



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



*Università degli Studi di Padova*  
*Dipartimento di Ingegneria*  
*Industriale*

# **EFFETTI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO E SISTEMI DI PROTEZIONE CON MESSA A TERRA**

*Sebastian Dambone Sessa, PhD*  
*Dipartimento di Ingegneria Industriale*  
*Università di Padova*  
*sebastian.dambonesessa@unipd.it*



**Il corpo umano è un conduttore elettrico ma non solo, molte funzioni vitali dell'organismo sono governate da impulsi elettrici. Il corpo interagisce quindi con la corrente che lo attraversa**

### **Il limite di percezione**

Alcune persone percepiscono correnti di intensità nettamente inferiore a 1 mA, mentre altre cominciano a percepire il passaggio della corrente ad intensità più elevate, dell'ordine di 2 mA o più .



# Rischi maggiori dell'elettrocuzione (passaggio della corrente elettrica attraverso il corpo umano o animale)

## ❖ CONTRAZIONE MUSCOLARE:

incapacità di controllo delle azioni muscolari (**effetto presa**). Si tende definire una soglia al di sotto della quale, pur manifestandosi la contrazione, il soggetto è ancora in grado di dominarla: si definisce così un valore di **corrente di rilascio** che, nel caso della corrente alternata a **50-100 Hz**, viene fissato, secondo considerazioni legate al calcolo delle probabilità, in **10mA** per le femmine e **15mA** per i maschi. Alcuni soggetti però sono in grado di liberarsi a correnti superiori (differenze sensibili secondo il sesso degli individui, l'età, le condizioni di salute, il livello di attenzione, ecc.).

## ❖ ARRESTO RESPIRATORIO

Con correnti oscillanti **tra 20 e 30 mA**, le contrazioni possono **raggiungere l'apparato muscolare respiratorio** fino a procurarne l'arresto.



## ❖ **USTIONI**

Esistono due tipi di ustioni:

- dovute alla formazione di **archi elettrici**: sono causate dal calore irradiato dall'arco elettrico;
- elettrotermiche: sono dovute al passaggio della corrente elettrica attraverso l'organismo (**effetto Joule**).

## ❖ **FIBRILLAZIONE VENTRICOLARE**

Con correnti stimabili **tra 70 e 100 mA** il fenomeno elettrico **investe il sistema cardiaco** potendo provocare la fibrillazione ventricolare. Esiste una proporzionalità approssimativa tra il peso corporale e la corrente necessaria alla fibrillazione, per cui i valori indicati si riferiscono a persone di età, altezza e peso corporeo medi ma anche con i parametri ambientali e causali dell'incidente, quali il percorso della corrente all'interno del corpo, la resistenza dell'organismo, il valore della tensione, la tipologia di contatto, la durata del passaggio della corrente nell'organismo.



## **IL CIRCUITO ELETTRICO "CORPO UMANO"**

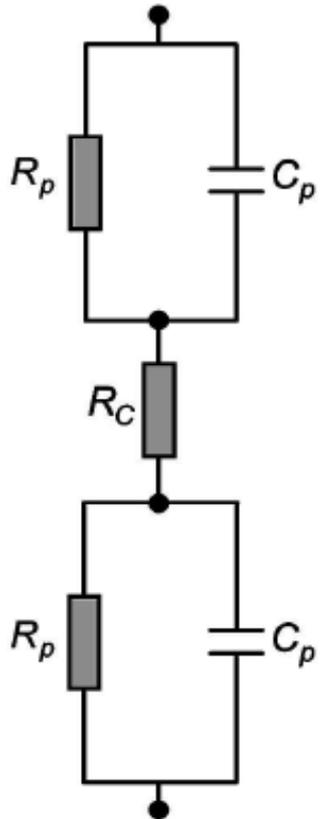
$Z_p$  : impedenza della pelle - dipende da tensione, frequenza, durata della corrente, area di contatto, pressione del contatto, grado di umidità e temperatura della pelle. Per tensioni di contatto fino a circa 50V, varia ampiamente con l'area di contatto, temperatura, respirazione. Per tensioni di contatto maggiori, da 50 a 100V, diminuisce considerevolmente e diventa trascurabile quando la pelle viene perforata

$R_c$ : resistenza del corpo

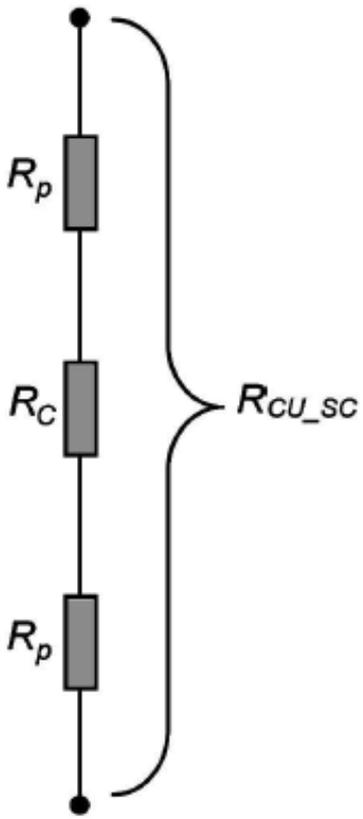
**L'IMPEDENZA COMPLESSIVA O TOTALE DEL CORPO UMANO PUÒ ESSERE RAPPRESENTATA:**

- ❖ con una resistenza globale  $R_{CU-SC} = R_C + 2R_p$  (frequenze industriali);
- ❖ con un'impedenza ohmico-capacitiva  $Z_{CU} = R_C + 2 Z_{CU}$  (fenomeni ad alta frequenza,  $> 1000\text{Hz}$ )

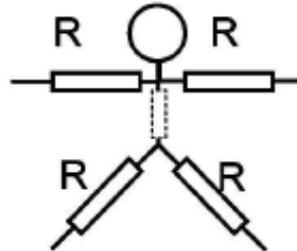
# IL CIRCUITO ELETTRICO "CORPO UMANO"



$f \geq 1000 \text{ Hz}$



$f = 50+60 \text{ Hz}$



mano-mano  $\rightarrow R_C = 2 R$

mano-piedi  $\rightarrow R_C = 3/2 R$

mani-piedi  $\rightarrow R_C = R/2 + R/2 = R$

Percorso più cautelativo  
mani-piedi  
 $R_C = R$



**Valori della resistenza totale  $R_{CU\_SC}$  del corpo umano in funzione della tensione di contatto.**

<i>Tensione di contatto [V]</i>	<i>Resistenza totale <math>R_{CU\_SC}</math> del corpo umano [<math>\Omega</math>]</i>	
	<i>Probabilità che il 50% della popolazione non superi i valori indicati</i>	<i>Probabilità che il 5% della popolazione non superi i valori indicati</i>
25	3250	875
50	2625	725
75	2200	625
90	1875	600
110	1775	535
150	1550	475
230	1350	375
280	1318	370
500	1204	360

**Il decrescere del valore della resistenza  $R_{CU\_SC}$  dipende dal fatto che l'impedenza della pelle  $Z_p$  decresce al crescere della tensione applicata fino ad annullarsi così che la resistenza totale è data solo dal contributo del corpo ovvero  $R_{CU\_SC}=R_C$ .**



**Valori della resistenza totale  $R_{CU}$  del corpo umano comprensiva dei calzari in funzione della tensione di contatto che sono superati dal 95% della popolazione.**

[Tab. A.2.2 R. Benato, R. Fellin:" Impianti Elettrici", Wolters Kluvers]

<i>Tensione di contatto [V]</i>	<i>Resistenza totale del corpo umano più i calzari [<math>\Omega</math>] <math>R_{CU} = R_t + R_{tC}</math> (cond. ordinarie)</i>	<i>Resistenza totale del corpo umano più i calzari [<math>\Omega</math>] <math>R_{CU} = R_t + R_{tC}</math> (cond. particolari)</i>
25	1875 = 875 + 1000	1075 = 875 + 200
50	1725 = 725 + 1000	925 = 725 + 200
75	1625 = 625 + 1000	825 = 625 + 200
90	1600 = 600 + 1000	800 = 600 + 200
110	1535 = 535 + 1000	735 = 535 + 200
150	1475 = 475 + 1000	675 = 475 + 200
230	1375 = 375 + 1000	575 = 375 + 200
280	1370 = 370 + 1000	570 = 370 + 200
500	1360 = 360 + 1000	560 = 360 + 200



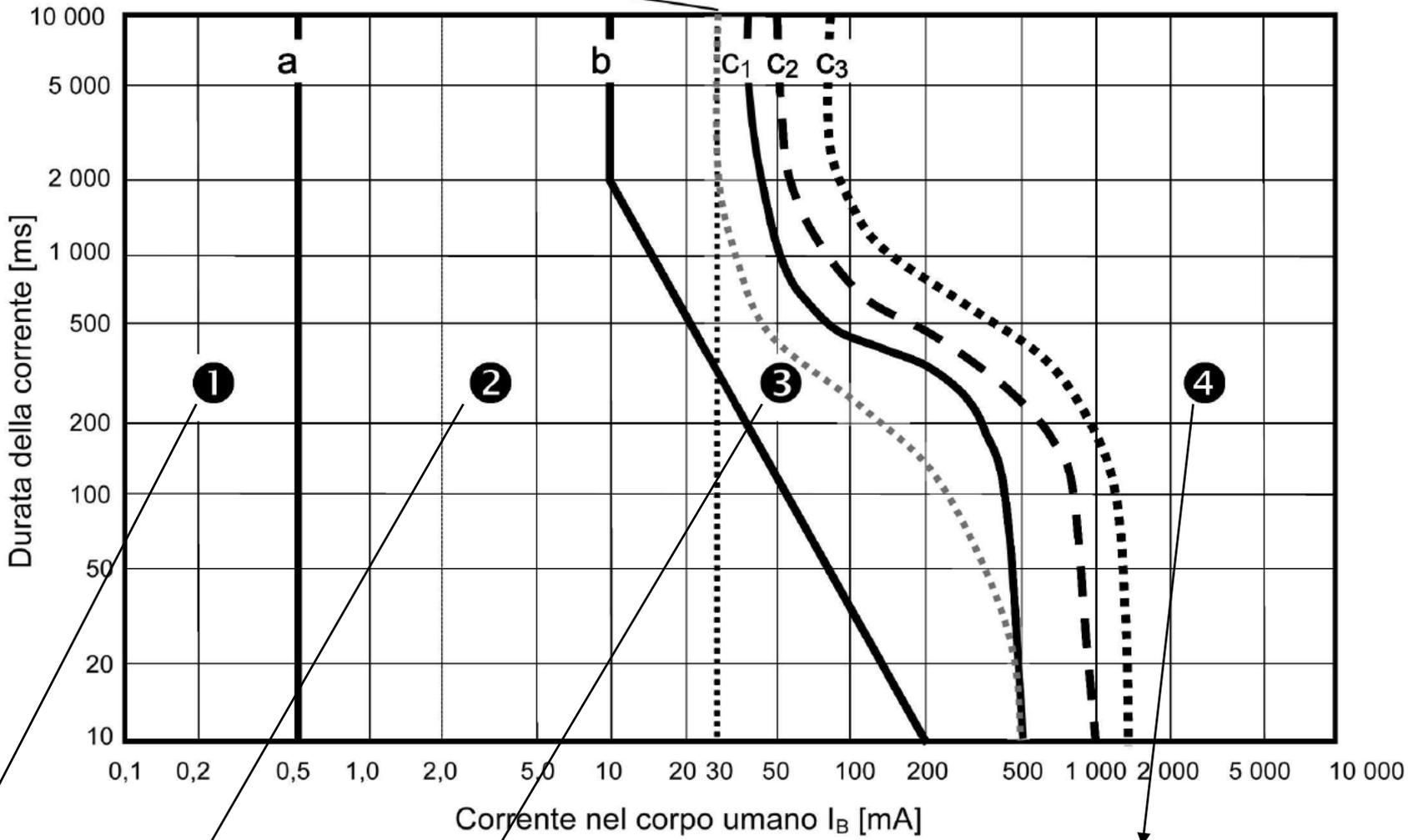
# PER LA GENERALITÀ DEGLI INDIVIDUI IN NORMALI CONDIZIONI DI SALUTE, LA SOGLIA DI PERICOLO INIZIA CONVENZIONALMENTE DA VALORI DI CIRCA 10 mA

- ❖ la pericolosità è però legata anche al tempo di permanenza del fenomeno!
- ❖ sono state convenzionalmente definite in sede internazionale (**IEC 60479-1**) delle mappe del rischio rispettivamente per le correnti alternate di frequenza compresa tra 15 e 100 Hz e per la corrente continua, per la quale la soglia di pericolosità è leggermente inferiore a quella della corrente alternata.



