

EFFETTI FISIOPATOLOGICI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO

Appunti a cura dell'Ing. Emanuela Pazzola

Tutore del corso di Elettrotecnica per meccanici, chimici e biomedici

A.A. 2005/2006

Facoltà d'Ingegneria dell'Università degli Studi di Cagliari

CAPITOLO 7. EFFETTI FISIOPATOLOGICI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO

7.1 GENERALITÀ	pag.	2
7.2 RESISTENZA DEL CORPO UMANO	pag.	6
7.3 LA CURVA DI SICUREZZA	pag.	8

CAPITOLO 7

EFFETTI FISIOPATOLOGICI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO

7.1 GENERALITÀ

Il passaggio della corrente elettrica attraverso il corpo umano può determinare numerose alterazioni e lesioni, temporanee e permanenti. La corrente elettrica produce un'azione diretta sui vasi sanguigni, sul sangue, sulle cellule nervose (stato di shock); può determinare alterazioni permanenti nel sistema cardiaco, nell'attività cerebrale, nel sistema nervoso centrale, può arrecare danni all'apparato uditivo, a quello visivo, ecc.

Allo scopo di comprendere gli effetti della circolazione di una corrente elettrica nel corpo umano occorre considerare che in condizioni normali la cellula presenta un potenziale negativo all'interno rispetto all'esterno, il cosiddetto *potenziale di riposo*, di entità tutt'altro trascurabile per una particella di tali dimensioni (70 mV nelle cellule nervose dei mammiferi). Dal punto di vista elettrotecnico la membrana cellulare può essere paragonata ad un condensatore, il potenziale d'azione ad una pila, secondo lo schema di fig. 1:

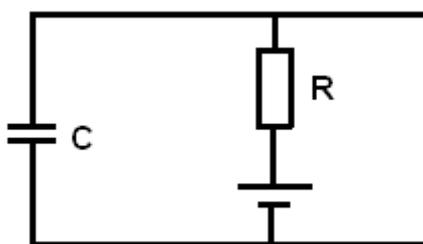


Fig. 1 Schema elettrico equivalente del corpo umano

in cui la resistenza R è inserita per indicare il fatto che la membrana non è perfettamente isolante.

L'applicazione di una differenza di potenziale di durata ed ampiezza opportune determina un'inversione delle polarità del condensatore secondo un andamento oscillante smorzato; l'andamento del potenziale, anche detto *potenziale d'azione*, è rappresentativo dello stato di eccitazione della cellula.

Il minimo impulso di corrente di durata t in grado di stimolare la cellula è espresso dalla seguente relazione:

$$I = \frac{I_0}{1 - e^{-\frac{t}{H}}}$$

In cui I_0 ed H sono costanti caratteristiche della cellula.

