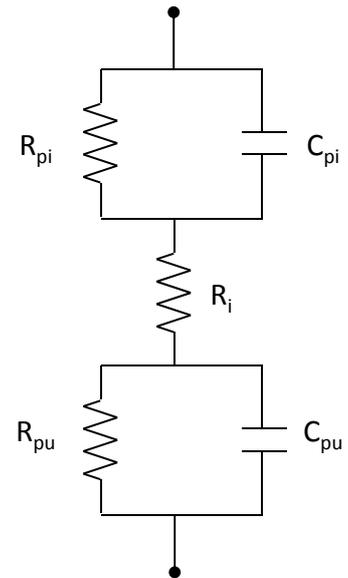
## Impedenza elettrica del corpo umano

I valori delle resistenze e delle capacità dei due punti di contatto sono in generale diversi, anche se in prima approssimazione possono essere ritenuti uguali.

Il carattere capacitivo dell'impedenza è evidente solo per frequenze superiori a 1000 Hz: a frequenza industriale, le capacità  $C_{pi}$  e  $C_{pu}$  possono essere considerate come circuiti aperti e l'impedenza  $Z_B$  si riduce a una resistenza  $R_B$ , pari alla somma della resistenza interna  $R_i$  e delle due resistenze di contatto  $R_p$ :

$$R_B = R_i + 2R_p$$

Sono parecchie le variabili che influenzano il valore della resistenza del corpo umano. Essa è inoltre un parametro personale e pertanto valutabile solo statisticamente.



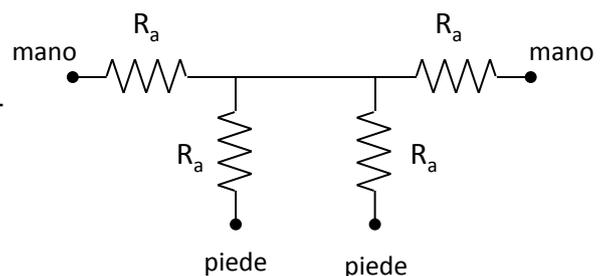
## Impedenza elettrica del corpo umano

I fattori da cui dipende l'impedenza del corpo umano sono:

■ Percorso della corrente: influenza la sola resistenza interna  $R_i$  e varia in funzione di sezione, lunghezza e resistività. Il tronco ha una resistenza trascurabile (sezione maggiore) rispetto a quella degli arti (braccia e gambe), i quali presentano una resistenza circa uguale tra loro. Se si indica con  $R_a$  la resistenza di uno degli arti, si può considerare il seguente schema elettrico equivalente approssimato della resistenza interna del corpo umano.

A seconda del tragitto della corrente:

- la resistenza maggiore è data dal tragitto mano-mano ( $2R_a$ ),
- la resistenza tra due mani e due piedi vale  $R_a$ ;
- la resistenza tra una mano e due piedi  $1,5R_a$ ;
- la resistenza tra una mano e il tronco  $R_a$ .



## Impedenza elettrica del corpo umano

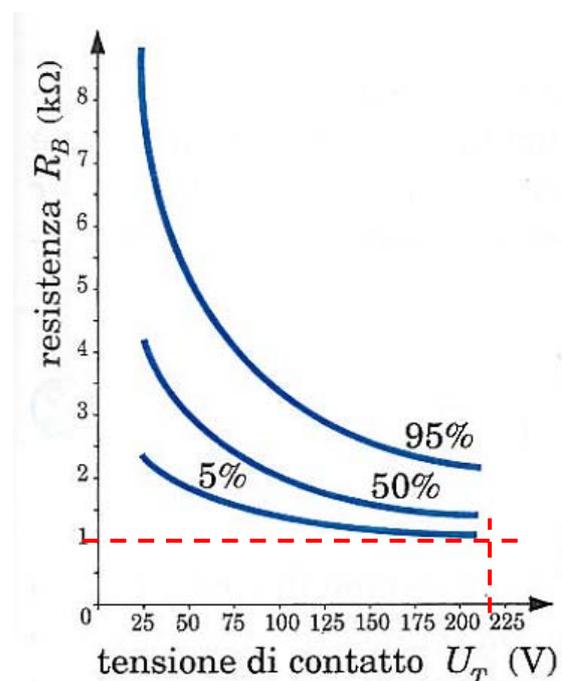
- Stato della pelle: influenza la resistenza di contatto  $R_p$ , che diminuisce per la presenza di umidità, sudore, tagli, abrasione. La presenza di un maggiore “strato isolante” (calli) fa aumentare la resistenza  $R_p$ .
- Superficie di contatto: al suo aumentare, diminuisce la resistenza  $R_p$ .
- Pressione di contatto: un’elevata pressione fa diminuire la resistenza  $R_p$ .
- Tensione di contatto: è stato verificato sperimentalmente che, all’aumentare della tensione applicata, la resistenza  $R_p$  diminuisce, fino a diventare trascurabile per tensioni superiori a circa 100 V. Oltre questo valore di tensione, la resistenza totale  $R_B$  tende asintoticamente alla resistenza interna  $R_i$ .

## Impedenza elettrica del corpo umano

Nel grafico sono riportati valori indicativi della resistenza del corpo umano misurati tra le due mani in condizioni di pelle asciutta e con elettrodi di superficie  $50 \div 100 \text{ cm}^2$ , in funzione della tensione di contatto.

Le tre diverse curve si riferiscono rispettivamente ai valori di resistenza non superati dal 5%, 50% e 95% della popolazione.

In condizioni di pelle bagnata con acqua, il valore di  $R_B$  si riduce del 25% rispetto ai valori indicati nel grafico. Nel caso di mani sudate (soluzione conduttiva), la riduzione di  $R_B$  arriva fino al 50%.



## Impedenza elettrica del corpo umano

La curva relativa al 5% della popolazione indica un valore di circa  $1000 \Omega$  per tensioni dell'ordine di 220 V: per questo motivo, il valore  $R_B = 1000 \Omega$  viene assunto come **resistenza convenzionale del corpo umano**, per la definizione delle procedure di prova delle tensioni di contatto.

Se il contatto avviene mediante l'interposizione dei strati isolanti (guanti, calzature, pedane, ecc.), alla resistenza  $R_B$  occorre aggiungere la resistenza di questi altri strati.

In questo modo, la resistenza complessiva può raggiungere valori molto alti, rendendo tollerabili tensioni dell'ordine delle migliaia di Volt.