Curva di sicurezza normalizzata IEC

Frequenza compresa tra 15 e 100 Hz



nessuna  
reazione

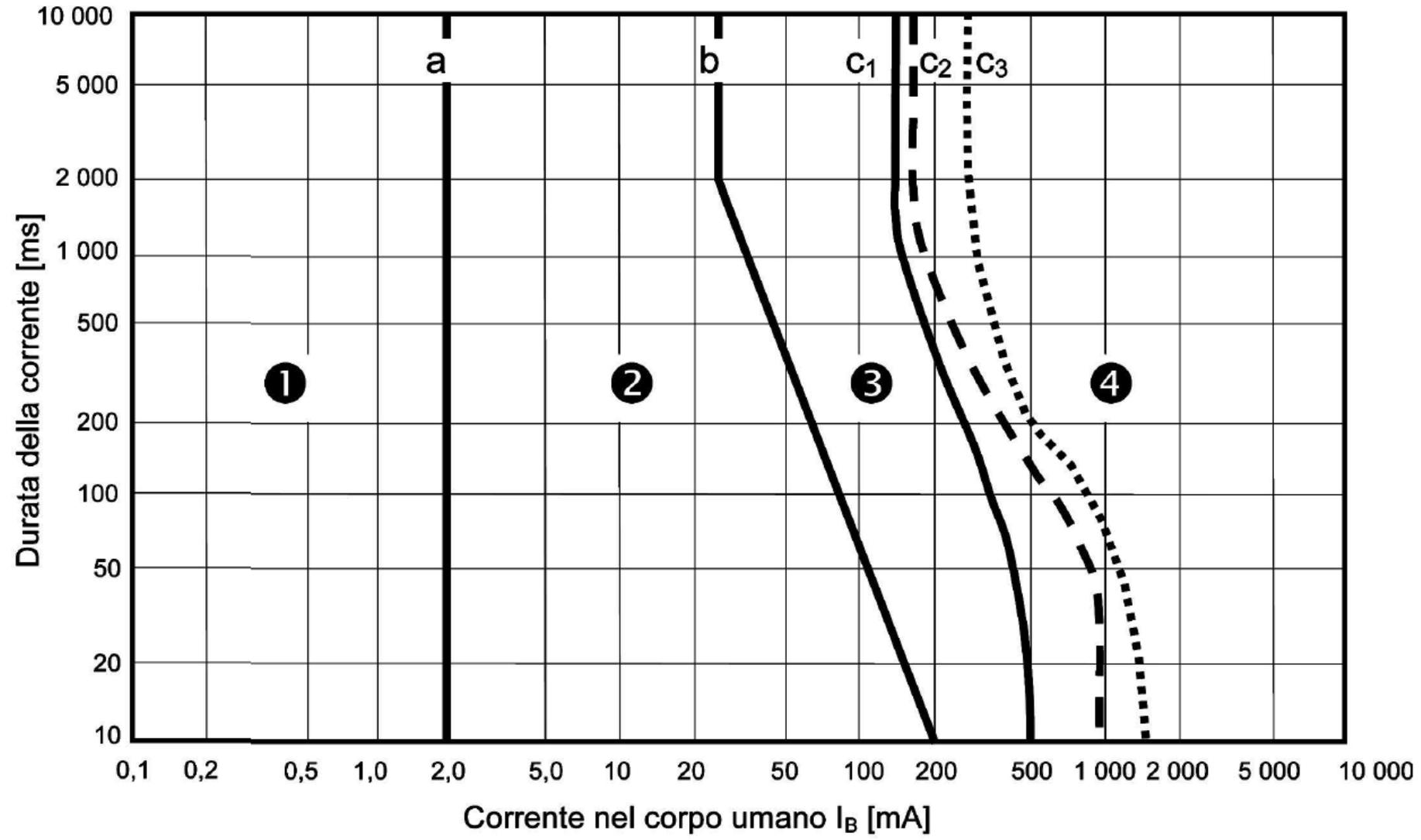
soglia di  
tetanizzazione

disturbi nel ritmo cardiaco e  
difficoltà di respirazione

fibrillazione ventricolare, arresto del  
cuore, arresto della respirazione,  
gravi bruciature



### Corrente continua





## **REGIONI DELLE MAPPE DI RISCHIO**

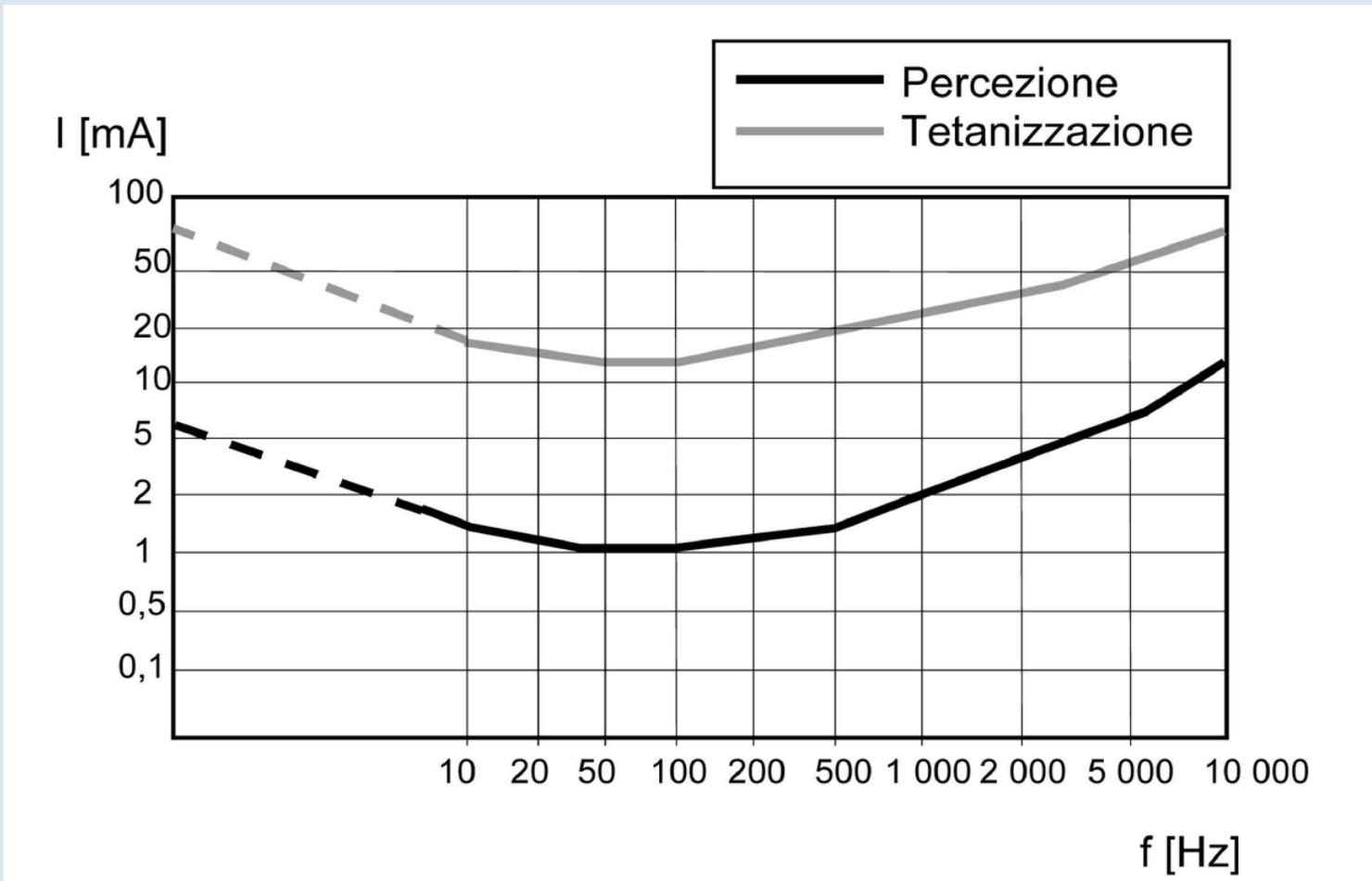
- ❖ Regione 1, delimitata dalla curva (a): solitamente caratterizzata da assenza di reazioni, fino alla soglia di percezione (ad esempio sulle dita della mano);
- ❖ Regione 2, delimitata dalle curve (a) e (b): comprende coppie di valori ( $I_B$ -t) per le quali non si riscontra alcun effetto fisiologicamente pericoloso, per giungere fino alla soglia di tetanizzazione;
- ❖ Regione 3, delimitata dalle curve (b) e (c1): generalmente non provoca nessun danno all'organismo ma, aumentando l'intensità della corrente e il tempo, possono manifestarsi disturbi nel ritmo cardiaco e difficoltà di respirazione. La curva c1 presenta quindi la soglia sopra la quale vi è l'insorgenza di fibrillazione ventricolare. Con la curva c2 la probabilità di fibrillazione ventricolare è dell'ordine del 5%; arriva al 50% con la curva c3 alla quale viene associata la soglia pressochè certa di fibrillazione ventricolare;
- ❖ Regione 4: la regione oltre la curva c3 è caratterizzata da alta probabilità di fibrillazione ventricolare, arresto del cuore, arresto della respirazione, gravi bruciature.



Secondo la curva di sicurezza corrente-tempo, la corrente che attraversa il corpo umano dovrebbe essere inferiore alla soglia di 30 mA o di 10 mA a seconda dei casi



**La pericolosità della corrente diminuisce all'aumentare della frequenza poiché la corrente tende a interessare prevalentemente la cute con un fenomeno che può essere ricondotto all'effetto pelle. Le lesioni provocate dal passaggio della corrente elettrica sono prevalentemente superficiali e interessano meno gli organi vitali.**

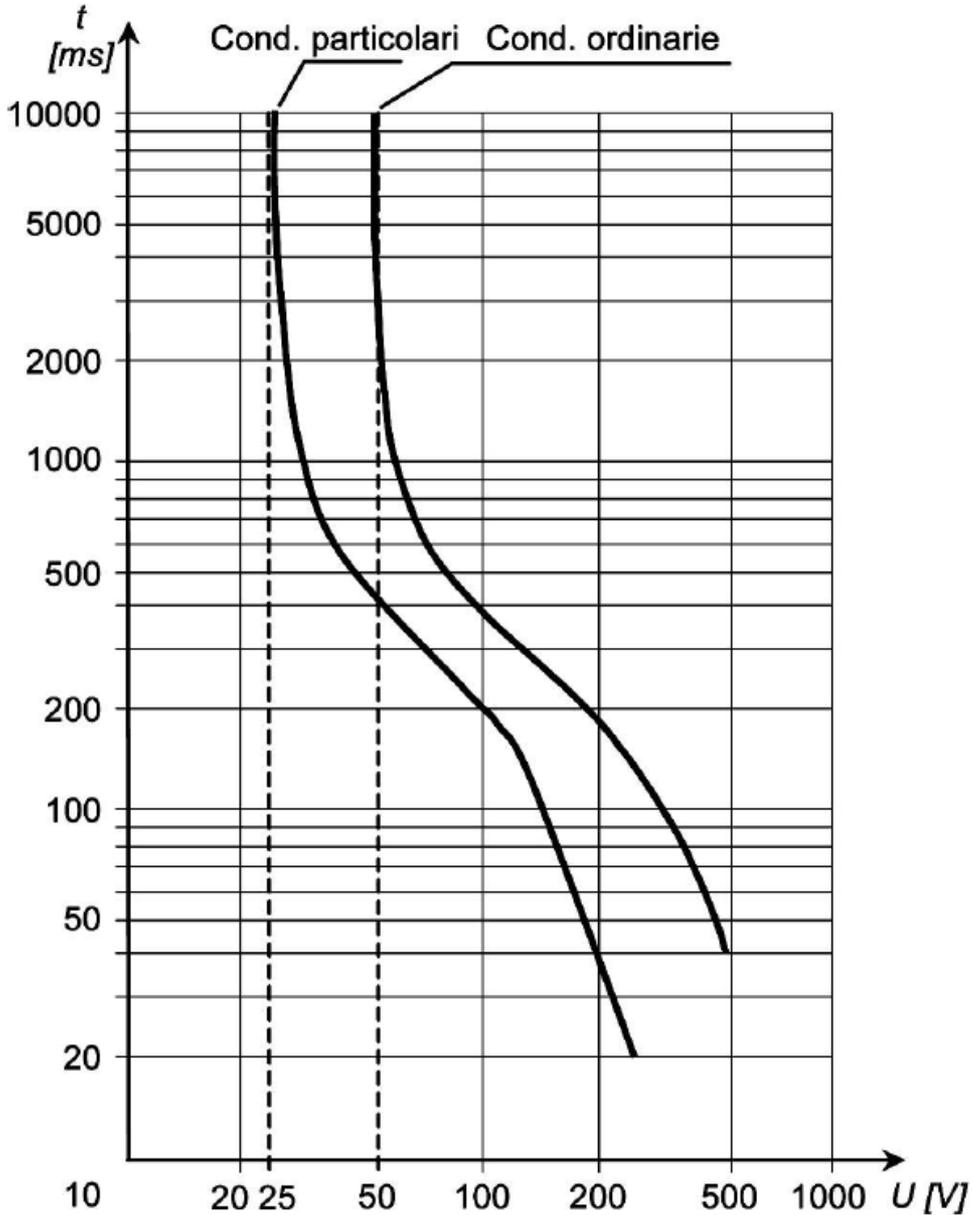




**Ai fini pratici, è più conveniente riferirsi ai valori di tensione che sono in grado di far circolare una particolare corrente piuttosto che a valori di corrente ottenendo curve di pericolosità tensione-tempo anziché corrente-tempo.**

<i>Tensioni di contatto [V]</i>	<i>CONDIZIONI ORDINARIE</i>			<i>CONDIZIONI PARTICOLARI</i>		
	<i>Resistenza <math>R_{CU}</math> come da tab. A2.2 (seconda colonna) [<math>\Omega</math>]</i>	<i>Corrente nel corpo umano della curva grigia di fig. A2.2. [mA]</i>	<i>Tempo di permanenza della tensione [s]</i>	<i>Resistenza <math>R_{CU}</math> come da tab. A2.2 (terza colonna) [<math>\Omega</math>]</i>	<i>Corrente nel corpo umano della curva grigia di fig. A2.2. [mA]</i>	<i>Tempo di permanenza della tensione [s]</i>
25	–	–	–	1075	23	5
50	1725	29	5	925	54	0,47
75	1625	46	0,6	825	91	0,30
90	1600	56	0,45	800	113	0,25
110	1535	72	0,36	735	150	0,18
150	1475	102	0,27	675	222	0,10
230	1375	167	0,17	575	400	0,03
280	1370	204	0,12	570	491	0,02
500	1360	368	0,04	–	–	–

**Si sceglie un valore di tensione di contatto, si verifica dalla tab. A2.2 quale sia il valore della  $R_{CU}$ : dividendo la tensione per tale resistenza si ottiene la corrente e finalmente dalla curva di sicurezza normalizzata (tratteggiata grigia) si inferisce il tempo per cui la tensione di contatto inizialmente ipotizzata può essere tollerata.**



**Curve di sicurezza tensione-  
tempo in condizioni  
ordinarie e particolari**



## **I sistemi distributivi in bassa tensione si differenziano essenzialmente per le modalità di collegamento al potenziale di terra di un punto del sistema attivo e delle masse degli utilizzatori**

Più precisamente, lo stato del sistema attivo (normalmente individuato dal centro stella o “neutro”) e lo stato delle masse sono individuati, nell’ordine, con una notazione a lettere alfabetiche maiuscole

**La prima lettera** (T o I a seconda dei casi): indica lo stato del sistema di distribuzione rispetto al potenziale di riferimento assunto coincidente con la “terra”:

**La seconda lettera** (T o N a seconda dei casi) indica lo stato delle masse presenti nel sistema rispetto al potenziale di terra:



**LA PRIMA LETTERA :** (T o I a seconda dei casi): indica lo stato del sistema di distribuzione rispetto al potenziale di riferimento assunto coincidente con la “terra”:

**T** = collegamento diretto a terra di un punto del sistema, solitamente coincidente con il centro stella del trasformatore (o del generatore) all’origine del sistema stesso. Si noti che il centro stella viene spesso indicato anche come neutro, potendo questo sostantivo assumere sia il significato di centro stella, sia quello di conduttore neutro, laddove questo sia distribuito al sistema stesso.