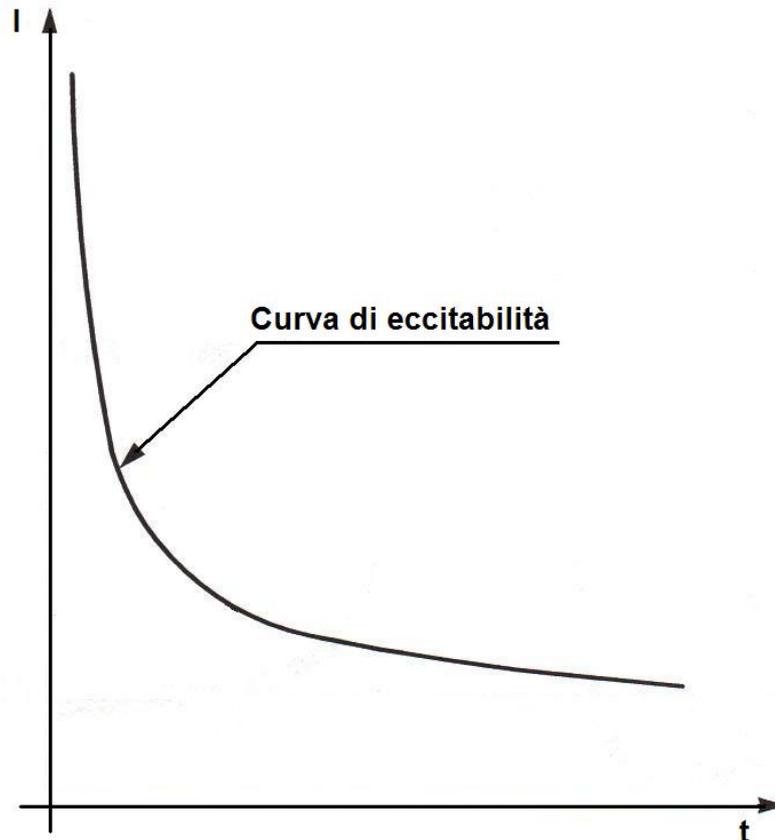


Fig. 2 Rappresentazione grafica del potenziale d'azione

Dall'osservazione della curva del potenziale d'azione (fig. 2) si deduce che l'ampiezza dello stimolo in grado di eccitare la cellula è tanto più grande quanto minore è la sua durata.

Se si considera una corrente alternata come un susseguirsi di impulsi, di durata $1/2f$, si capisce perché una corrente ad alta frequenza sia meno pericolosa rispetto ad una a bassa frequenza. Al crescere della frequenza f infatti aumenta l'intensità dello stimolo necessario per produrre l'eccitamento della cellula; in una corrente ad alta frequenza la durata dello stimolo è talmente breve che la corrente non influisce praticamente sullo stato della cellula.

Il campo di frequenze $50 \div 100$ Hz è quello a cui corrisponde la maggiore pericolosità.

Tuttavia il passaggio della corrente elettrica nel corpo umano ha effetti fisiologici dipendenti non soltanto dalle caratteristiche elettriche della corrente: intensità e frequenza, ma anche dalla sensibilità individuale e dalla zona del corpo in cui il fenomeno ha luogo; la soglia di sensibilità (percezione), cioè il minimo valore di corrente che produce una sensazione è all'incirca 45 μ A, ottenuto con elettrodi appoggiati sulla lingua, l'organo più sensibile alla corrente elettrica, ad 1 cm di distanza. Un po' meno sensibili sono le altre parti del corpo umano, sui polpastrelli delle dita si hanno ad esempio valori di soglia di 0,5 mA.

Gli effetti più frequenti e più importanti che la corrente elettrica produce sul corpo umano sono fondamentalmente quattro:

- Tetanizzazione;
- Arresto della respirazione;
- Fibrillazione ventricolare;
- Ustioni.

Fenomeno della tetanizzazione

Si verifica quando l'impulso cui sono soggette le cellule nervose ha intensità e durata tale da creare un potenziale d'azione, ossia per correnti superiori a 10 mA per le donne ed a 15 mA per gli uomini. In queste condizioni il muscolo, collegato alle stesse fibre nervose, si contrae per poi portarsi alla condizione di riposo; tuttavia se al primo stimolo ne seguono degli altri intervallati in modo tale che fra l'uno e l'altro il muscolo abbia raggiunto la condizione di riposo, gli effetti si sommano e si fondono determinando una contrazione completa del muscolo in questa posizione che perdura fino a che gli stimoli non sono cessati. L'infortunato può non riuscire ad allontanarsi dall'elemento in tensione, il contatto permane nel tempo determinando fenomeni di asfissia, svenimenti e stato di incoscienza. La tetanizzazione è causa del 10 % delle morti per folgorazione.

Arresto della respirazione

Si verifica quando il fenomeno della tetanizzazione interessa i muscoli coinvolti nella respirazione, ossia per correnti superiori a 20÷30 mA, determinando perdita di conoscenza e soffocamento. L'arresto della respirazione è causa del 6% delle morti per folgorazione.

Fibrillazione ventricolare

Gli impulsi elettrici generati dai centri nervosi in condizioni normali costituiscono ordini di azionamento trasmessi al muscolo cardiaco, se altri impulsi elettrici estranei si sovrappongono ai primi, il cuore in mancanza di ordini coordinati si contrarrà in maniera caotica e disordinata determinando il fenomeno della fibrillazione ventricolare, responsabile del 90 % delle morti per folgorazione. Il fenomeno della fibrillazione ventricolare ha luogo per correnti superiori a 70÷100 mA.