Questo calcolo è complicato dal fatto che la tensione che si manifesta effettivamente sulla persona non è più la tensione di contatto a vuoto, ma la tensione di contatto effettiva, calcolata tramite il partitore di tensione.

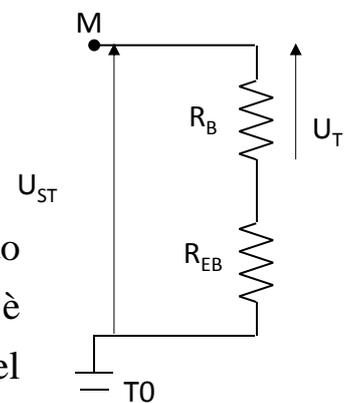
## Tensione di contatto effettiva

Facendo riferimento, per semplicità, a un contatto mano-piedi, nel seguente schema:

- $R_B$  è la resistenza del corpo umano;
- $R_{EB}$  è la resistenza verso terra della persona, equivalente a tutto il complesso di resistenze esistenti tra i piedi e il punto T0 a cui viene convenzionalmente associato il valore zero del potenziale.

$$U_T = U_{ST} \frac{R_B}{R_B + R_{EB}} = U_{ST} \frac{1}{1 + \frac{R_{EB}}{R_B}} < U_{ST}$$

La tensione di contatto effettiva  $U_T$  può assumere valori molto minori di quella a vuoto  $U_{ST}$  quando la resistenza verso terra è molto grande rispetto a quella del corpo umano, come accade nel caso di pavimenti molto isolanti. Al contrario,  $U_T$  può essere quasi uguale a  $U_{ST}$  quando  $R_{EB}$  è trascurabile rispetto a  $R_B$ , come nei locali da bagno, nelle piscine, ecc.

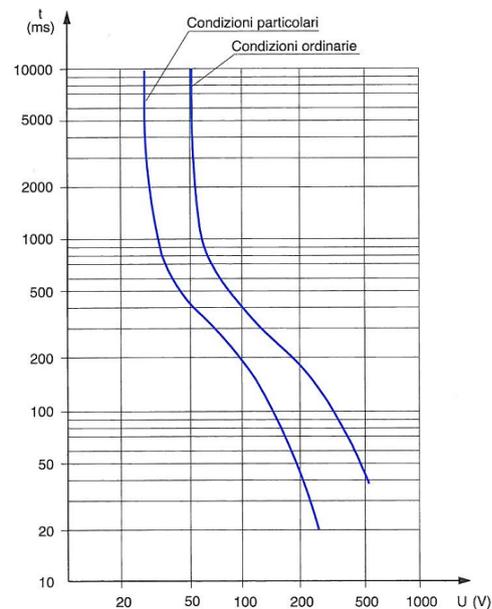


## Curve di sicurezza

Quindi, poiché la tensione di contatto effettiva dipende da fattori contingenti e difficilmente prevedibili, le norme per gli impianti utilizzatori in bassa tensione, in corrente alternata a 50 Hz o in corrente continua, fanno riferimento alla tensione di contatto a vuoto, tenendo conto che essa non è mai inferiore alla tensione effettiva che si ha nel caso di contatto.

In base ai valori di corrente considerati tollerabili e al valore medio della resistenza del corpo umano, si possono stabilire i valori di tensione da ritenere “sicuri”, in relazione al tempo per cui sono applicati al corpo umano.

Si ottiene così la **curva di sicurezza** che mette in relazione i valori della tensione di contatto a vuoto ammissibile con il tempo di permanenza del guasto.



## Curve di sicurezza

La curva di sicurezza in “condizioni particolari” è relativa a cantieri, locali ad uso medico, strutture ad uso agricolo e zootecnico, per i quali la pericolosità della corrente è ritenuta maggiore.

Naturalmente, all’aumentare della durata del contatto, diminuisce il valore della tensione ammissibile, tendendo a valori costanti.

La norma CEI 64-8 (valida per tensioni fino a 1 kV in c.a. e 1,5 kV in c.c.) definisce:

**Tensione di contatto limite convenzionale  $U_L$** : il massimo valore della tensione di contatto che è possibile mantenere per un tempo indefinito, in condizioni ambientali specificate.

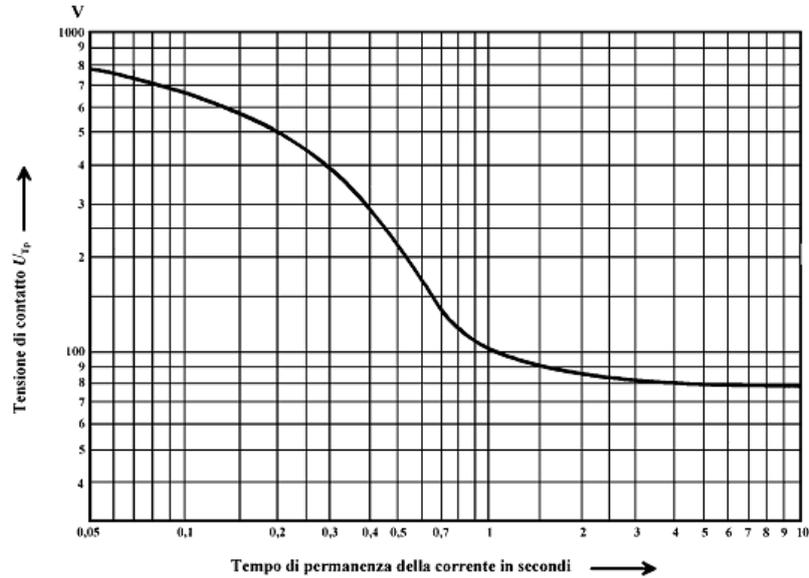
I valori di tale tensione si deducono dalle curve di sicurezza e valgono:

- in c.a.:  $U_L = 50 \text{ V}$  in condizioni ordinarie,  $U_L = 25 \text{ V}$  in condizioni particolari;
- in c.c.:  $U_L = 120 \text{ V}$  in condizioni ordinarie,  $U_L = 60 \text{ V}$  in condizioni particolari.

## Curve di sicurezza

Per impianti in corrente alternata con tensione  $> 1000$  V, la norma CEI 11-1 considera una curva diversa dalle precedenti (tensione di contatto ammissibile  $U_{TP}$ ).

Per guasti di durata maggiore di 10 s, si può far riferimento al valore  $U_{TP} = 75$  V.