**I** = isolamento intenzionale da terra dell’intero sistema (si prescinde ovviamente dalle capacità parassite  $C_0$  sempre presenti e ovviamente ineliminabili). La lettera I viene anche utilizzata quando sussista un collegamento intenzionale del centro stella a terra, ma questo presenti un valore di impedenza molto elevato rispetto a quelle in gioco nel sistema stesso.



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



**Università degli Studi di Padova**  
**Dipartimento di Ingegneria**  
**Industriale**

**LA SECONDA LETTERA** :(T o N a seconda dei casi) indica lo stato delle masse presenti nel sistema rispetto al potenziale di terra:

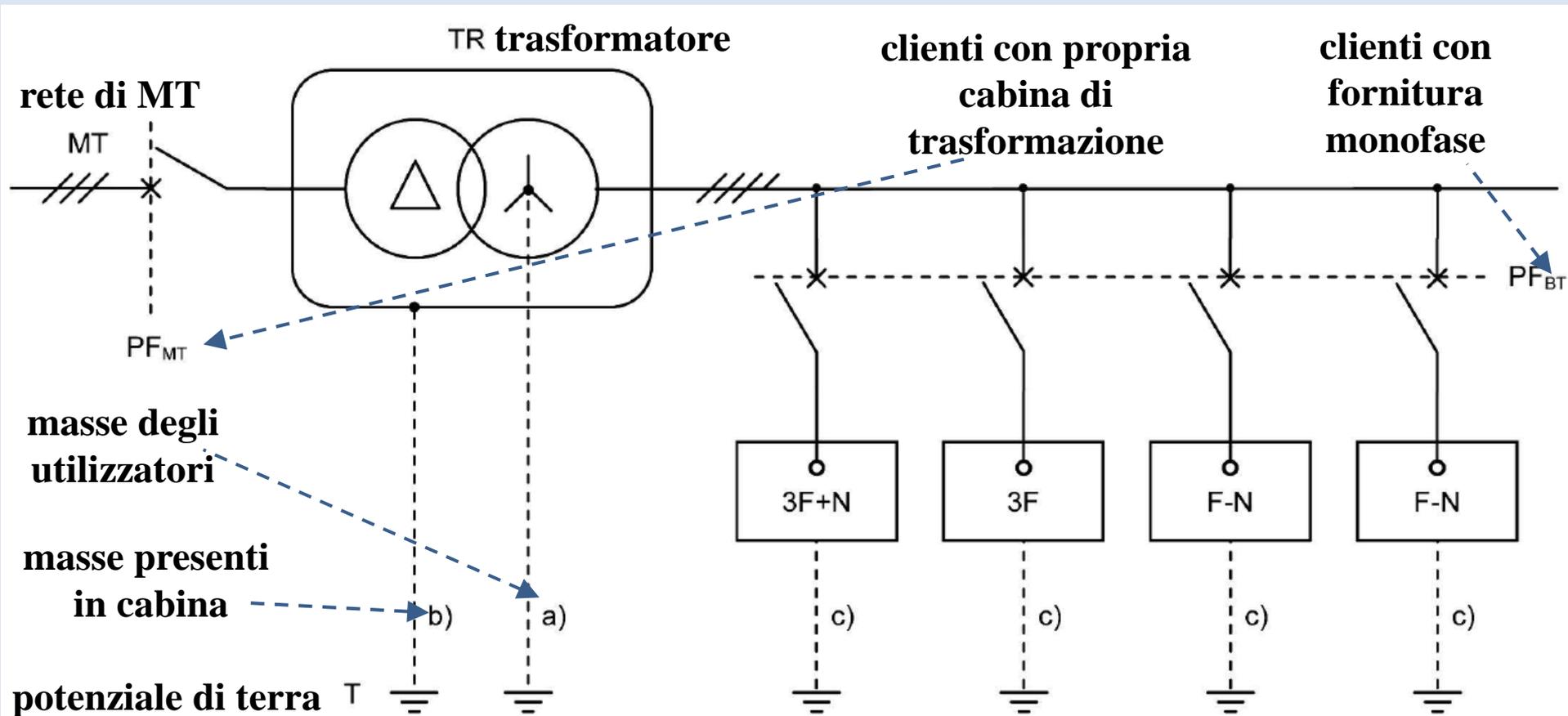
**T**= masse collegate direttamente a terra.

**N**=masse collegate al punto messo a terra del sistema di alimentazione (solitamente il centro stella del sistema stesso).



# PROTEZIONE MEDIANTE MESSA A TERRA DELLE MASSE

Schema base unifilare di sistemi di distribuzione in bassa tensione:

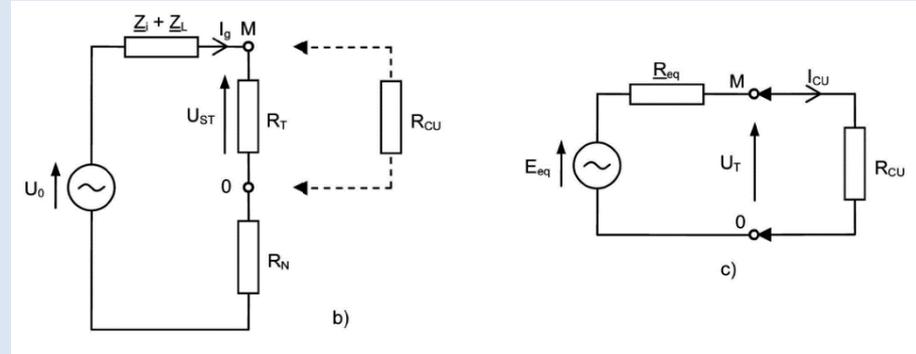
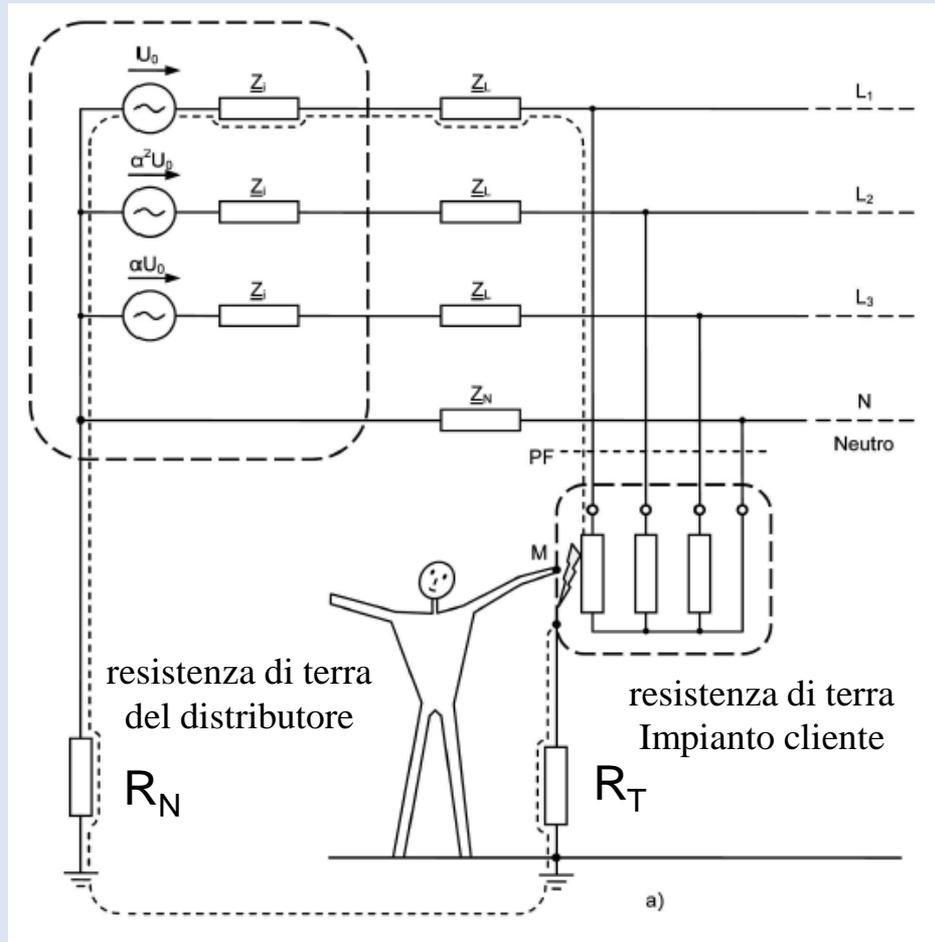




## DEFINIZIONI FONDAMENTALI

- ❖ **Parte attiva:** conduttore o parte conduttrice in tensione nel servizio ordinario, compreso il conduttore di neutro, ma escluso per convenzione il conduttore PEN.
- ❖ **Isolamento principale:** isolamento delle parti attive utilizzato per la protezione base contro i contatti diretti e indiretti.
- ❖ **Massa:** parte conduttrice di un componente elettrico che può essere toccata e che non è in tensione in condizioni ordinarie, ma che può andare in tensione in condizioni di guasto. Si noti che una parte conduttrice che può andare in tensione solo perché in contatto con una massa non è da considerare una massa.
- ❖ **Massa estranea:** parte conduttrice non facente parte dell'impianto elettrico in grado di introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra.
- ❖ **Contatto diretto:** contatto di persona con parti attive.
- ❖ **Contatto indiretto:** contatto di persona con una massa in tensione per un guasto.
- ❖ **Corrente di guasto:** corrente che si stabilisce a seguito di un cedimento dell'isolante o quando l'isolamento è cortocircuitato.
- ❖ **Corrente di guasto a terra:** corrente di guasto che si chiude attraverso l'impianto di terra.

## SISTEMA TT



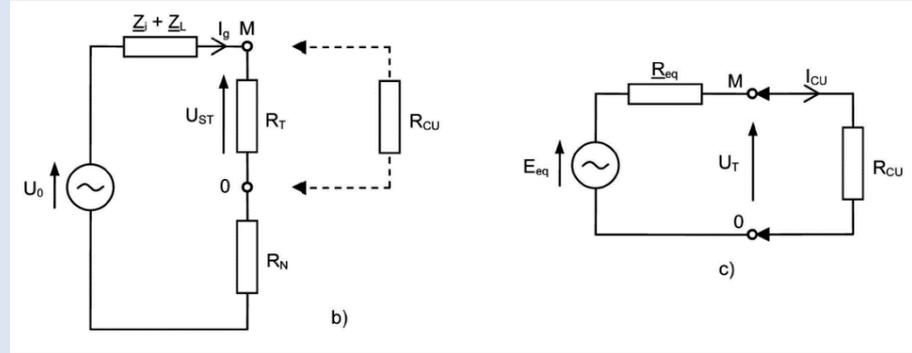
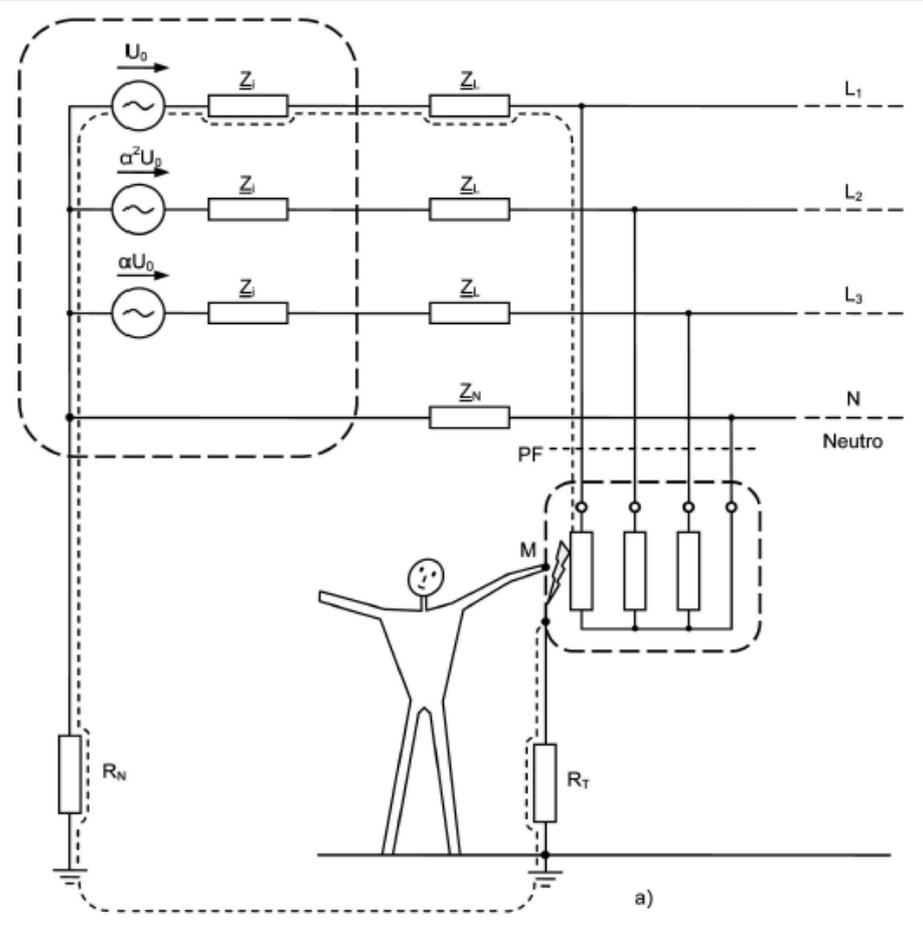
Corrente di guasto (si trascurano  $Z_i$  e  $Z_L$ )