Ustioni

Un altro rischio importante collegato all'impiego dell'elettricità è legato alle ustioni, molto frequenti in ambiente domestico e soprattutto industriale. Il passaggio della corrente sul corpo umano è accompagnato da sviluppo di calore per effetto Joule e quindi da un aumento di temperatura in particolare nella parte in cui è avvenuto il contatto con l'elemento disperdente.

Sulla base delle considerazioni su esposte è possibile rappresentare graficamente le zone di pericolosità della corrente alternata attraverso il corpo umano in base alla sua intensità ed al tempo di esposizione (fig. 3).

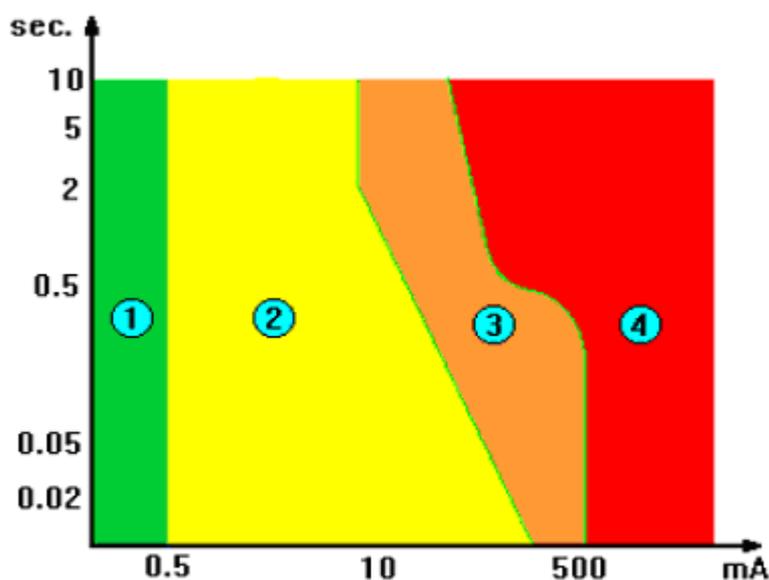


Fig. 3 Zone di pericolosità della corrente alternata di frequenza contenuta nell'intervallo 15÷100 Hz

In cui:

Zona 1: abitualmente nessun effetto;

Zona 2: abitualmente nessun effetto fisiopatologico pericoloso;

Zona 3: abitualmente nessun pericolo di fibrillazione cardiaca;

Zona 4: pericolo di possibile fibrillazione cardiaca (probabilità fino al 50%);

Occorre precisare che l'effetto della corrente continua DC sul corpo umano è differente da quello della corrente alternata AC. Infatti la corrente continua, al contrario della corrente alternata, non risente dell'effetto pelle (crescente con la frequenza), ciò comporta immancabilmente una maggiore compromissione dei tessuti interni, compresi quelli degli organi vitali.

D'altro canto però il corpo umano riporta meno danni, a parità di intensità, al passaggio della corrente continua piuttosto che a quello della corrente alternata LF (Light Frequency). Ciò in quanto le correnti pulsanti a 50 Hz risultano particolarmente dannose per il sistema nervoso (provocano la tetanizzazione dei muscoli), mentre la corrente continua ha prevalentemente un effetto di riscaldamento resistivo dei tessuti.

Un fattore rilevante nella valutazione della pericolosità della corrente elettrica è il percorso che la corrente effettua nel corpo umano, da esso dipende infatti la direzione del campo elettrico che agisce sul cuore e di conseguenza la probabilità di innesco della fibrillazione ventricolare. Il percorso più pericoloso nei confronti della fibrillazione ventricolare è quello mano sinistra - mano destra.

7.2 RESISTENZA DEL CORPO UMANO

La valutazione della resistenza che il corpo umano oppone al passaggio della corrente deve inevitabilmente tener conto delle variabili da cui essa dipende, in particolare della tensione, superficie, pressione e durata del contatto, dello stato della pelle e del percorso della corrente.

Segue una breve descrizione dei parametri sopra citati.

