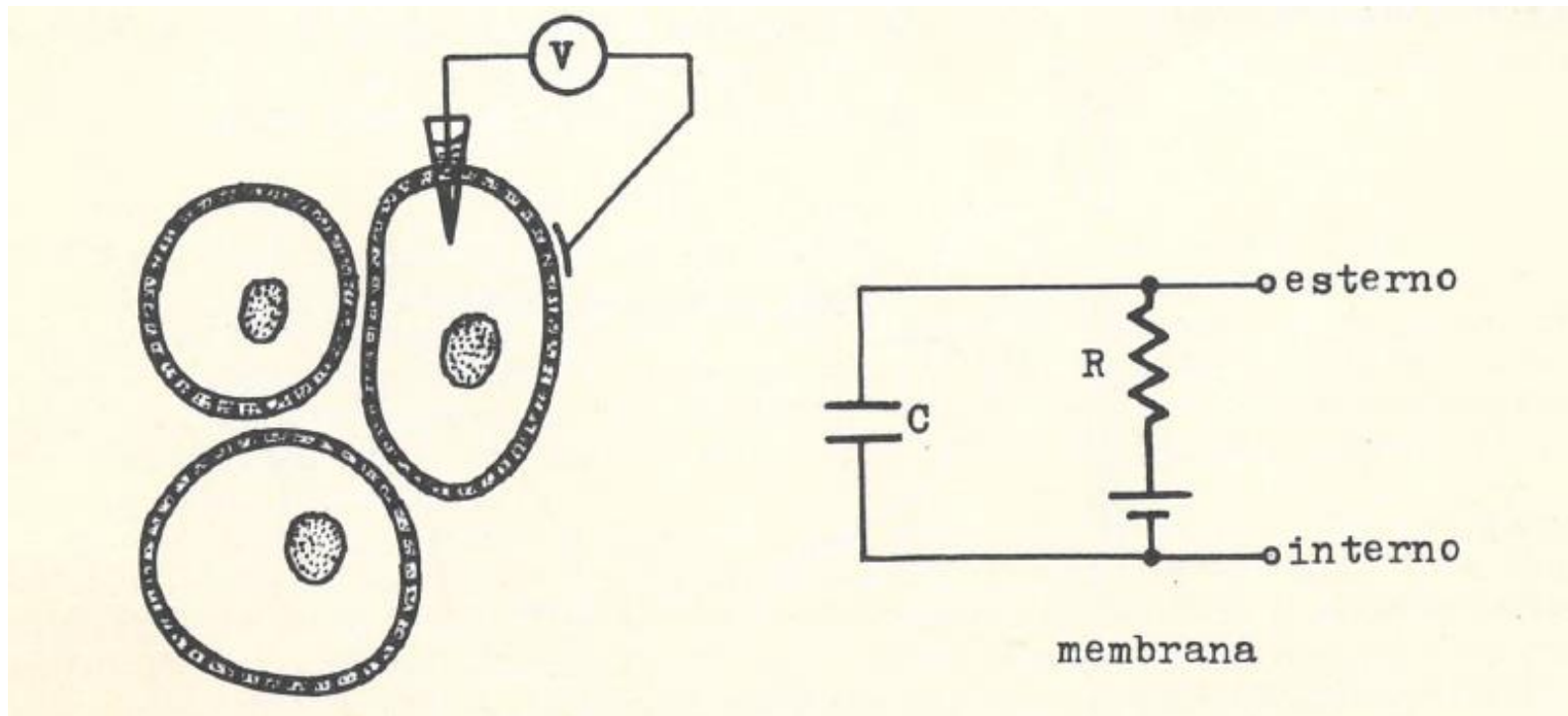
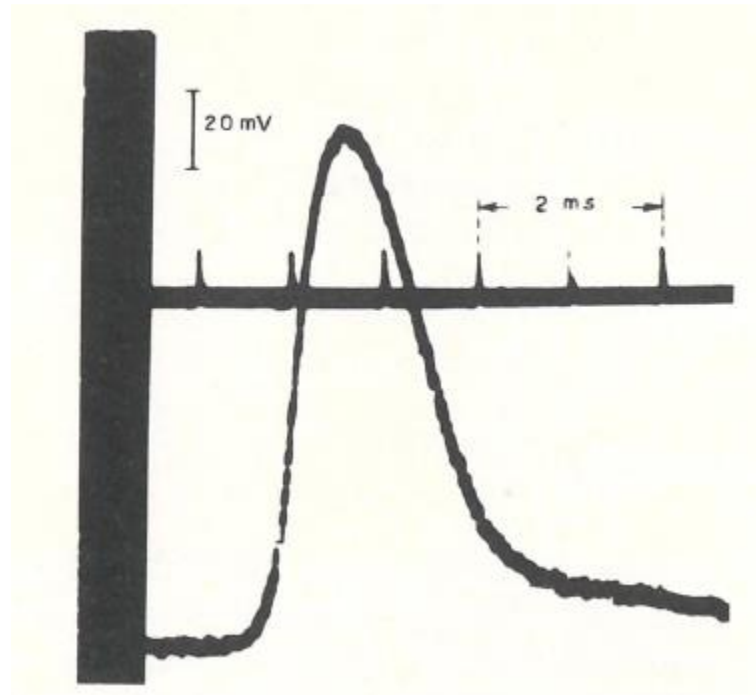


# ELETTRICITA' E FISIOLOGIA

A cavallo della membrana cellulare si può misurare un potenziale da 70 a 100 mV detto «potenziale di riposo».