$$I_g \cong \frac{U_o}{R_T + R_N}$$

Tensione totale di terra dell'impianto  $U_E$

$$U_E = I_g R_T \cong \frac{U_o}{1 + \frac{R_N}{R_T}}$$

# SISTEMA TT



corrente  $I_{CU}$  che interessa il corpo umano sarà

$$I_{CU} \cong \frac{E_{eq}}{R_{eq} + R_{CU}}$$

dove:

$$E_{eq} \cong U_E$$

$$R_{eq} \cong \frac{R_T R_N}{R_T + R_N}$$

Tensione sul corpo umano  $U_T$

$$U_T = I_{CU} R_{CU} \cong \frac{E_{eq}}{1 + \frac{R_{eq}}{R_{CU}}}$$

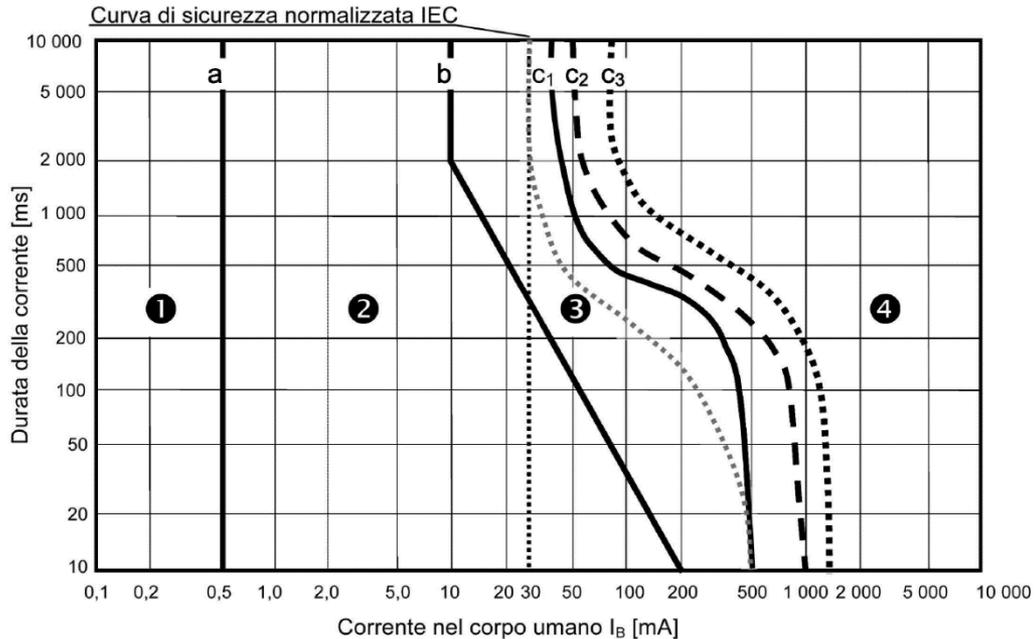
Poiché  $R_{CU} \gg R_{eq}$



$$I_{CU} \cong \frac{U_E}{R_{CU}}$$



## Torniamo alla curva corrente-tempo.....



**Secondo la curva di sicurezza  
corrente-tempo, la  
corrente che attraversa il corpo  
umano dovrebbe essere inferiore  
alla soglia  
di 30 mA o di 10 mA a seconda dei  
casi**

**È possibile constatare, con un esempio di calcolo,  
che non è  
scontato raggiungere condizione di sicurezza**

## SISTEMA TT

Supponiamo:

$$R_{CU}=2000 \Omega, R_N=1 \Omega,$$

$$R_T=1,3 \Omega, U_0=230 V$$

Corrente di guasto:

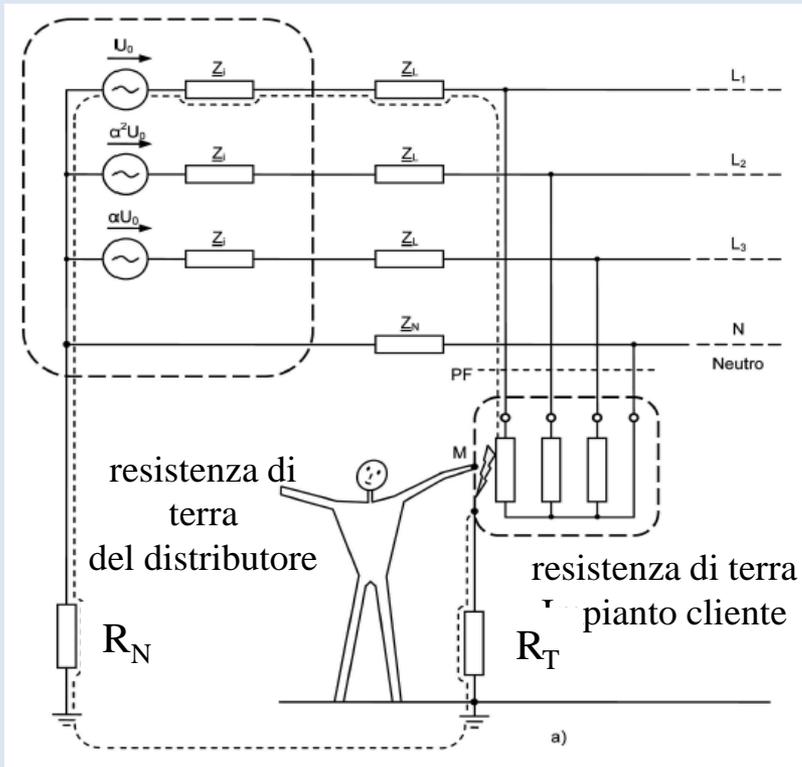
$$I_g=U_0/(R_N+R_T)=230/2,3=100 A$$

Tensione di terra

$$U_E= R_T * I_g=100*1,3=130 V$$

Corrente sul corpo umano

$$I_{CU}= U_E/R_{CU}=130/2000=65 mA$$



**Con  $R_T = 0$  la tensione totale di terra risulterebbe nulla e la protezione contro contatti indiretti sarebbe idealmente assicurata dalla creazione di un percorso alternativo per la corrente grazie all'impianto di messa a terra delle masse. Tale condizione non è fisicamente realizzabile; anzi, solitamente pur essendo  $R_N$  e  $R_T$  entrambe di valore trascurabile rispetto al valore di  $R_{CU}$  risulta  $R_N < R_T$  per cui la corrente difficilmente può essere contenuta al di sotto dei valori di soglia.**



Per evitare l'introduzione di incerti valori da assegnare a  $R_{CU}$ , le normative internazionali e nazionali in materia di sicurezza preferiscono assegnare dei limiti non tanto alla corrente che interessa un ipotetico corpo umano, quanto alla tensione totale di terra a vuoto (o alla massima tensione di contatto), cioè a un valore riferibile in modo intrinseco all'impianto e dunque misurabile con certezza. Fissato in tal modo un valore limite di sicurezza  $U_L$ , solitamente pari a 50 V (ma in condizioni particolari ridotto a 25 V), si richiede che in qualunque condizione di guasto la massima tensione di contatto a vuoto sia inferiore a tale limite:

$$U_{STMAX} = U_E \cong E_{eq} \cong \frac{U_0}{1 + \frac{R_N}{R_T}} \leq U_L$$



## **LA CONDIZIONE $U_L \leq 50 \text{ V}$ (LA MENO RESTRITTIVA) NON È FACILE DA RISPETTARE!!!**

Anche supponendo, nel caso migliore, che sia  $R_N = R_T = 1 \ \Omega$ , per un normale cliente monofase alimentato a

$U_0 = 230 \text{ V}$ , si avrebbe:

$$U_E = U_0 / (1 + (R_N / R_T)) = 115 \text{ V}$$

In pratica, la resistenza di terra del Distributore,  $R_N$ , è spesso inferiore a  $1 \ \Omega$ .

Nell'esempio fatto quindi per contenere la  $U_E$  entro  $50 \text{ V}$   $R_T$  dovrebbe essere inferiore a circa  $0,3 \ \Omega$ , valore assai difficile da ottenere specie in impianti che possono disporre solo di dispersori di limitate estensioni.

**SOLUZIONE: INTERRUTTORE DIFFERENZIALE**

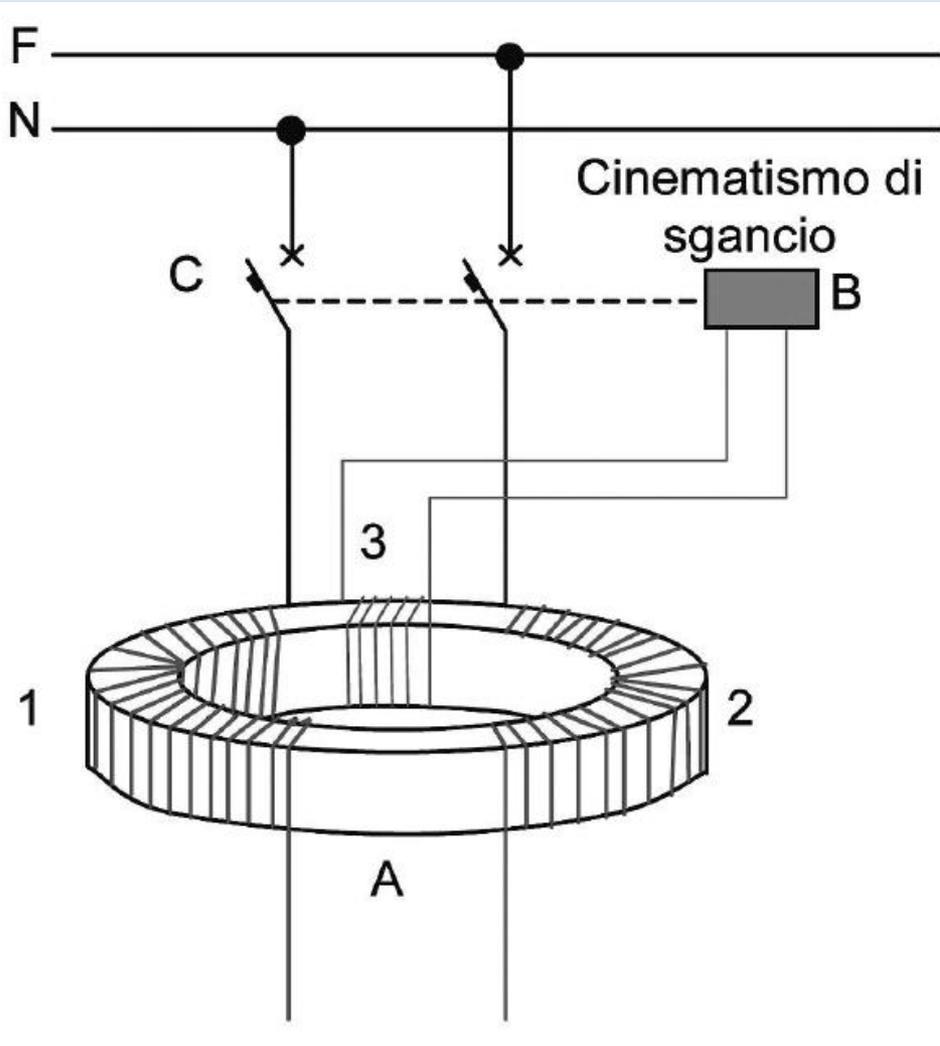


## **L'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE**

L'interruttore differenziale è un dispositivo sensibile a correnti di “dispersione” o di guasto verso massa, solitamente in grado di interrompere in modo automatico l'alimentazione del circuito. Nel funzionamento normale di un apparecchio

elettrico la sommatoria delle correnti nelle fasi ed eventualmente nel neutro che lo alimentano è sempre nulla. In caso di guasto, si crea invece una corrente di dispersione verso le masse per cui la sommatoria delle correnti sarà diversa da zero

## L'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE



Fase F e neutro N sono avvolti al nucleo toroidale (1 e 2) in modo tale che il flusso risultante prodotto dalle due correnti (in 1 e in 2) si elimini qualora le due correnti siano uguali in modulo e opposte in verso. In questa situazione l'avvolgimento 3 non sente alcun flusso e quindi non vi è nessuna tensione indotta sui suoi avvolgimenti. Se la corrente non torna per il secondo conduttore, (e torna, ad esempio, attraverso un corpo umano) i due flussi nel toroide non si elidono e ne risulta un flusso che può, e quindi una corrente.