Tensione di contatto

Si è visto sperimentalmente che, all'aumentare della tensione applicata al corpo umano, la resistenza della pelle diminuisce, fino a diventare trascurabile per

tensioni superiori a circa 100 V, come mostra il seguente diagramma resistenza–tensione.

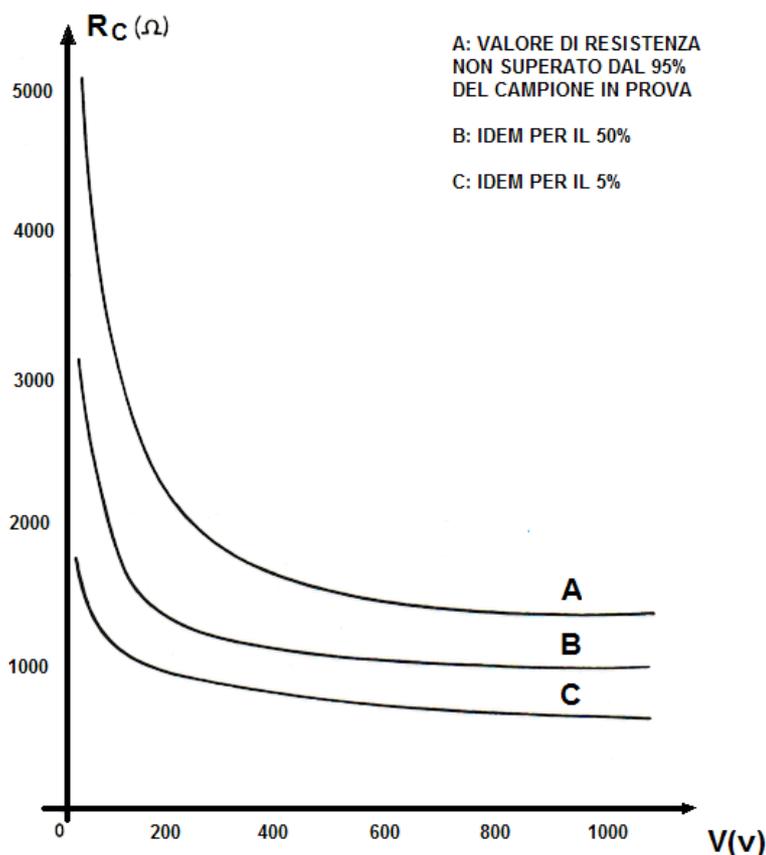


Fig. 4 Limite di pericolosità della tensione applicata al corpo umano

Stato della pelle

La sudorazione, la presenza di umidità o di ferite in corrispondenza del contatto determina una riduzione della resistenza della pelle, avviene il contrario invece se nella zona di contatto la pelle è indurita, ad esempio per la presenza di calli.

Superficie di contatto

All'aumentare della superficie di contatto diminuisce la resistenza della pelle, ciò potrebbe accadere, ad esempio, alla persona che operi distesa all'interno di una caldaia o di una tubazione soggetta a dispersioni.

Pressione di contatto

Ad una maggiore pressione di contatto corrisponde una minore resistenza, è questo il caso degli apparecchi portatili, saldamente sorretti e guidati durante l'uso dell'operatore, i muscoli della mano contratti sono inoltre più esposti al

fenomeno della tetanizzazione (per tale motivo la normativa CEI vigente richiede che apparecchi di tale tipo siano di classe 2, ossia con doppio isolamento).

Durata del contatto

Con il prolungarsi del contatto, diminuisce la resistenza della pelle, tuttavia, se la quantità di calore sviluppata è tale da carbonizzare la pelle, la resistenza può risalire a valori molto elevati.

Percorso della corrente

La fig. 3 è stata ottenuta considerando un percorso ipotetico che va dalla mano sinistra ai piedi. Per dedurre gli effetti equivalenti (soprattutto in termini di probabilità di fibrillazione ventricolare) che una stessa corrente I , a parità di tempo di esposizione, avrebbe in caso di percorsi differenti attraverso il corpo del soggetto interessato, viene definito un fattore di percorso F tale che $I_{eq}=I/F$.