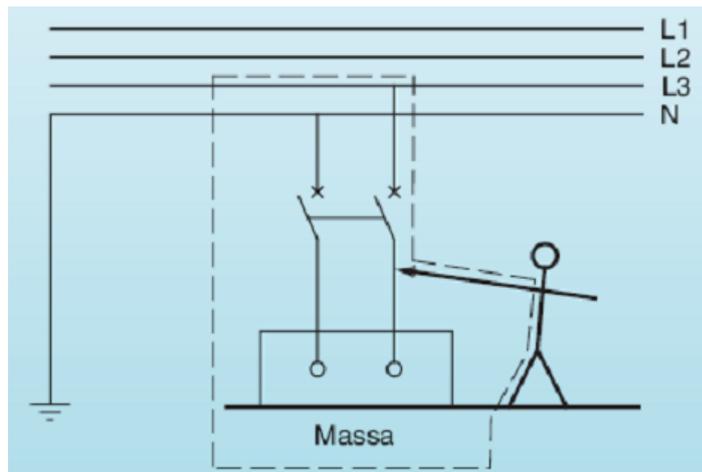
25

## Contatti diretti e indiretti

I contatti che una persona può avere con le parti in tensione sono divisi in:

- ✚ contatto diretto: contatto di persone con parti attive;
- ✚ contatto indiretto: contatto di persone con una massa in tensione per un guasto.

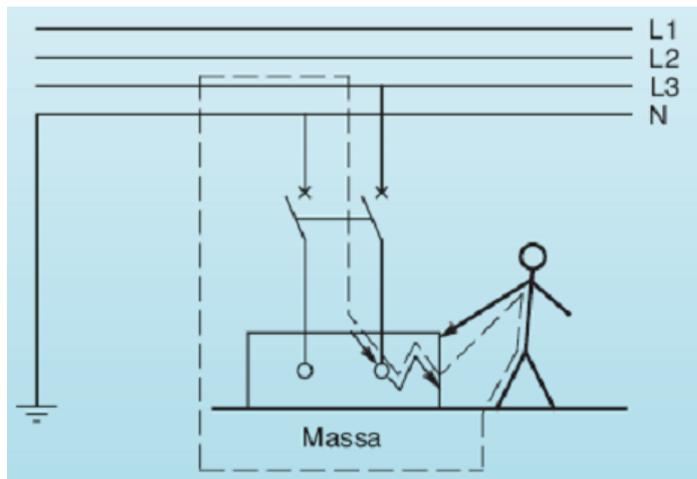
Si ha un contatto diretto quando una parte del corpo umano viene a contatto con una parte dell'impianto elettrico normalmente in tensione (conduttori, morsetti, ecc.).



26

## Contatti diretti e indiretti

Un contatto si dice invece indiretto quando una parte del corpo umano viene a contatto con una massa o con un'altra parte conduttrice, normalmente non in tensione, ma che accidentalmente si trova in tensione in seguito ad un guasto o all'usura dell'isolamento.



## Masse e masse estranee

Si definiscono **masse** tutte le parti conduttrici accessibili, facenti parte dell'impianto elettrico e degli apparecchi utilizzatori, separate dalle parti attive solo con l'isolamento principale. Il guasto si riferisce pertanto all'isolamento principale.

Esempi tipici di masse sono le carcasse dei motori.

Si definisce **massa estranea** una parte conduttrice, non facente parte dell'impianto elettrico, in grado di introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra.

Esempi di masse estranee sono: elementi metallici facenti parte di strutture di edifici; condutture metalliche di gas, acqua e per riscaldamento. Sono da considerare masse estranee (che possono introdurre il potenziale di terra) le parti metalliche non facenti parte dell'impianto elettrico (tubazioni, infissi, ecc.) che presentano verso terra un valore di resistenza inferiore a  $1000 \Omega$ , in tutti gli ambienti ai quali si applica la norma CEI 64-8.

# Isolamenti

L'**isolamento principale** è definito come l'**isolamento delle parti attive utilizzato per la protezione base contro i contatti diretti e indiretti**. L'isolamento principale non coincide necessariamente con l'isolamento utilizzato esclusivamente per scopi funzionali. L'isolamento funzionale è l'isolamento tra le parti attive e tra queste e la carcassa, di cui è dotato ogni apparecchio elettrico, senza il quale ne sarebbe impedito il funzionamento (ad es. l'isolamento tra avvolgimenti dei trasformatori).

L'**isolamento supplementare** è un isolamento indipendente, previsto in aggiunta all'isolamento principale, per assicurare la protezione contro i contatti elettrici in caso di guasto dell'isolamento principale. L'insieme dell'isolamento principale e dell'isolamento supplementare è denominato **doppio isolamento**.

Un sistema unico di isolamento, avente proprietà elettriche e meccaniche tali da fornire almeno lo stesso grado di protezione del doppio isolamento, prende il nome di **isolamento rinforzato**.

## Classificazione dei sistemi in relazione al collegamento a terra

Gli impianti utilizzatori in BT (sistemi elettrici di categoria I e 0) sono alimentati a partire dalle cabine di trasformazione MT/BT, che, essendo dotate di uno o più trasformatori aventi l'**avvolgimento secondario collegato a stella**, rendono disponibili le tre fasi e il **neutro**, corrispondente al **centro stella del sistema**: tale punto può essere **collegato a terra o isolato da terra**.

Per "terra" si intende un punto convenzionale a cui si attribuisce potenziale zero.

Ogni collegamento a terra ha una sua resistenza  $R_E$ , dovuta essenzialmente alla resistenza esercitata dal terreno alla conduzione della corrente di terra  $I_E$  e che introduce un potenziale di terra  $U_E = R_E \cdot I_E$ .

# Classificazione dei sistemi in relazione al collegamento a terra

Gli impianti utilizzatori possono avere (o non avere) le masse collegate a terra.

I sistemi elettrici di categoria I e 0 sono classificati, in relazione al collegamento a terra, mediante una sigla formata da due lettere che indicano rispettivamente lo stato del neutro (alimentazione) e delle masse (utilizzatore).

## Prima lettera (stato del neutro)

T = collegamento diretto a terra del neutro (con impedenza trascurabile);

I = isolamento del neutro da terra o collegamento del neutro mediante impedenza.