**Se il valore di taratura della corrente nel circuito secondario supera il valore di un'opportuna soglia di sicurezza viene azionato il cinematismo di sgancio B e il circuito viene aperto dall'interruttore C**



## **L'INTERRUTTORE DIFFERENZIALE**

L'interruttore differenziale inserito in un circuito elettrico con un efficiente impianto di terra, è perciò in grado di garantire la protezione contro i contatti indiretti. Pur non riuscendo ad evitare il passaggio di corrente attraverso il corpo per il periodo di tempo necessario al rilevamento e all'intervento del dispositivo, consente di restare al di sotto dei limiti fissati dalla curva di sicurezza

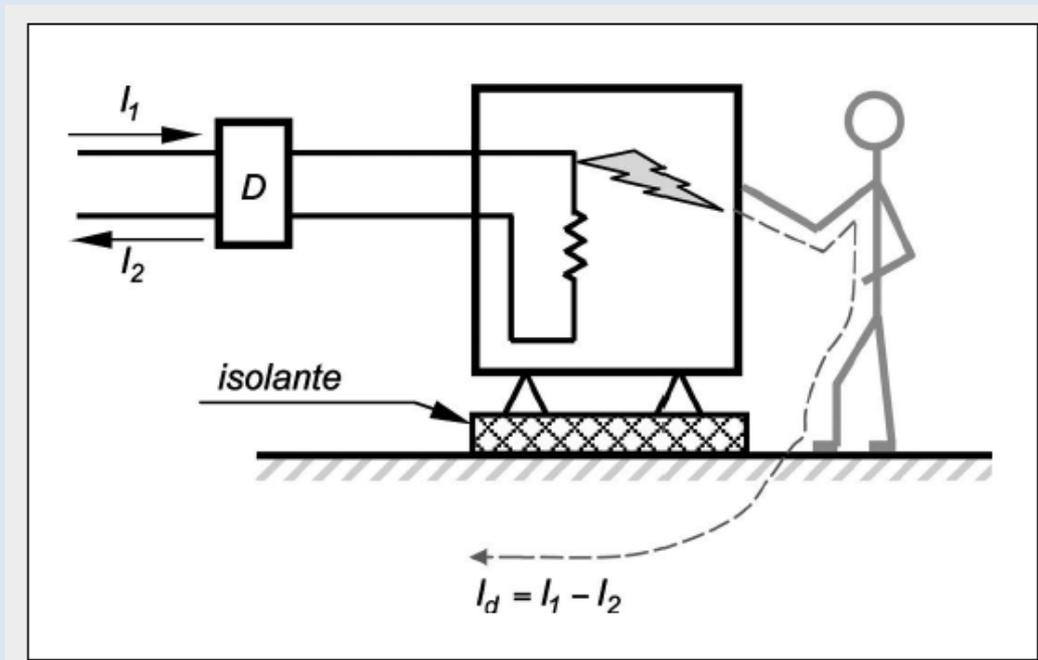
**Le soglie di intervento degli interruttori differenziali possono essere tipicamente pari a:**

10mA 30mA 100mA 300mA 500mA 1A 10A

ma solo le prime due sono accettabili anche quali soglie di sicurezza per la protezione delle persone (funzione salvavita dell'interruttore differenziale) mentre le altre sono più adatte per proteggere cose o impianti.

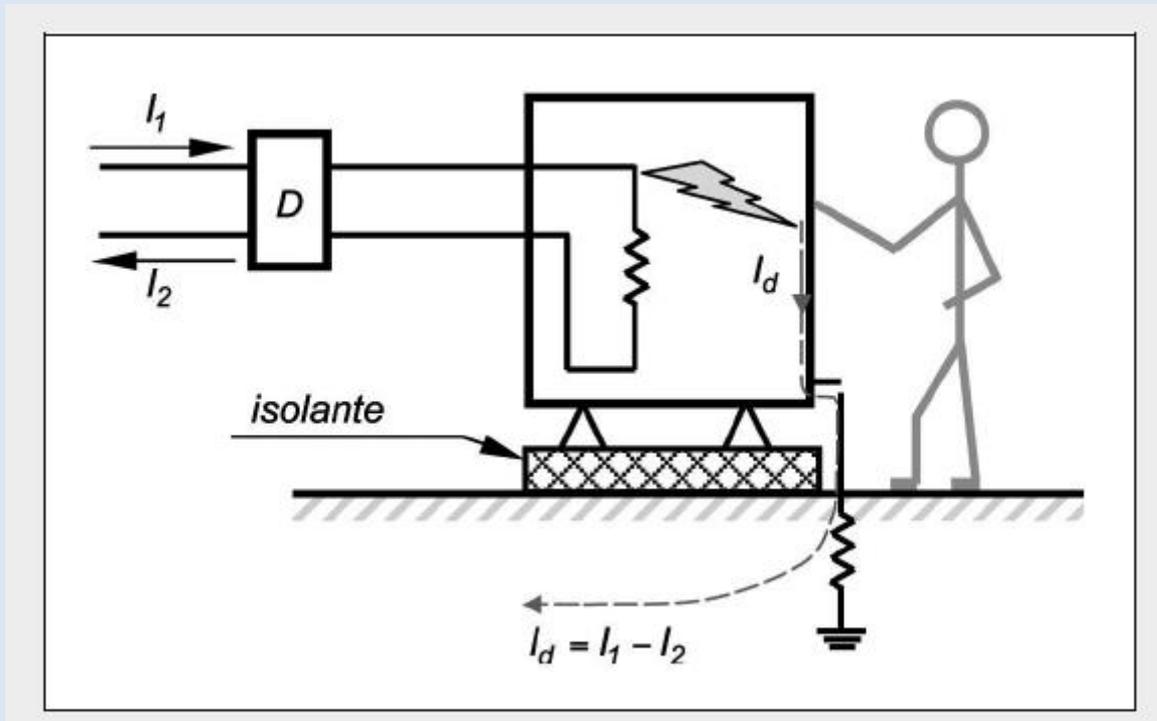
## CASI SIGNIFICATIVI DI FUNZIONAMENTO

Caso di guasto verso massa su impianto in cui sia stata omessa la richiesta connessione a terra delle masse. La massa può restare pericolosamente in tensione fino a quando il circuito non venga chiuso da un contatto indiretto: l'interruttore differenziale interviene solo allo stabilirsi di una corrente verso terra attraverso la persona. La protezione è assicurata se la soglia di intervento è adeguata, ma la persona è comunque interessata da corrente.



## CASI SIGNIFICATIVI DI FUNZIONAMENTO

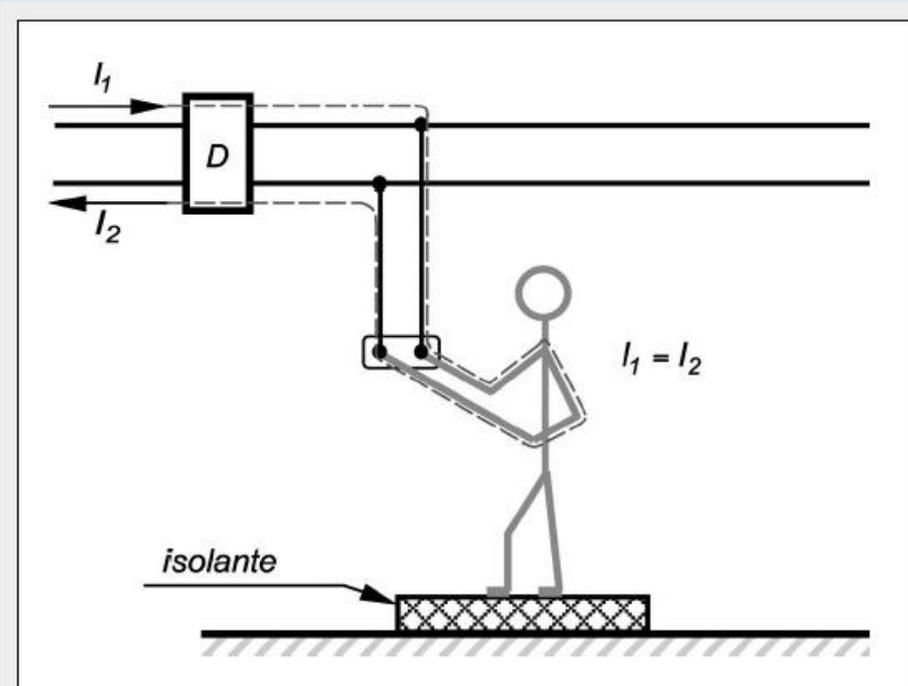
Caso di guasto verso massa su impianto in cui sia presente la richiesta connessione a terra (o al neutro) delle masse. Al manifestarsi del guasto a terra la corrente si stabilisce attraverso il conduttore di protezione che provoca l'intervento dell'interruttore differenziale indipendentemente dal contatto della persona.





## CASI SIGNIFICATIVI DI FUNZIONAMENTO

Caso in cui una persona isolata da terra viene in contatto contemporaneamente con due fasi del circuito. La protezione non è più assicurata dalla presenza dell'interruttore differenziale in quanto il corpo della persona si configura come un qualsiasi carico utilizzatore, dato che la corrente in entrata è uguale a quella in uscita e quindi il differenziale non interviene. In questo caso l'interruttore differenziale potrebbe comunque intervenire in mancanza di isolamento verso massa della persona qualora la corrente drenata dal corpo verso terra raggiunga il valore di soglia.





## **SISTEMA TT: SITUAZIONI CRITICHE**

- ❖ Alterazione nel tempo del valore della resistenza di terra  $R_T$
- ❖ Interruzione del circuito di messa a terra:  $R_T = \infty$
- ❖ Malfunzionamento dell'interruttore differenziale



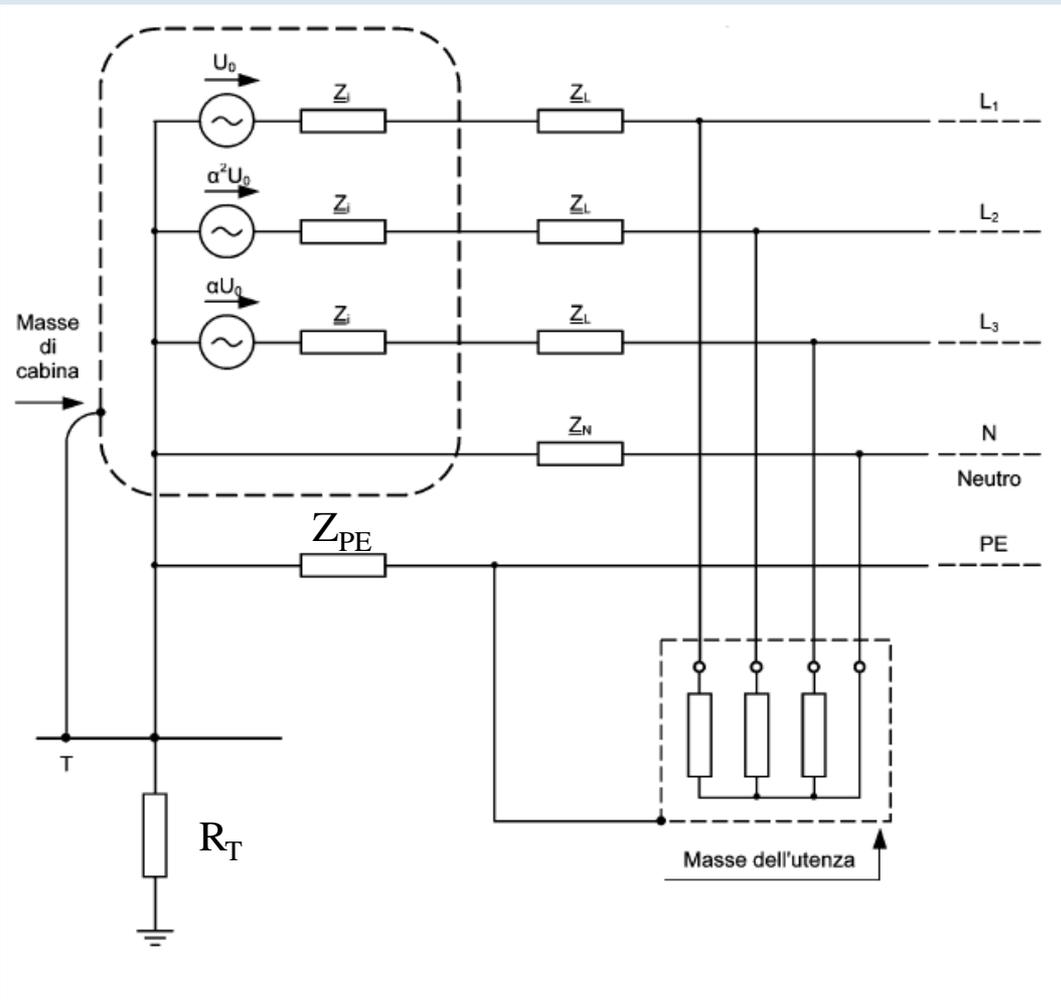
## **CENNI SU ALTRE MODALITÀ DI MESSA A TERRA**

### **SISTEMA TN**

È il sistema quasi ovunque adottato per le reti di distribuzione interne in BT, proprietarie, circoscritte nella loro estensione (stabilimenti industriali, edifici del settore terziario), alimentate tramite una o più cabine di trasformazione MT/BT a loro volta allacciate ad un unico punto di fornitura in MT alla rete del Distributore.



## SISTEMA TN



La rete di distribuzione è solitamente a 4 o a 5 conduttori e consente l'alimentazione di carichi trifase e monofase centro/i stella del/i Trasformatore/i è /sono collegato/i direttamente a terra (prima lettera: T); le masse dell'impianto sono riferite a quello stesso punto (seconda lettera: N).