Qui di seguito sono indicati alcuni dei valori attribuiti al fattore di percorso F :

- Mano sinistra-mano destra $F=0,4$;
- Mano destra-piedi $F=0,8$;
- Schiena - mano destra $F=0,3$;
- Schiena - mano sinistra $F=0,7$;
- Torace - mano destra $F= 1,3$
- Torace – mano sinistra $F= 1,5$
- Glutei – mani $F=0,7$

Si deduce che i casi più pericolosi si hanno in caso di corrente fluente fra mano destra e mano sinistra o fra mano destra e schiena. Viceversa se uno dei due poli di ingresso/uscita della corrente è il torace, la pericolosità si riduce pericolosamente.

7.3 LA CURVA DI SICUREZZA

Si assume come **curva di sicurezza corrente/tempo** la curva tratteggiata di (fig. 5), intermedia fra la curva b , al di sopra della quale si ha lo shock elettrico, e la curva c_1 che individua i limiti della fibrillazione ventricolare .

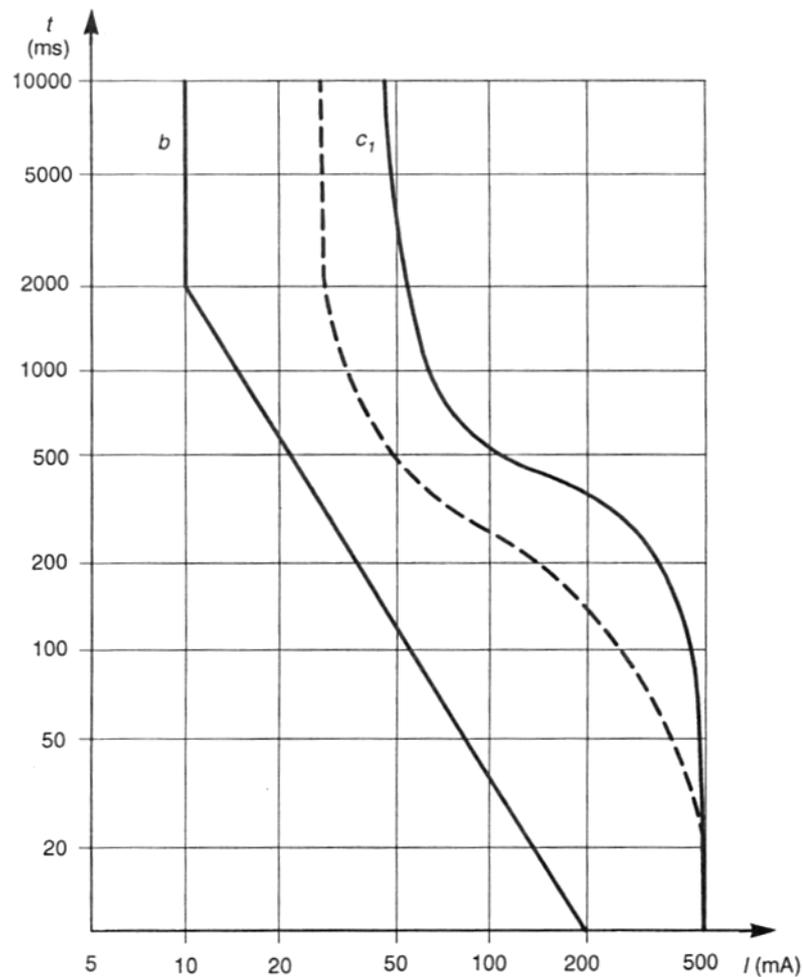


Fig. 5 La curva tratteggiata indica la curva di sicurezza corrente- tempo assunta in sede normativa internazionale.

Tuttavia, in pratica ci si riferisce, più che ai limiti di corrente pericolosa, ai limiti di tensione pericolosa. Gli uni e gli altri sono legati dalla legge di Ohm per il tramite della serie della resistenza R_B del corpo umano e della resistenza della persona verso terra R_{EB} .