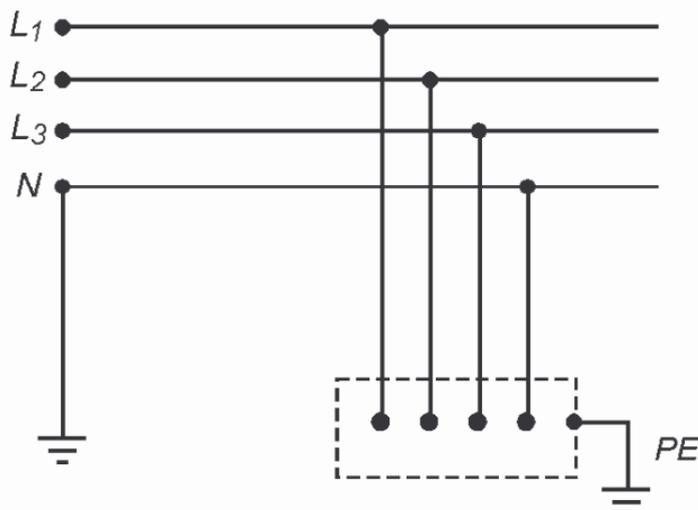
## Seconda lettera (stato delle masse):

T = collegamento diretto a terra delle masse;

N = collegamento delle masse al punto del sistema connesso a terra (generalmente il neutro).

## Sistema TT

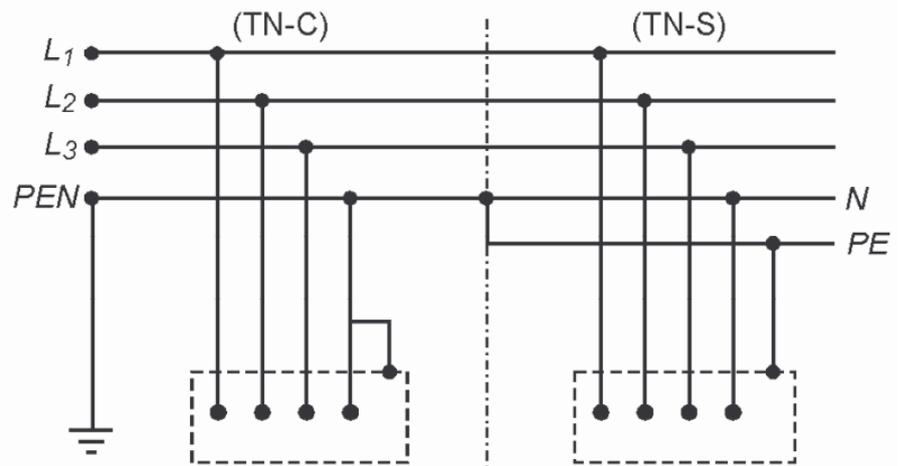
In Italia il sistema utilizzato per gli impianti alimentati direttamente da una rete di distribuzione pubblica a bassa tensione è il sistema TT: il sistema di alimentazione (secondario del trasformatore MT/BT) ha un punto (neutro) collegato direttamente a terra e le masse dell'impianto sono collegate a un impianto di terra elettricamente indipendente da quello del collegamento a terra del sistema di alimentazione tramite il conduttore di protezione (PE) giallo-verde.



## Sistema TN

Il sistema TN ha un punto (neutro) del sistema di alimentazione collegato direttamente a terra, mentre le masse dell'impianto sono collegate a quel punto per mezzo del conduttore di protezione. Si distinguono 3 tipi di sistemi TN:

- TN-S: conduttore di neutro e di protezione sono separati.
- TN-C: neutro e protezione sono combinati in un solo conduttore (PEN);
- TN-C-S: neutro e protezione sono combinati in un solo conduttore in una parte del sistema.

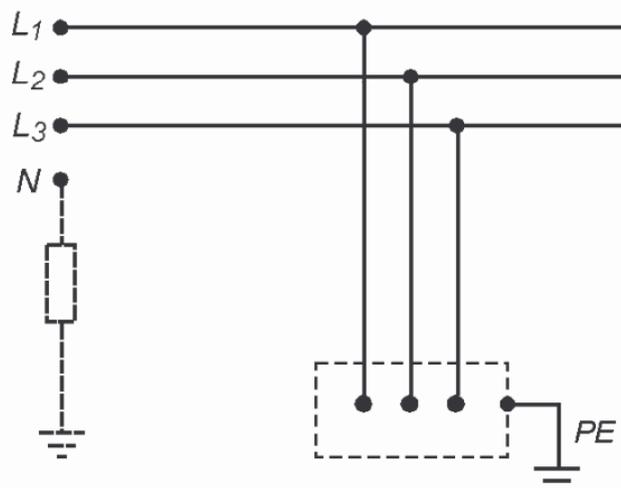


33

## Sistema IT

Il sistema IT ha tutte le parti attive isolate da terra o un punto collegato a terra attraverso un'impedenza, mentre le masse dell'impianto sono:

- collegate a terra separatamente oppure
- collegate a terra collettivamente oppure
- connesse collettivamente alla terra del sistema.



34

## Protezione contro i contatti diretti e indiretti

### Protezione contro i contatti diretti:

Le persone devono essere protette contro i pericoli che possono derivare dal contatto con parti attive dell'impianto.

Questa protezione può essere ottenuta:

- Impedendo che la corrente passi attraverso il corpo;
- Limitando la corrente che può attraversare il corpo ad un valore inferiore a quello patofisiologicamente pericoloso.