**Il neutro può essere interessato da correnti, dovute a dissimmetrie dei carichi**

## SISTEMA TN-S

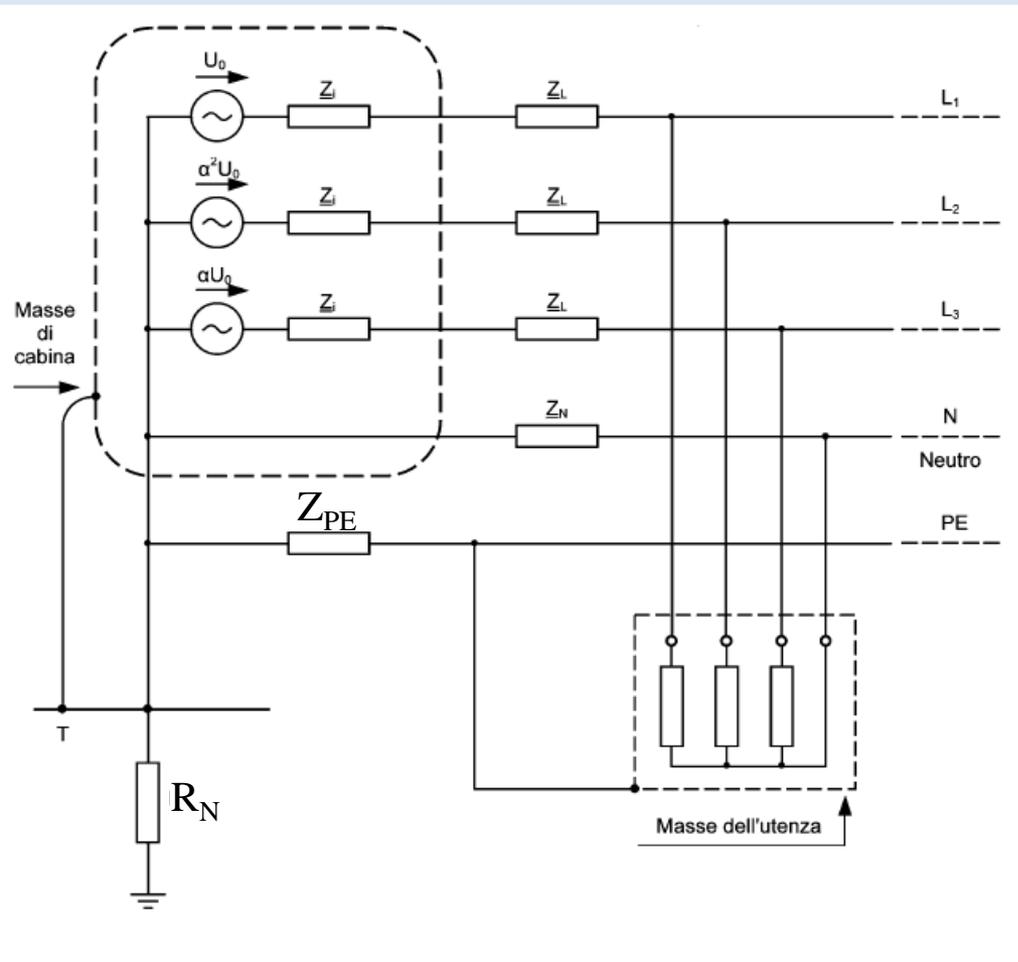
Il conduttore neutro (N) e il conduttore di protezione (PE) che connette a terra le masse sono separati. Il neutro può essere interessato da correnti, dovute a dissimmetrie dei carichi, anche durante il normale esercizio dell'impianto mentre il conduttore di protezione diviene attivo solo nel caso di guasti verso massa;

## SISTEMA TN-C

Il conduttore di neutro e quello di protezione coincidono (conduttore PEN). Si risparmia un filo ma richiede accorgimenti perché sia garantita la sicurezza

## SISTEMA TN-C-S

Sono simultaneamente presenti sia il neutro che il conduttore di protezione





## SISTEMA TN

$$E_{eq} \cong I_g Z_{PE} \cong \frac{U_0}{Z_f + Z_{PE}} Z_{PE} = \frac{U_0}{1 + \frac{Z_f}{Z_{PE}}}$$

$$Z_{eq} = R_N + \frac{Z_{PE} Z_f}{Z_f + Z_{PE}}$$

ed essendo sempre:

$$R_{CU} \gg Z_{eq}$$

si può ritenere che sia:

$$U_T \cong U_{ST} = E_{eq} = \frac{U_0}{1 + \frac{Z_f}{Z_{PE}}} \quad (1)$$

Con considerazione analoghe a quanto fatto nel sistema TT, e con stesso significato delle variabili, si può osservare come **la tensione su un corpo umano** in contatto con una massa in tensione è **legato essenzialmente al valore del rapporto  $Z_{PE} / Z_f$** . L'efficacia della protezione è quindi data da un'efficiente rete di conduttori PE o PEN



## **ASPETTI PECULIARI DEL SISTEMA TN**

**A differenza del sistema TT, la corrente di guasto  $I_g$  è solitamente corrispondente ad una vera corrente di corto circuito essendo limitata solo dal valore di parametri tutti attribuibili al circuito (impedenze dei conduttori e della rete a monte e del trasformatore), ma non alla resistenza di terra  $R_N$**

**La protezione delle persone può essere garantita, nei sistemi TN, dalla sola presenza di protezioni di massima corrente**



## **CENNI SU ALTRE MODALITÀ DI MESSA A TERRA**

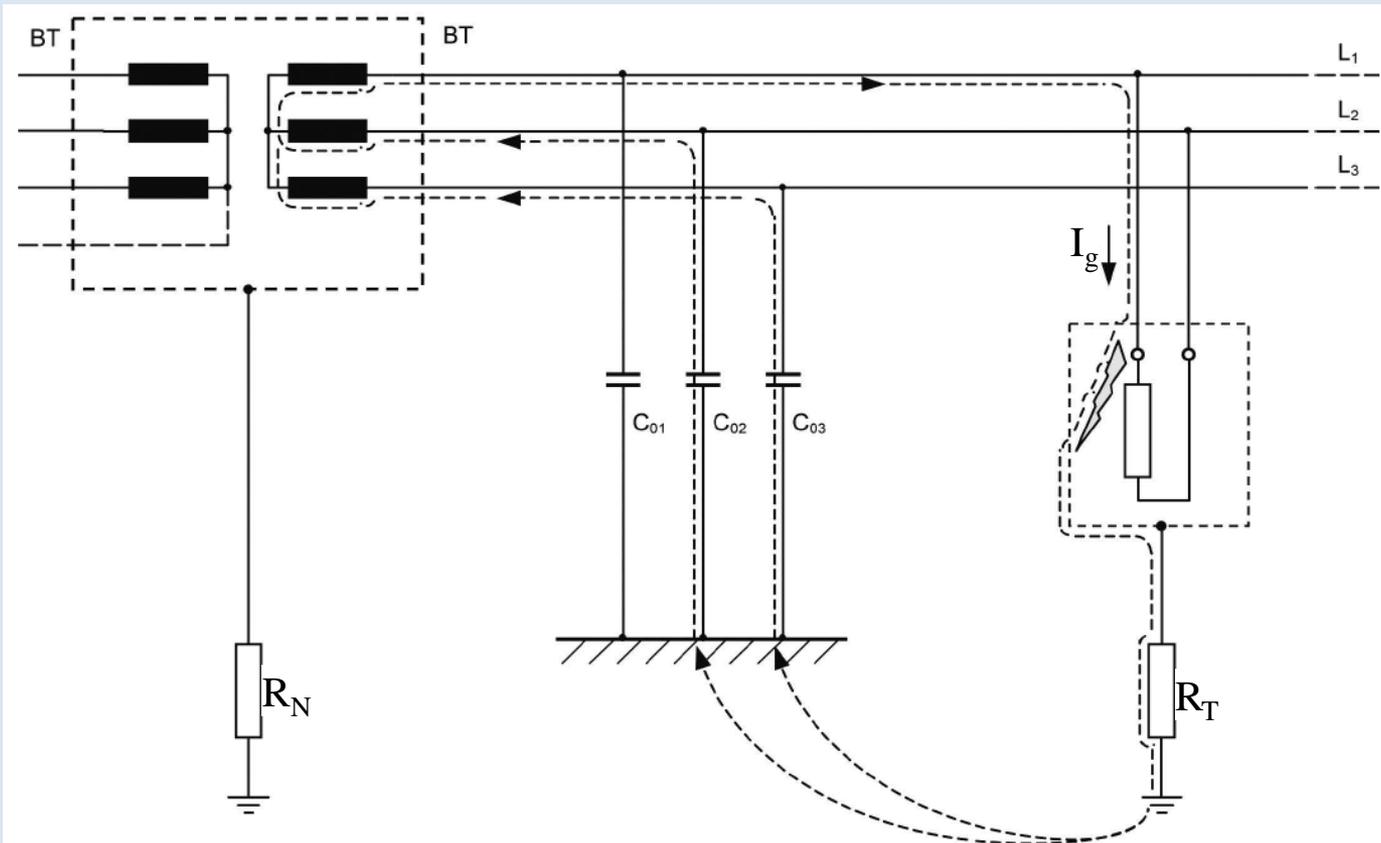
### **SISTEMA IT**

**Si tratta solitamente di sistemi poco estesi, che originano da un trasformatore BT/BT con particolari caratteristiche (spesso con rapporto di trasformazione 1:1), dedicati ad esempio ad ambienti di uso medico, impianti a bordo di veicoli, impianti per applicazioni nelle quali la sicurezza e/o la continuità del servizio siano fattori molto critici.**

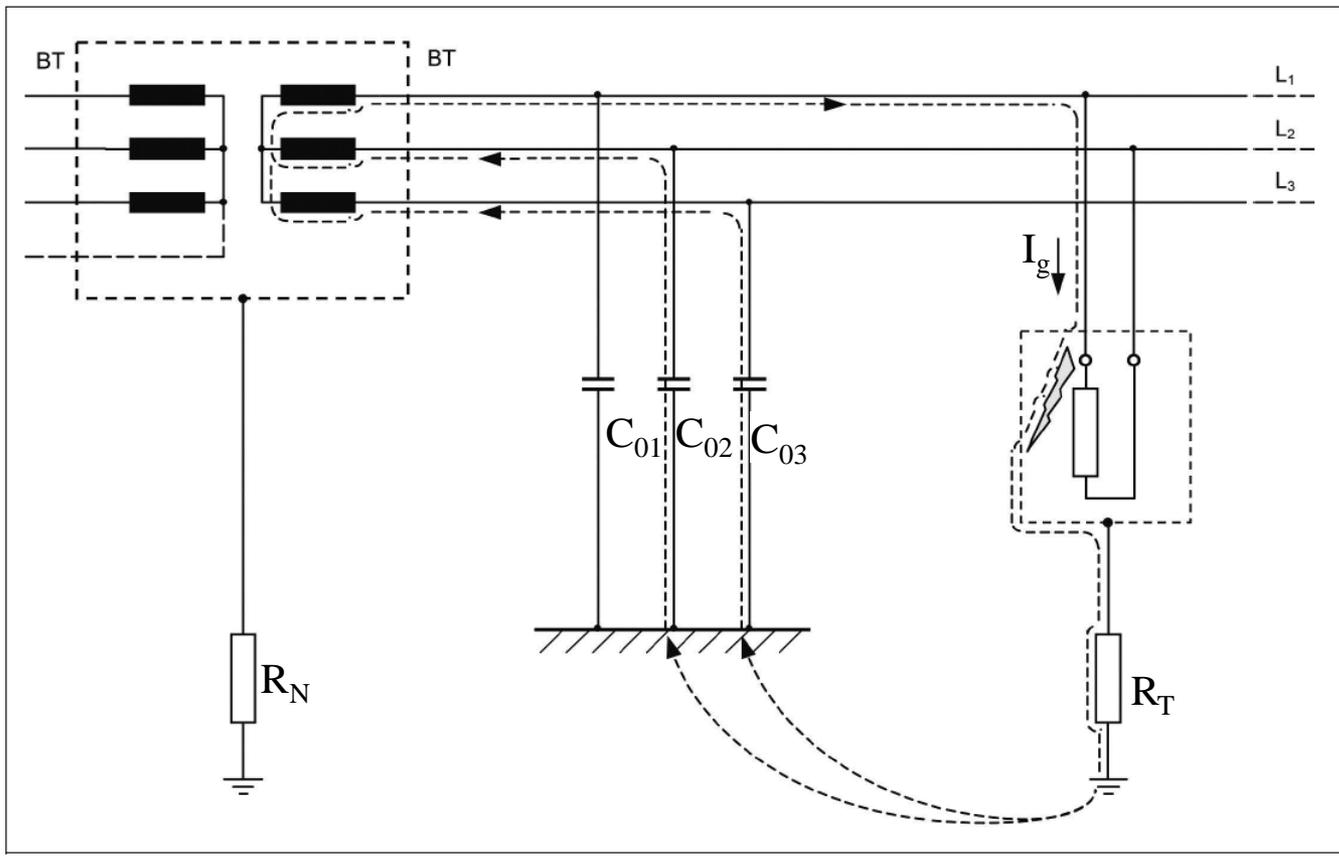


## SISTEMA IT

Il sistema trae origine dal secondario di un trasformatore con collegamento a triangolo o a stella, privo di qualsiasi riferimento delle parti attive a terra (prima lettera: I). Vi è invece la necessità di un collegamento a terra delle masse metalliche e dei conduttori non attivi del sistema (seconda lettera: T).



## CORRENTE DI GUASTO NEI SISTEMI IT



$$I_g = \left| \frac{U_0}{\left( R_T - j \frac{1}{3\omega C_o} \right)} \right|$$

$$I_g = \frac{U_0}{\sqrt{\left( R_T^2 + \frac{1}{(3\omega C_o)^2} \right)}}$$



## **CORRENTE DI GUASTO NEI SISTEMI IT**

In questo caso la corrente di guasto è di modesta entità e di natura prevalentemente capacitiva. La capacità del sistema elettrico è dovuta soprattutto ai cavi, in misura minore alle capacità verso massa degli utilizzatori (ad esempio avvolgimenti di motori) e del trasformatore dal quale l'impianto è derivato. La componente resistiva della corrente è dovuta prevalentemente alla resistenza di terra  $R_T$ . Il valore della corrente complessiva di guasto  $I_g$ , trascurando le impedenze interna del trasformatore e quelle dei conduttori della linea, è esprimibile dalle:

$$I_g = \left| \frac{U_0}{\left( R_T - j \frac{1}{3\omega C_o} \right)} \right|$$
$$I_g = \frac{U_0}{\sqrt{\left( R_T^2 + \frac{1}{(3\omega C_o)^2} \right)}}$$

dove:

$R_T$  è la resistenza del dispersore al quale sono collegate le masse (inclusi i collegamenti)



## **CORRENTE DI GUASTO NEI SISTEMI IT**

Dato l'elevato valore del termine capacitivo, e talvolta anche di  $R_T$ , il valore di  $I_g$  è solitamente molto modesto; solo in casi eccezionali, con sistema IT utilizzato quale sistema di distribuzione per impianti estesi, è possibile che si raggiungano valori dell'ordine della decina di ampere.