Nel ricavare la **curva di sicurezza tensione – tempo** (fig. 6) ci si riferisce prudenzialmente al percorso mani-piedi di una persona che afferra con entrambe le mani un apparecchio elettrico ed ha i due piedi nel suolo. In serie alla resistenza del corpo umano si assume una resistenza R_{EB} di 1000 Ω in condizioni ordinarie (interno degli edifici) e di 200 Ω in condizioni particolari (all'aperto).

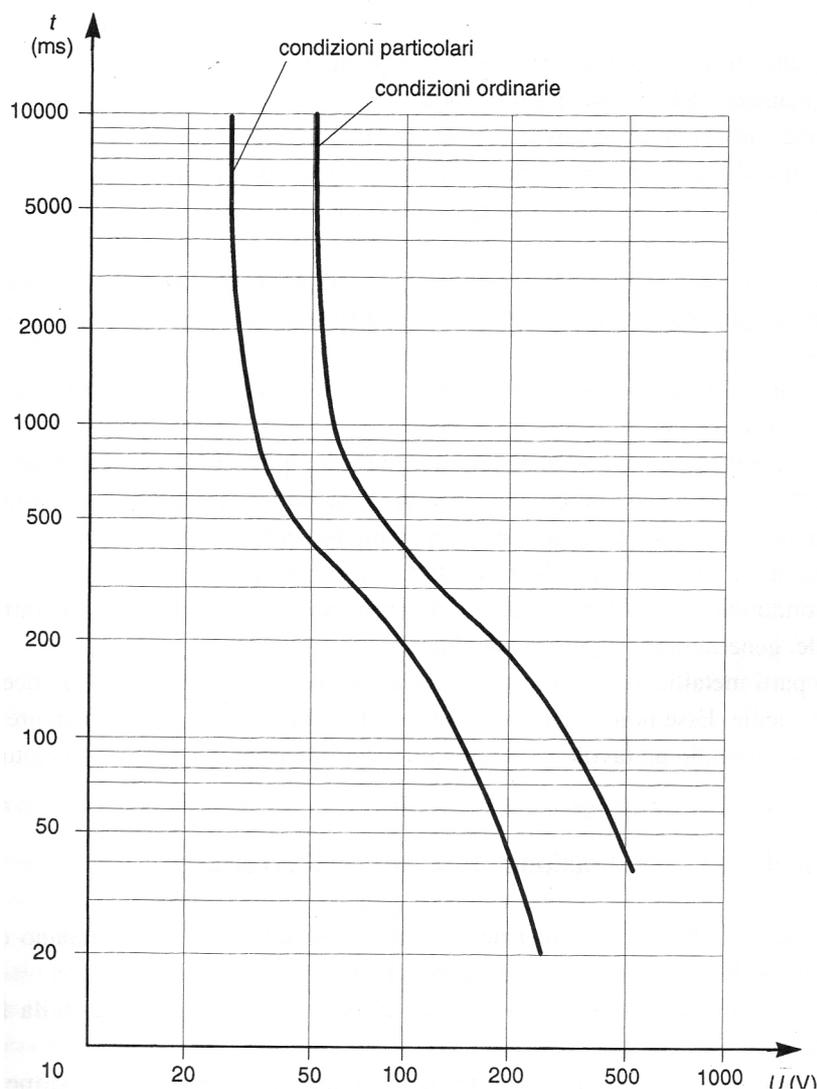


Fig. 6 Curva di sicurezza tensione-tempo in condizioni ambientali ordinarie e particolari

Dalla fig. 6 si deduce che la massima tensione sopportabile dal corpo umano indefinitamente (in pratica 5 s) è pari a 50 V in condizioni ambientali normali ed a 25 V all'aperto. Il valore di tensione così definito prende il nome di tensione di contatto limite convenzionale U_L . Nel caso di corrente continua, i valori della tensione di contatto limite convenzionale sono rispettivamente pari a 120 V per le condizioni ordinarie e 60 V per quelle particolari.

È sulla base di queste considerazioni che le Norme pongono un limite al livello di tensione sopportabile senza che intervenga qualche altra forma di protezione (CEI 64-8).

Tale valore è il risultato di un compromesso tra la limitazione della probabilità di danno alle persone ed i limiti tecnologici delle apparecchiature elettriche di interruzione.