## Protezione contro i contatti diretti e indiretti

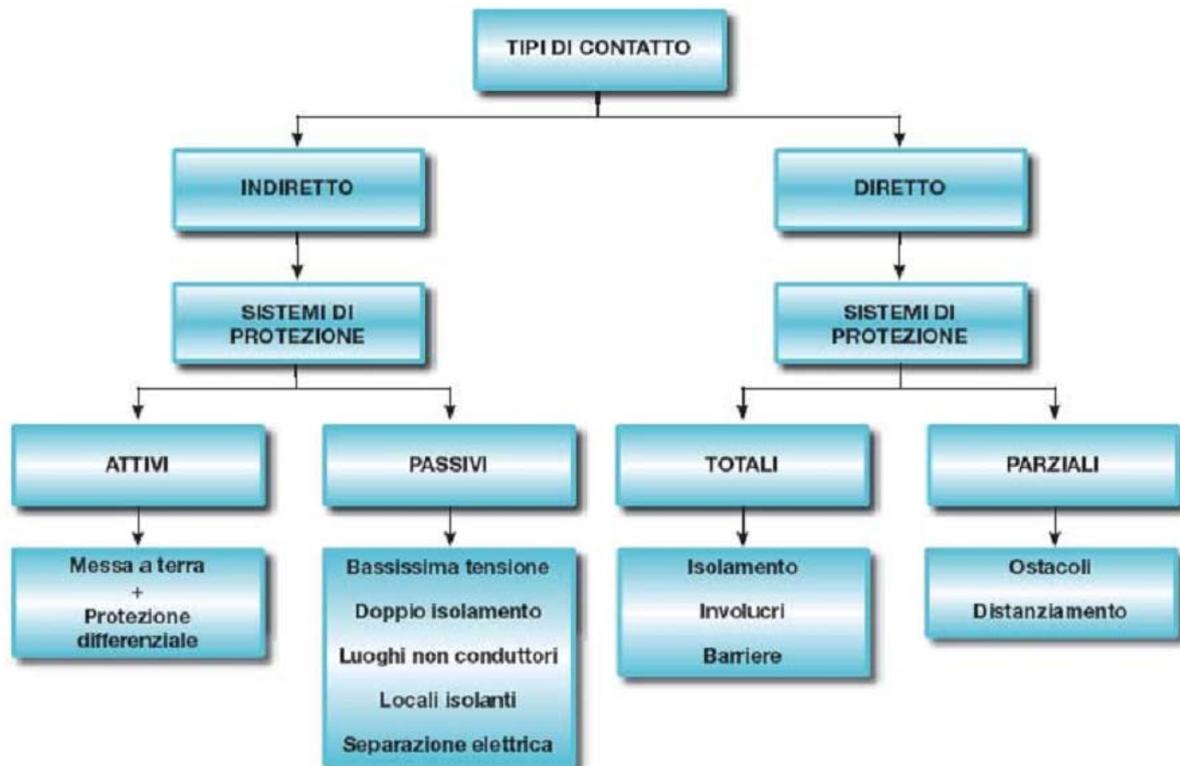
### Protezione contro i contatti indiretti:

Le persone devono essere protette contro i pericoli che possono derivare dal contatto con masse in caso di guasto che provochi la mancanza dell'isolamento.

Questa protezione può essere ottenuta:

- Impedendo che la corrente passi attraverso il corpo;
- Limitando la corrente che può attraversare il corpo ad un valore inferiore a quello patofisiologicamente pericoloso.
- Interrompendo automaticamente il circuito in un tempo determinato al verificarsi di un guasto suscettibile di provocare, attraverso il corpo in contatto con le masse, una corrente almeno uguale a quella pericolosa per il corpo umano.

## Contatti diretti e indiretti



37

## L'impianto di terra

In un impianto elettrico, il collegamento a terra delle masse è una misura di protezione dai contatti indiretti: è detta anche protezione con interruzione automatica del circuito, in quanto viene coordinata con interruttori automatici di massima corrente o differenziali, che aprono il circuito quando si crea una situazione di pericolo.

Gli impianti di **terra** provvisti di tale funzione sono detti **di protezione**, per distinguerli da:

🌿 **Messa a terra di funzionamento**: collegamento a terra di determinati punti di circuiti elettrici per esigenze di esercizio, come la messa a terra del neutro nei sistemi TT.

🌿 **Messa a terra per lavori**: collegamento a terra temporaneo di una sezione di impianto per esigenze di manutenzione o ispezione, come la messa a terra di un tratto di linea elettrica per lavori.

Spesso un impianto di terra ha la duplice funzione, di protezione e di funzionamento.

38

## L'impianto di terra

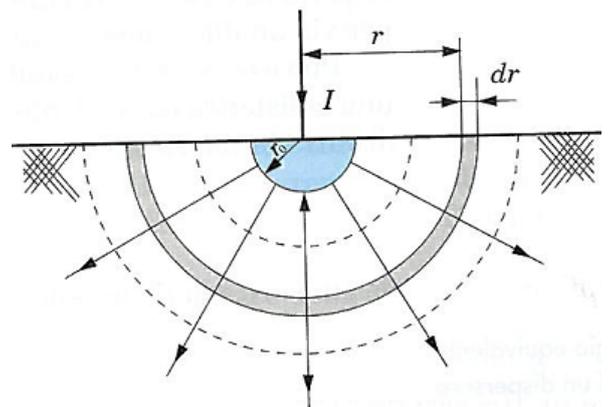
Vediamo di capire cosa si intende per “impianto di messa a terra”.

Si parte dall'idea di voler disperdere nel terreno una corrente elettrica  $I$ : anche il terreno, come tutti i materiali, ha una sua resistività, che, per semplicità, si ipotizza costante e pari a  $\rho_E$ .

Come primo caso ideale, si considera che la corrente venga dispersa a terra attraverso un elettrodo emisferico di raggio  $r_0$ .

Nell'ipotesi di terreno omogeneo, la corrente si distribuirà in modo uniforme in tutte le direzioni radiali uscenti dal centro dell'elettrodo. Ogni strato emisferico di spessore  $dr$  e raggio  $r$  avrà una resistenza:

$$dR_E = \frac{\rho_E dr}{2\pi r^2}$$



39

## L'impianto di terra

È chiaro che, all'aumentare di  $r$ , ossia all'aumentare della distanza dall'elettrodo, i contributi dei vari strati emisferici alla resistenza totale offerta dal terreno diminuiscono col quadrato di  $r$ .

La resistenza totale offerta dal terreno, calcolata a partire dalla superficie esterna dell'elettrodo fino a distanza infinita, è definita dall'integrale:

$$R_E = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho_E dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho_E}{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho_E}{2\pi} \left[ -\frac{1}{r} \right]_{r_0}^{\infty} = \frac{\rho_E}{2\pi} \left[ -\frac{1}{\infty} + \frac{1}{r_0} \right] \Rightarrow R_E = \frac{\rho_E}{2\pi r_0}$$

Quindi la **resistenza totale di terra** è direttamente proporzionale alla resistività del terreno e inversamente alle dimensioni dell'elettrodo utilizzato per la dispersione della corrente.