La condizione di sicurezza sussiste anche in questo caso, come per i sistemi TT, quando sia soddisfatta per la massima tensione di contatto a

vuoto  $U_{ST}$  la condizione di sicurezza:  $U_{ST} = R_T I_g \leq U_L$

- ❖ Il modesto valore della corrente limita inoltre le conseguenze di un guasto a terra: in particolare, molto difficilmente si potranno formare archi pericolosi per le persone e per le cose.
- ❖ Viene evitata l'interruzione del servizio, evitando notevoli danni economici o non compromettendo la sicurezza delle persone (processi industriali particolarmente esigenti, locali chirurgici e simili)



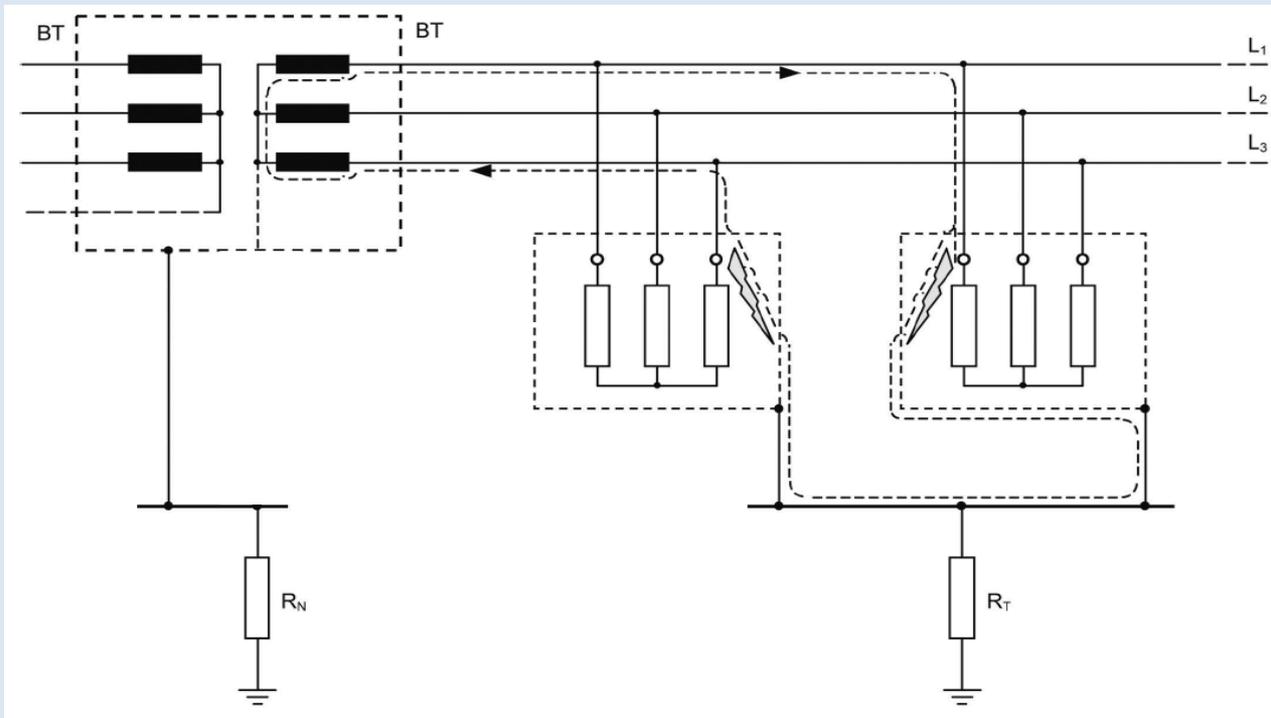
## **CORRENTE DI GUASTO NEI SISTEMI IT**

**L'IMPIANTO PUÒ QUINDI RIMANERE IN SERVIZIO ANCHE  
IN CASO DI UN PRIMO GUASTO FASE – MASSA**

### **PROBLEMA:**

Nei sistemi a neutro isolato la tensione sulle fasi sane in presenza di un guasto a terra diventa la tensione concatenata. Ciò potrebbe indurre, in presenza di punti deboli nel sistema, un secondo guasto verso massa: la condizione di guasto diventa allora quella del guasto fase-fase terra (doppio guasto a terra)

## DOPPIO GUASTO A TERRA



La corrente assume i valori tipici della corrente di corto circuito:  
le protezioni di massima corrente aprono il circuito, e viene meno  
la continuità di servizio



## **SOLUZIONE PER EVITARE L'INSTAURARSI DI UN DOPPIO GUASTO A TERRA**

Il primo guasto fase-massa va eliminato quanto prima possibile e, soprattutto, va immediatamente segnalato agli operatori non appena si manifesti.

Nei sistemi IT è perciò necessario prevedere un sistema di controllo continuo dell'isolamento verso terra in modo da permettere una rapida individuazione ed eliminazione del primo guasto a terra.



## "DISPERSORI" DI TERRA

È conveniente l'impiego di rame, acciaio rivestito di rame, materiali ferrosi zincati. Si possono usare anche materiali non zincati e altri materiali metallici, purchè compatibili con la natura del terreno poichè il dispersore va protetto dalle aggressioni chimiche del terreno. In alcuni casi si deve evitare che il dispersore divenga causa di fenomeni elettrovoltaici dovuti alla presenza di metalli diversi nello stesso terreno (per esempio rame e ferro) che possono causare danni ad altri impianti.

	<i>Tipo di elettrodo</i>	<i>Dimensioni minime</i>	<i>Acciaio zincato (*) a caldo norma CEI 7-6</i>	<i>Acciaio rivestito di rame (**)</i>	<i>Rame</i>
<i>Per posa nel terreno</i>	Nastro	Spessore (mm)	3		3
		Sezione (mm <sup>2</sup> )	100		50
	Tondino o conduttore massiccio	Sezione (mm <sup>2</sup> )	50		35
<i>Per infissione nel terreno</i>	Picchetto a tubo (**)	ϕ esterno (mm)	40		30
		Spessore (mm)	2,5		3
	Picchetto massiccio (**)	ϕ (mm)	20		15
<i>Per infissione nel terreno</i>	Picchetto in profilato	Spessore (mm)	5		5
		Dimensione trasversale (mm)	50		50

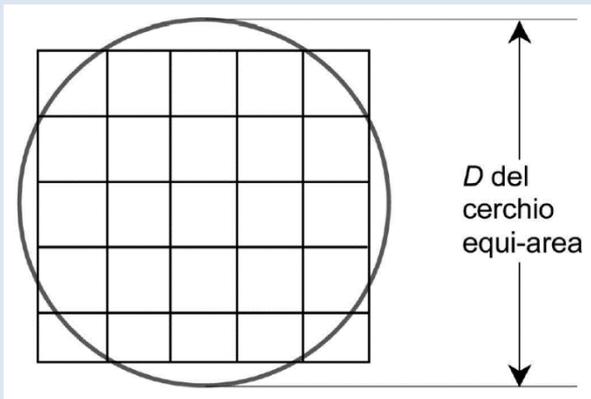
(\*) Anche acciaio non zincato, purché con dimensioni lineari aumentate del 50% e con sezione minima 100 mm<sup>2</sup>.

(\*\*) Dimensioni allo studio.

## FORME DEI "DISPERSORI" DI TERRA

La resistenza di terra  $R_E$  di un dispersore per definizione corrisponde al rapporto tra la tensione totale di terra e la corrente dispersa dall'elettrodo di terra:  $R_E = U_E / I_t$

$R_E$  dipende sia dalla resistività del terreno  $\rho_t$  sia dalle dimensioni e dalla disposizione del dispersore stesso. Come esempi I due casi estremi: il dispersore a maglia (estensivamente usato in stazioni e cabine elettriche) e il dispersore a picchetto usato nelle installazioni di media e bassa tensione.

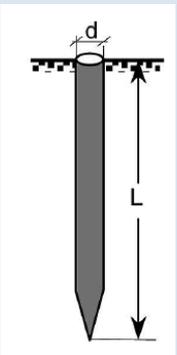


DISPERSORE A MAGLIA  $R_E$  da CEI 11-1 :

$$R_{E_{CEI}} = \frac{\rho_t}{2D} \quad [\Omega]$$

Esempio:  $D=112,8 \text{ m}$  ;  $\rho_t=100 \text{ } \Omega\text{m}$

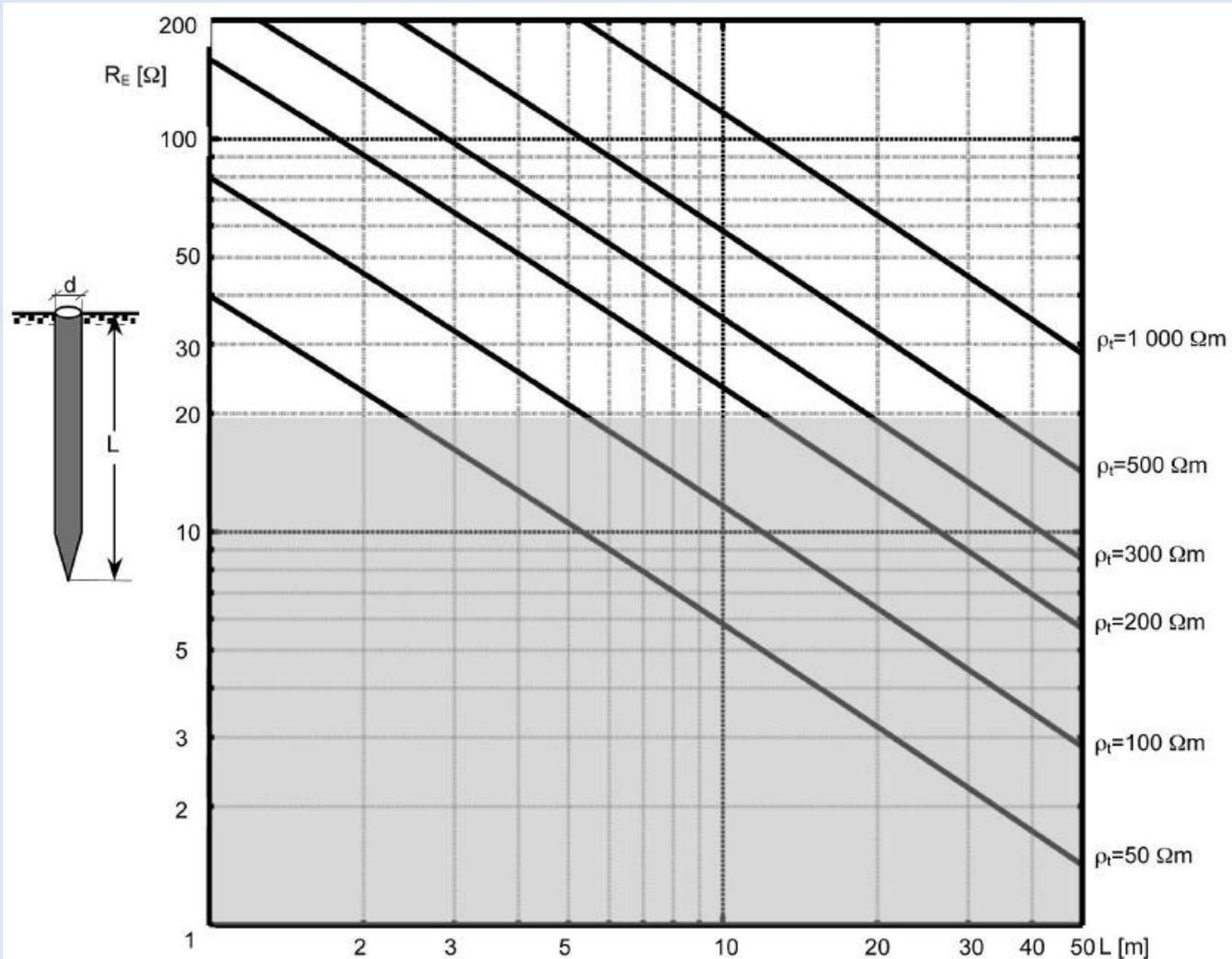
$$R_E = 0,4433$$



DISPERSORE A PICCHETTO  $R_E$  da CEI 11-1

$$R_{E_{CEI}} = \frac{\rho_t}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{4L}{d}\right)$$

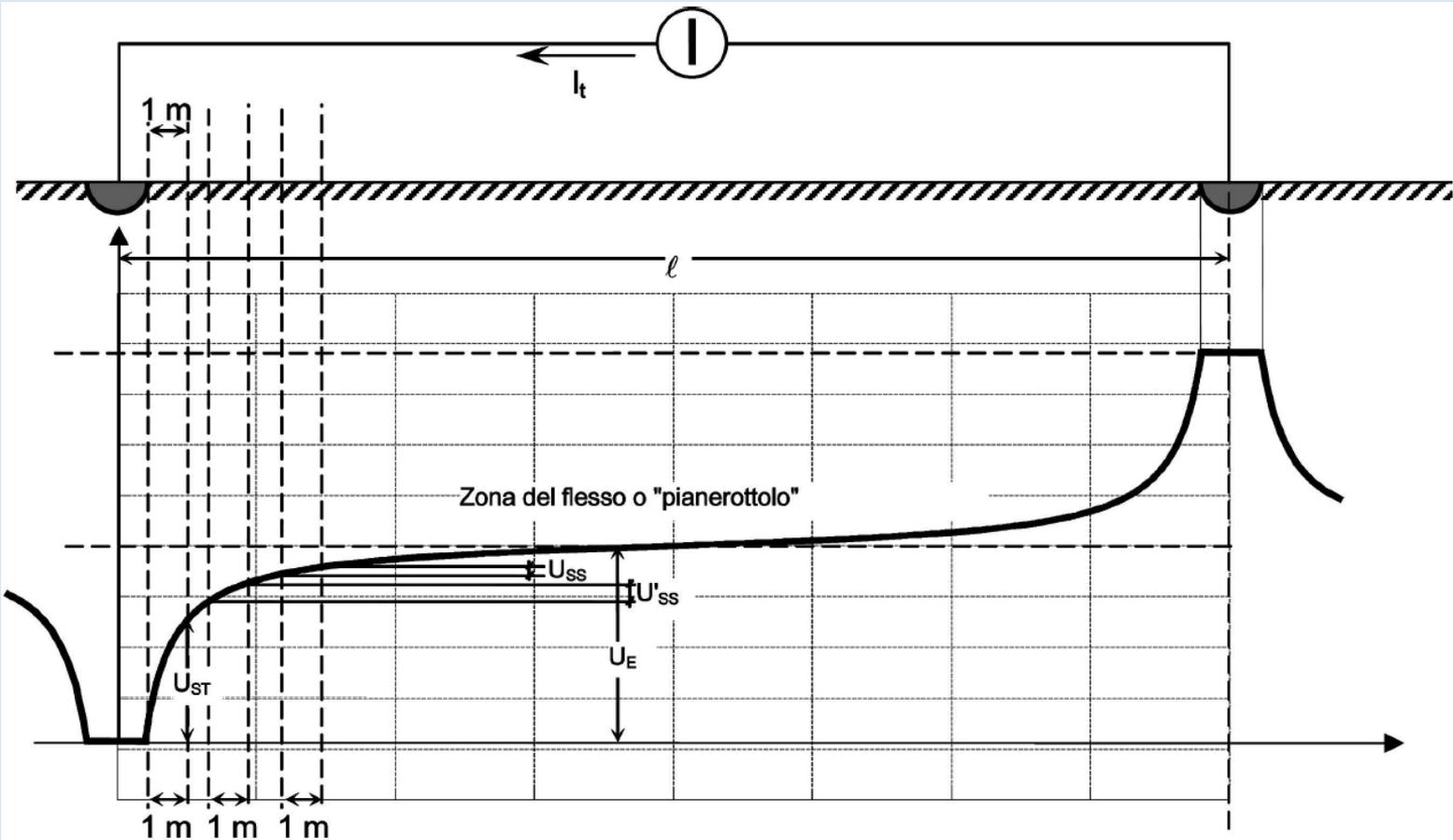
## DISPERSORE A PICCHETTO $R_E$ da CEI 11-1