40

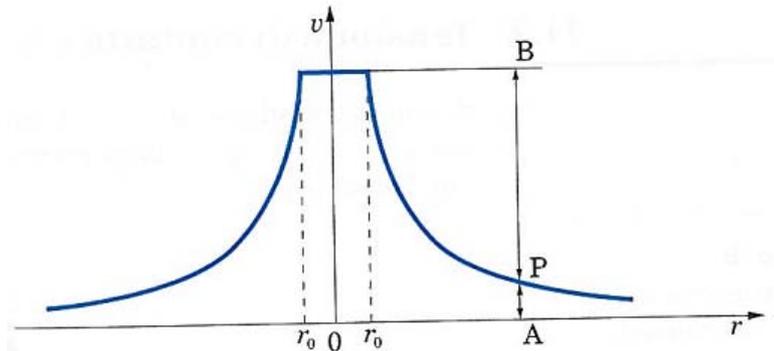
## L'impianto di terra

Considerato che la resistenza  $dR_E$  degli strati emisferici di terreno tende a zero al tendere ad infinito della distanza  $r$ , è possibile dimostrare che **a distanza infinita dall'elettrodo la tensione del terreno sarà nulla**, mentre **su tutti i punti della superficie dell'elettrodo** si ha la **tensione totale di terra** (differenza di potenziale tra l'elettrodo e un punto a potenziale zero):

$$U_E = \frac{\rho_E I}{2\pi r_0} = R_E I$$

In generale, la tensione del terreno diminuirà, a partire dalla superficie esterna dell'elettrodo, come una funzione iperbolica:

$$v = \frac{\rho_E I}{2\pi r}$$



41

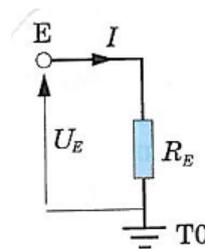
## L'impianto di terra

Si assume quindi pari a zero la tensione dei punti appartenenti alla circonferenza infinitamente lontana dall'elettrodo.

Nella pratica, **un punto convenzionale abbastanza lontano dall'elettrodo** si definisce **terra di riferimento a potenziale zero**.

È possibile rappresentare schematicamente queste definizioni con un semplice schema elettrico in cui:

- E è l'elettrodo,
- T0 è il punto di terra a potenziale zero,
- $R_E$  è la resistenza totale di terra.



In pratica, in  $R_E$  è inglobata tutta l'opposizione incontrata dalla corrente  $I$  dispersa nel terreno.

42

## L'impianto di terra

Nella pratica:

- la resistività del terreno non è costante e dipende da:
  - tipo di terreno (maggiore  $\rho_E$  per terreni rocciosi e granitici, minore  $\rho_E$  per soluzioni saline e acqua di mare;
  - contenuto di umidità (al suo aumentare, diminuisce  $\rho_E$ );
  - temperatura del terreno (sotto  $0^\circ\text{C}$ , per effetto del congelamento,  $\rho_E$  aumenta).
- la forma dei dispersori è diversa da quella emisferica:
  - per i dispersori a picchetto la resistenza  $R_E$  si riduce (meno che proporzionalmente) all'aumentare della loro lunghezza  $L$ ; elevate profondità sono giustificate solo dalla necessità di raggiungere strati di terreno a bassa resistività;
  - per una rete magliata la resistenza  $R_E$  diminuisce all'aumentare dell'area della rete e della lunghezza totale dei conduttori che la costituiscono.

## L'impianto di terra

Collegando  $N$  dispersori, ciascuno di resistenza  $R_E$ , in parallelo, si ottiene una resistenza totale pari a  $R_E/N$ , se è trascurabile la reciproca influenza dei vari dispersori (ossia, se si trovano opportunamente distanti tra loro).

In pratica, l'interdistanza ottimale tra i picchetti è circa 6-8 volte la loro lunghezza, ma si ottengono buoni risultati anche con distanze di 4-5 volte la lunghezza.

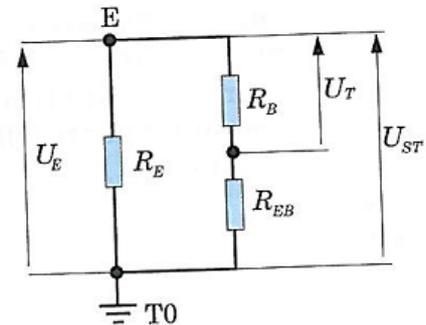
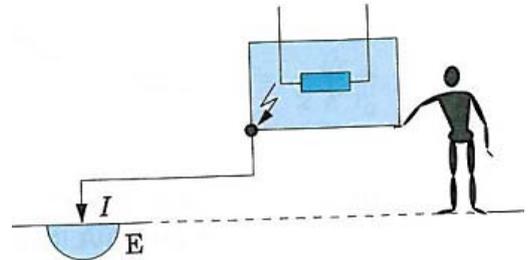
Dovendo essere una misura di protezione dai contatti indiretti, si intuisce che la resistenza di terra debba essere sufficientemente piccola, in modo da limitare le possibili tensioni di contatto.

## Tensioni di contatto

Riprendiamo il discorso della tensione di contatto e tensione di contatto a vuoto, questa volta considerando una persona che tocca una massa collegata a un dispersore di terra nel momento in cui, per un guasto, si disperde una corrente  $I$ .

Ritenendo trascurabile la resistenza del collegamento all'elettrodo e supponendo inizialmente che la persona occupi un punto del terreno sufficientemente lontano da E da poterlo ritenere a potenziale zero, la situazione si può rappresentare con il seguente circuito equivalente.

$R_{EB}$  è la resistenza verso terra della persona, concettualmente analoga alla  $R_E$ , considerando i piedi come dispersori in parallelo.



## Tensioni di contatto

Analogamente al calcolo precedente, la tensione di contatto risulta dal partitore di tensione:

$$U_T = U_E \frac{R_B}{R_B + R_{EB}} = U_E \frac{1}{1 + \frac{R_{EB}}{R_B}} < U_E$$

Quando  $R_{EB}$  è trascurabile, la tensione di contatto  $U_T$  assume il massimo valore, pari alla tensione di terra  $U_E$ .

Al contrario, in presenza di pavimenti molto isolanti, la tensione di contatto  $U_T$  si riduce, a parità di tensione di terra  $U_E$ .

La tensione di contatto a vuoto  $U_{ST}$  è data dalla differenza di potenziale che si ha tra la massa dell'apparecchio soggetto al guasto e il punto del terreno occupato dalla persona, quando non c'è contatto tra la persona e la massa:

$$U_{ST} = R_E I = U_E$$

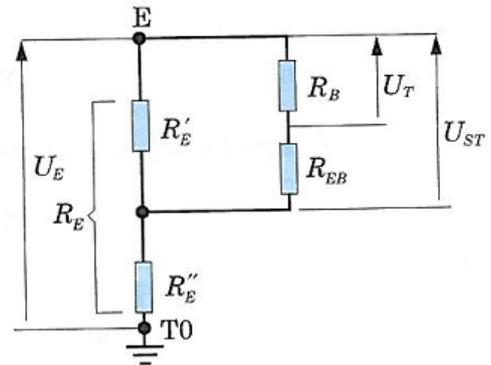
## Tensioni di contatto

Nel caso in cui la persona si trovi più vicina al dispersore, esisterà una differenza di potenziale tra l'estremo della resistenza  $R_{EB}$  e il punto T0:

$$U_T = U_{ST} \frac{R_B}{R_B + R_{EB}} = U_{ST} \frac{1}{1 + \frac{R_{EB}}{R_B}} \quad \text{con:} \quad U_{ST} < U_E$$

Poiché è difficile determinare  $U_{ST}$  (dipende da  $R'_E$  e  $R''_E$ ), per semplicità si pone  $U_{ST} \cong U_E$ .

Quindi, limitando  $U_E$  a valori non pericolosi, si aumenta la sicurezza, essendo  $U_{ST}$  ancor più piccola.



## Tensioni di contatto

■ La tensione di contatto  $U_T$  a cui è soggetta una persona che tocca un apparecchio, in cui vi è un guasto dell'isolamento e che disperde a terra una corrente, è minore, al limite uguale, a quella di contatto a vuoto  $U_{ST}$  esistente tra la massa e la terra in assenza di contatto.

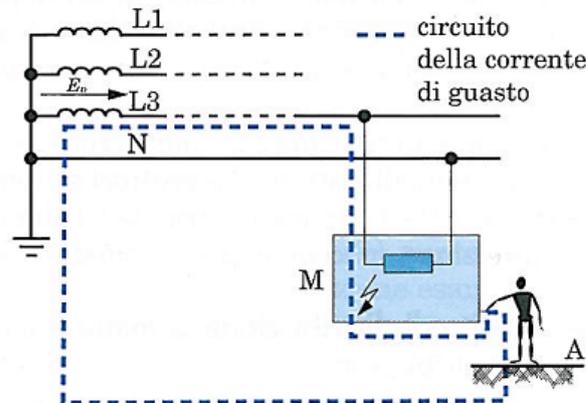
■ La tensione di contatto a vuoto  $U_{ST}$  è minore, al limite uguale, alla tensione totale di terra  $U_E$ .

■ La tensione di contatto è variabile a seconda delle circostanze, mentre quella di contatto a vuoto può essere considerata pari alla tensione di terra, con un'approssimazione favorevole alla sicurezza, in quanto si considera un valore maggiore.

➡ Per gli impianti utilizzatori in BT, si è stabilito di limitare i valori della tensione di contatto a vuoto, in base alle curve di sicurezza già introdotte.

## Esempio di guasto senza messa a terra

Per capire come interviene la protezione costituita da collegamento a terra delle masse, consideriamo il caso di cedimento dell'isolamento principale di una apparecchiatura senza messa a terra, alimentata da un sistema trifase di categoria I con neutro a terra.

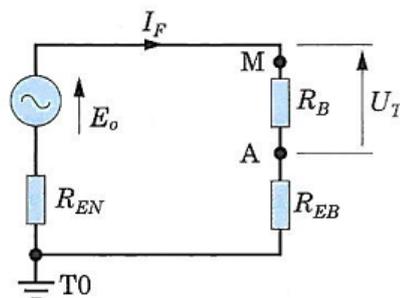


Per ricavare lo schema elettrico equivalente, si può trascurare l'impedenza delle linee elettriche di collegamento, perché molto piccola rispetto agli altri parametri del sistema, e ritenere nulla l'impedenza del guasto.

49

## Esempio di guasto senza messa a terra

La persona, di resistenza  $R_B$ , si trova così in serie con la sua resistenza verso terra  $R_{EB}$  e con la resistenza di messa a terra del neutro  $R_{EN}$ .



Il circuito è alimentato dalla tensione di fase a vuoto  $E_0$  del trasformatore di cabina.

La corrente di guasto che si richiude attraverso il terreno e interessa anche la persona è data da:

$$I_F = \frac{E_0}{R_B + R_{EB} + R_{EN}}$$

50

## Esempio di guasto senza messa a terra

Il valore di  $R_{EN}$  è piuttosto piccolo, a volte  $< 1 \Omega$  e quindi trascurabile.

Il valore di  $R_{EB}$  **varia a seconda del tipo di contatto** (presenza di pavimento, tipo di calzature, tipo di terreno).

Sappiamo che **la situazione non è pericolosa se  $I_F \leq 10 \text{ mA}$** .

Quindi, ponendo  $E_0 = 230 \text{ V}$ , si deve avere:

$$I_F = \frac{230}{R_B + R_{EB} + R_{EN}} \leq 10^{-2} \text{ A} \Rightarrow R_B + R_{EB} + R_{EN} \geq 23 \text{ k}\Omega$$

Questa condizione è difficilmente verificata e pertanto nella persona fluirà quasi certamente una corrente maggiore del limite di pericolosità convenzionale.

In condizioni molto sfavorevoli si può ritenere:

$$R_B + R_{EB} + R_{EN} \cong R_B \cong 1 \text{ k}\Omega \quad \longrightarrow \quad I_F = \frac{230}{1000} = 230 \text{ mA}$$

## Esempio di guasto senza messa a terra

Questo valore di corrente è in grado di produrre fibrillazione ventricolare, ma non è sufficiente per determinare l'apertura del dispositivo di massima corrente (che spiegheremo più avanti) che è normalmente inserito nel circuito.

Applicando il partitore di tensione, si ricava la tensione di contatto agente sulla persona:

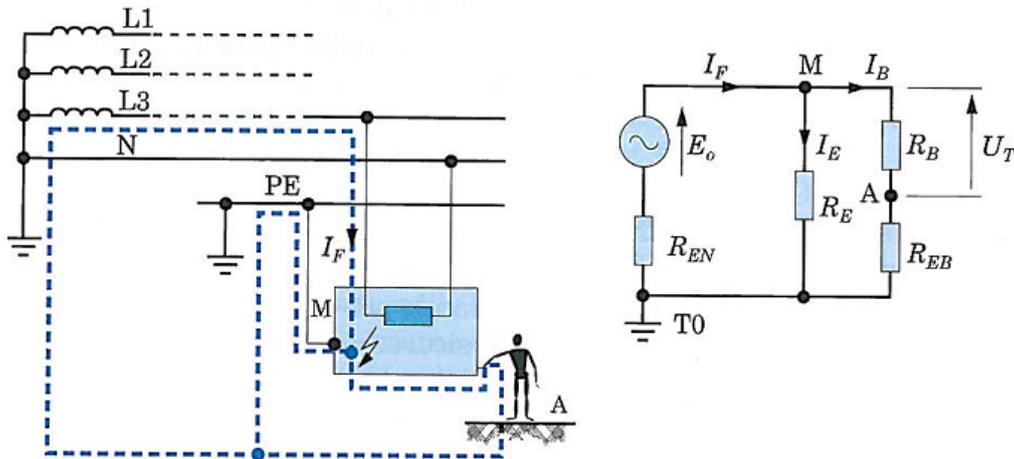
$$U_T = E_0 \frac{R_B}{R_B + R_{EB} + R_{EN}} \quad \text{Tensione di contatto SENZA messa a terra}$$

Questo valore di tensione è tanto più prossimo a  $E_0 = 230 \text{ V}$ , quanto più il rapporto tra  $R_B$  e la somma delle resistenze si avvicina all'unità.