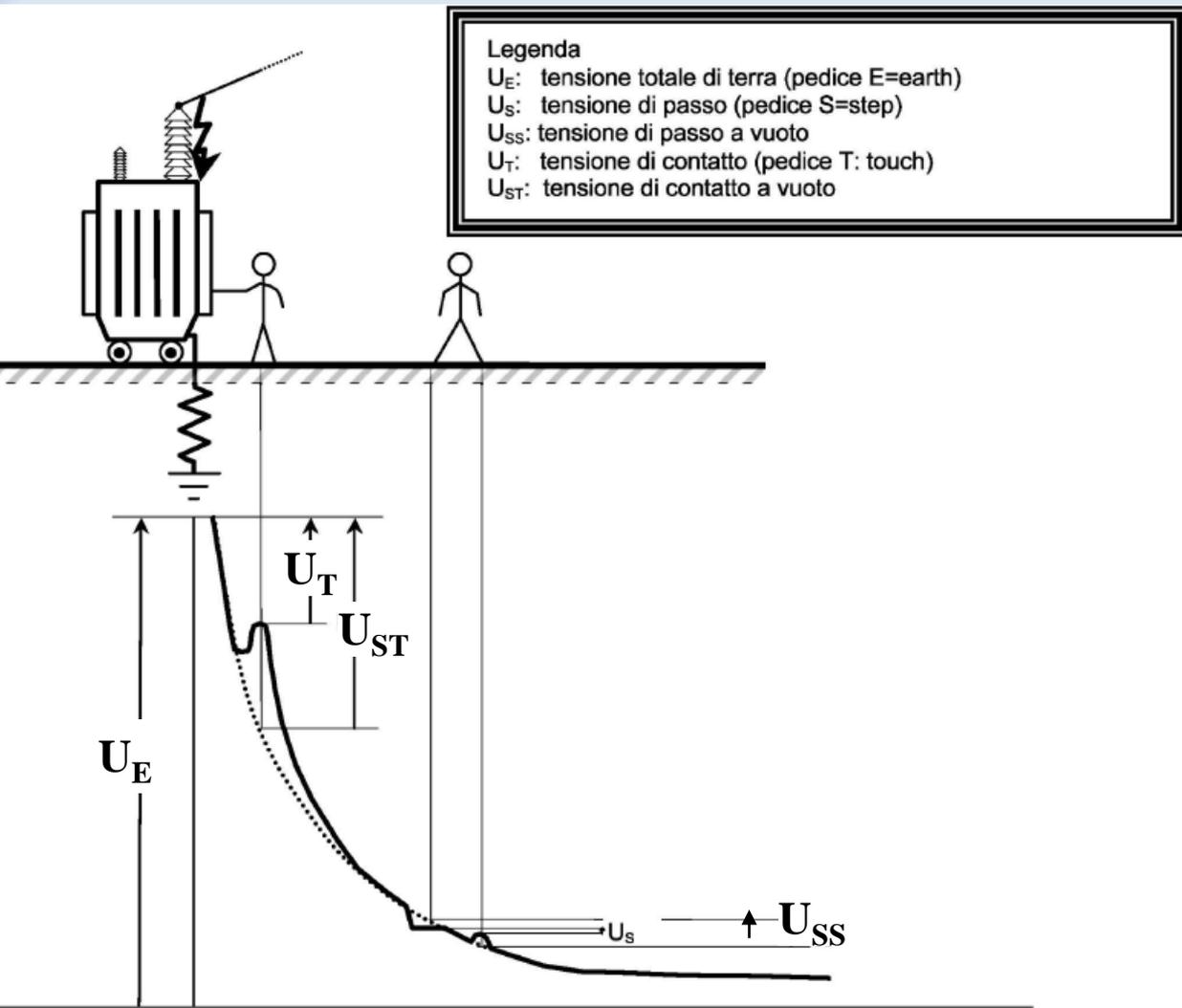
$$R_{E_{CEI}} = \frac{\rho_t}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{4L}{d}\right)$$



## Andamento del potenziale tra due elettrodi emisferici e parametri caratteristici di un dispersore



# Andamento del potenziale tra due elettrodi emisferici e parametri caratteristici di un dispersore



$U_E$ : tensione tra il dispersore e la zona con andamento a pianerottolo. per misurarla, si utilizza un voltmetro e si misura la tensione sul terreno a partire dall'elettrodo disperdente. Quando il valore di tensione si stabilizza allontanandosi ulteriormente dall'elettrodo, secondo una direzione radiale, il valore indicato corrisponde alla  $U_E$

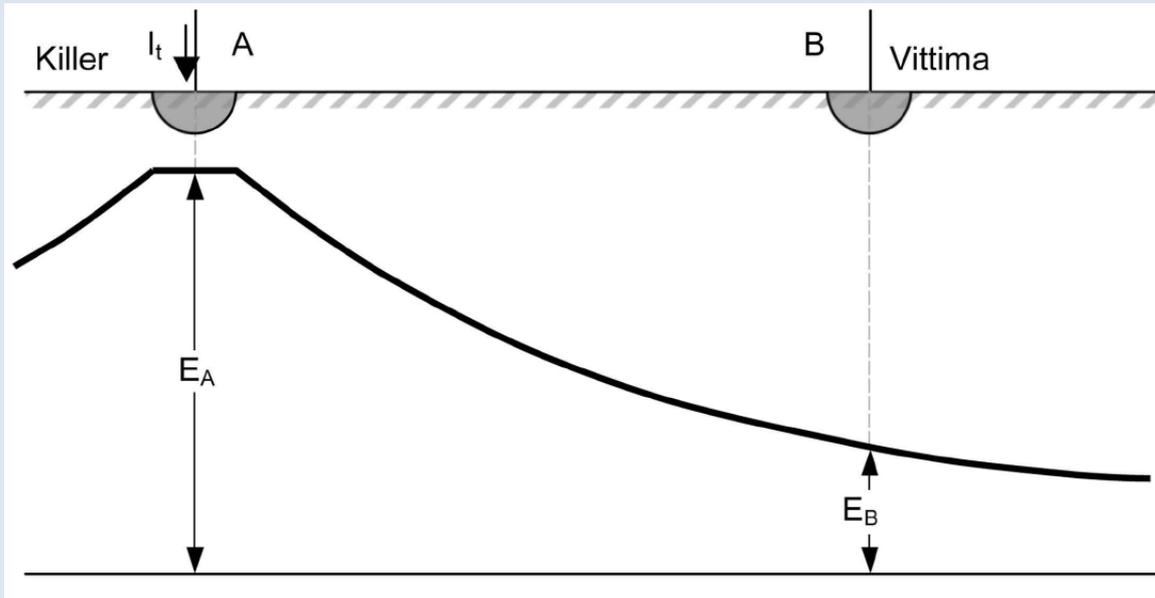
$U_{ST}$ : tensione che si presenta alla distanza di un metro dal dispersore.

$U_T$ : di tensione al quale è sottoposta una persona che accidentalmente tocca il dispersore con le mani e si trova a distanza di un metro con i piedi (percorso mano-piedi)

$U_{SS}$ : la massima differenza di potenziale che si può ottenere tra due punti distanti un metro tra loro. Il valore di questa tensione dipende dalla pendenza della curva dei potenziali.

$U_S$ : rappresenta il valore di tensione al quale è sottoposta una persona con un passo di ampiezza pari a 1 m. Si assume che la corrente fluisca attraverso il corpo umano da piede a piede.

## NECESSITÀ DI UNICITÀ DELL'IMPIANTO DI TERRA E AREA EQUIPOTENZIALE



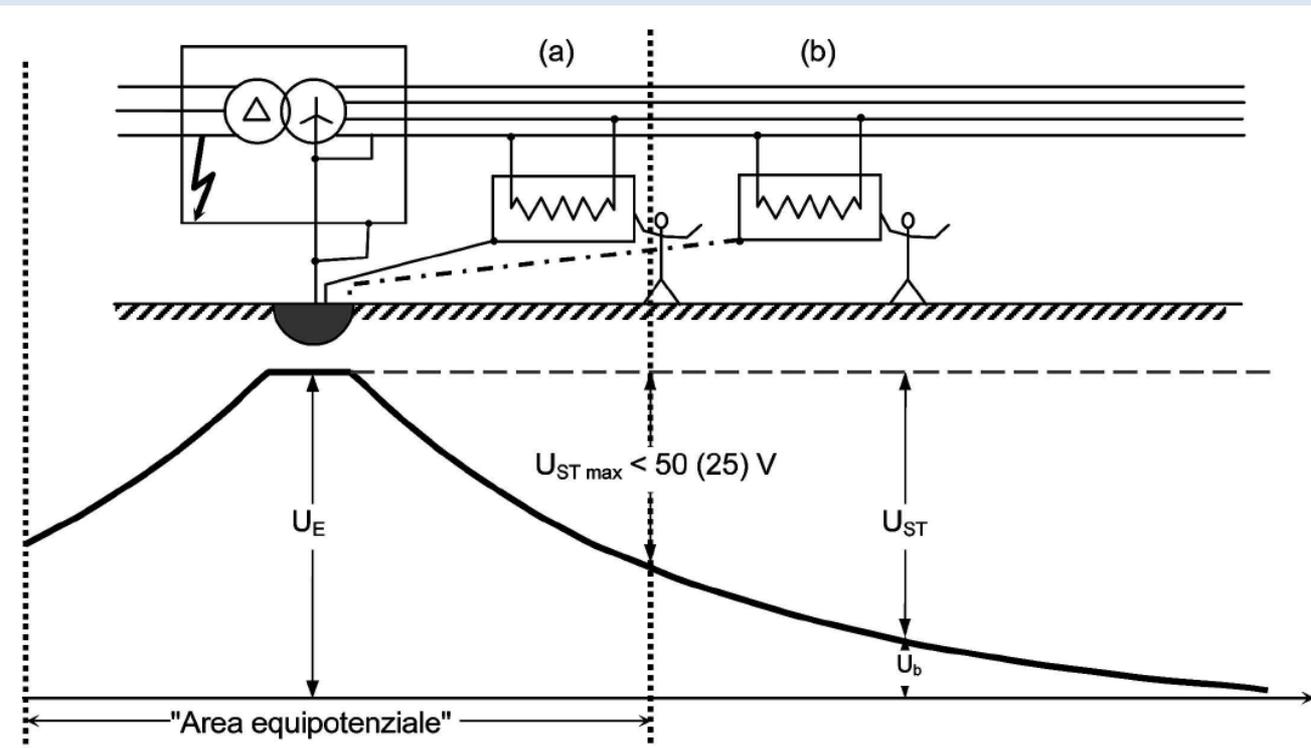
Si considerino i due dispersori A e B della e si supponga che il dispersore A conduca corrente senza che B ne perturbi il campo entro il terreno.

Quando un dispersore A è interessato da una corrente di guasto, la tensione tra il dispersore B e i punti ad esso lontani (infinito) assume un valore che è funzione della distanza tra i due dispersori e della corrente dispersa dal dispersore A. Il dispersore B si porta ad un valore di potenziale verso l'infinito  $E_B$  che è tanto maggiore quanto minore è la distanza tra i due dispersori.

## POSSONO VERIFICARSI DUE SITUAZIONI PERICOLOSE:

1- una massa b) rispetto al dispersore a cui è collegata, si trova al di fuori dell'area di sicurezza dell'impianto di terra ("area equipotenziale") portandosi ad un potenziale pericoloso  $U_{ST}$

2- una massa b) che si porta ad un valore di potenziale pericoloso ( $U_b$  in figura) indotto da un dispersore nelle vicinanze





## **SOLUZIONI PER EVITARE SITUAZIONI PERICOLOSE:**

**Estendere il più possibile l'“area equipotenziale” collegando il dispersore proprio di (b) a quello di (a).**

**Si introduce il concetto fondamentale di impianto di terra globale: esso è realizzato con l'interconnessione di più impianti di terra che assicura, data la vicinanza degli impianti stessi, l'assenza di tensioni di contatto pericolose. Tale impianto permette la ripartizione della corrente di terra in modo da ridurre l'aumento di potenziale di terra negli impianti di terra singoli. Si può dire che tale impianto forma una superficie quasi-equipotenziale.**



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



*Università degli Studi di Padova*  
*Dipartimento di Ingegneria*  
*Industriale*

## **Riferimento bibliografico:**

**R. Benato, L. Fellin: "Impianti Elettrici", Wolters Kluwer, 2014**