La tensione di contatto a vuoto è pari a  $E_0 = 230 \text{ V}$ : è nettamente superiore al valore della tensione di contatto limite convenzionale ( $50 \text{ V}$ ) ed è comunque sopportabile per non più di  $200 \text{ ms}$ ; per cui, non intervenendo in tempo utile (o non intervenendo affatto) la protezione di massima corrente, la situazione risulta di estrema pericolosità.

## Esempio di guasto con messa a terra

Quando invece lo stesso guasto si verifica in un impianto dotato di messa a terra, lo schema elettrico equivalente è il seguente, in cui tra la massa M e il punto T0 a potenziale zero vi è la **resistenza  $R_E$  dell'impianto di terra dell'utente**.



53

## Esempio di guasto con messa a terra

La corrente di guasto  $I_F$  si ripartisce tra la resistenza  $R_E$  e la serie  $R_B + R_{EB}$ .

Applicando il partitore di corrente si ha:

$$I_B = I_F \frac{R_E}{R_E + R_B + R_{EB}}$$

La messa a terra è efficace quando il valore della resistenza  $R_E$  è alquanto minore della serie  $R_B + R_{EB}$ , in modo da rendere sufficientemente piccolo il rapporto tra la resistenza  $R_E$  e la somma delle resistenze e avere una corrente  $I_B$  di valore inferiore al limite di sicurezza.

La protezione dai contatti indiretti mediante l'impianto di terra si realizza proprio perché si pone in parallelo alla persona una resistenza di piccolo valore  $R_E$ , attraverso la quale scorrerà la maggior parte della corrente.

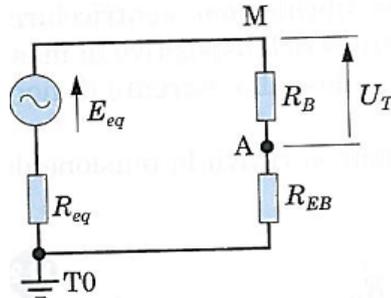
54

## Esempio di guasto con messa a terra

Per determinare la tensione di contatto  $U_T$  si può sostituire alla parte di circuito di sinistra del ramo  $R_B + R_{EB}$  il generatore equivalente di Thevenin:

$$E_{eq} = E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} < E_0$$

$$R_{eq} = \frac{R_E \cdot R_{EN}}{R_E + R_{EN}}$$



Il valore di  $R_{eq}$  è minore del più piccolo tra i valori di  $R_E$  e  $R_{EN}$  e quindi senz'altro trascurabile rispetto alla serie  $R_B + R_{EB}$ .

## Esempio di guasto con messa a terra

La tensione  $U_T$  diventa:

$$U_T = E_{eq} \frac{R_B}{R_B + R_{EB} + R_{eq}} \cong E_{eq} \frac{R_B}{R_B + R_{EB}}$$

**Tensione di contatto CON  
messa a terra**

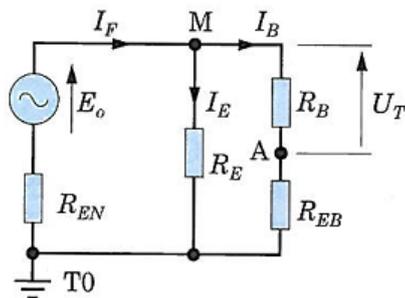
Confrontando questa espressione della tensione di contatto con quella trovata SENZA la messa a terra, si osserva che la sostanziale riduzione di  $U_T$  è dovuta al fatto che  $E_{eq} < E_0$  e che tale riduzione è tanto più accentuata quanto minore è il rapporto:

$$\frac{R_E}{R_E + R_{EN}}$$

In un sistema TT, non potendo fare molto affidamento sul valore di  $R_{EN}$ , di competenza della società di distribuzione dell'energia, occorre far sì che sia piccolo il valore di  $R_E$ .

## Esempio di guasto con messa a terra

La tensione di contatto a vuoto si calcola aprendo il lato  $R_B + R_{EB}$  e usando il partitore di tensione:



$$U_{ST} = E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} = E_{eq} < E_0$$

Tensione di contatto a vuoto  
CON messa a terra

Mentre in assenza di messa a terra si aveva  $U_{ST} = E_0$ .

57

## Esempio di guasto con messa a terra

Considerando per  $U_{ST}$  il valore limite di 50 V per gli ambienti ordinari della curva di sicurezza e ponendo  $E_0 = 230$  V, si dovrà avere:

$$U_{ST} \leq 50 \text{ V} \rightarrow E_0 \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} \leq 50 \text{ V} \rightarrow \frac{R_E}{R_E + R_{EN}} \leq \frac{50}{230} \cong 0,217$$

$$\rightarrow R_E \leq 0,217(R_E + R_{EN}) \rightarrow R_E \leq \frac{0,217}{1 - 0,217} R_{EN}$$

$$\rightarrow R_E \leq 0,278 R_{EN}$$

Il che conferma ulteriormente la necessità di avere piccoli valori della resistenza di terra  $R_E$  per avere una protezione efficace.

Se per esempio si ha  $R_{EN} = 1 \Omega$ , dovrà essere  $R_E \leq 0,3 \Omega$  circa.

58

## L'impianto di terra

Data la difficoltà pratica di realizzare impianti con basso valore di  $R_E$ , la sicurezza aumenta con elevati valori di  $R_{EN}$ , ma non si può contare su questo, in quanto la resistenza di terra del neutro subisce variazioni non note all'utente e inoltre elevati valori di  $R_{EN}$  contrastano con le esigenze della società distributrice.

Per questa ragione, nella pratica la resistenza  $R_E$  non verrà determinata con questa formula, ma è possibile progettare protezioni sufficientemente sicure svincolandosi dai valori di  $R_{EN}$  e utilizzando impianti di terra con valori non troppo piccoli della resistenza di terra.

Questa possibilità è data dall'utilizzo degli interruttori differenziali.