Se la cellula viene stimolata il potenziale diventa da negativo a positivo.



Il potenziale che accompagna lo stato di attività della cellula prende il nome di « potenziale d'azione ».

Lo stimolo può essere costituito da agenti di natura meccanica, chimica, termica, ecc. ma lo stimolo più noto è costituito dall'elettricità. Le correnti elettriche modificano la distribuzione delle cariche elettriche dentro e fuori la cellula, determinando una alterazione del potenziale di riposo.

Perché l'impulso elettrico, e più in generale lo stimolo, sia capace di eccitare la cellula occorre che abbia un'intensità sufficiente in relazione al tempo per cui permane (fig. I-3).

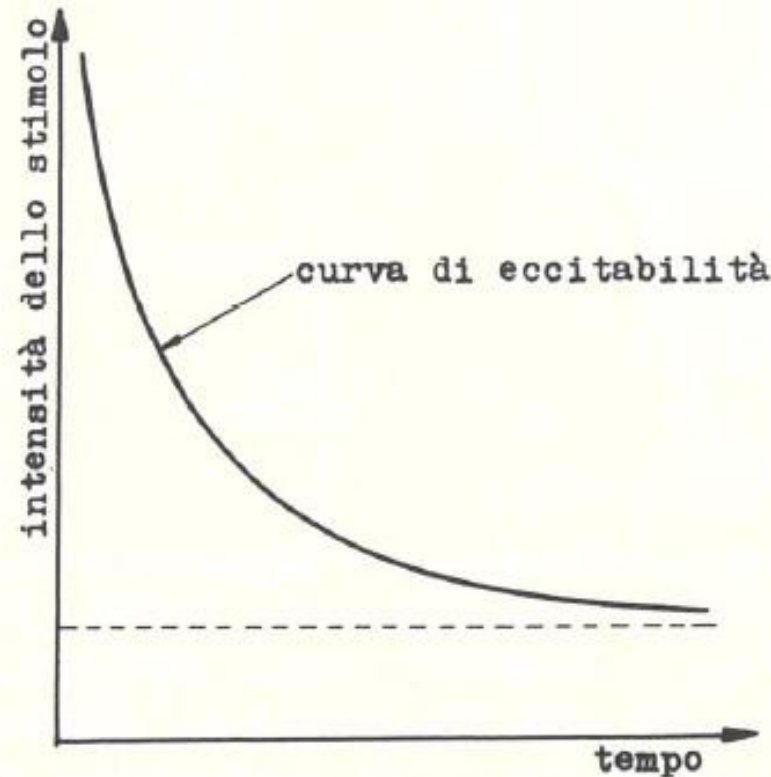


FIG. I-3. - Lo stimolo per eccitare la cellula deve avere intensità appropriata alla durata. La curva di eccitabilità è una iperbole equilatera.

All'attività elettrica fisiologica fa riscontro nel corpo umano un campo elettrico variabile con le funzioni vitali: le variazioni di potenziale vengono trasmesse ai tessuti circostanti la zona eccitata, si diffondono attraverso il mezzo conduttore e sono misurabili anche all'esterno, tramite due elettrodi appoggiati sulla pelle tra punti diversi del corpo. Se tali tensioni vengono registrate si ottiene un tracciato caratteristico dell'attività in considerazione, ad esempio del cuore (elettrocardiogramma), dei muscoli in funzione (elettromiogramma), della retina eccitata da un raggio di luce (retinogramma), delle cellule della corteccia cerebrale (elettroencefalogramma), ecc.

Il minimo valore di corrente che produce una sensazione, cioè la soglia di sensibilità per il corpo umano, è all'incirca  $45 \mu\text{A}$ . Tale valore è stato ottenuto, come valore medio, su cento uomini, per mezzo di due elettrodi di platino appoggiati sulla lingua ad un centimetro di distanza (2).

Meno sensibili sono le altre parti del corpo umano; per le mani in particolare si hanno valori di soglia di un millesimo di ampere, per la corrente alternata, e 5 millesimi di ampere per la corrente continua. Le donne sono in genere più sensibili degli uomini: i valori limite per le donne possono essere assunti pari a due terzi di quelli corrispondenti agli uomini.

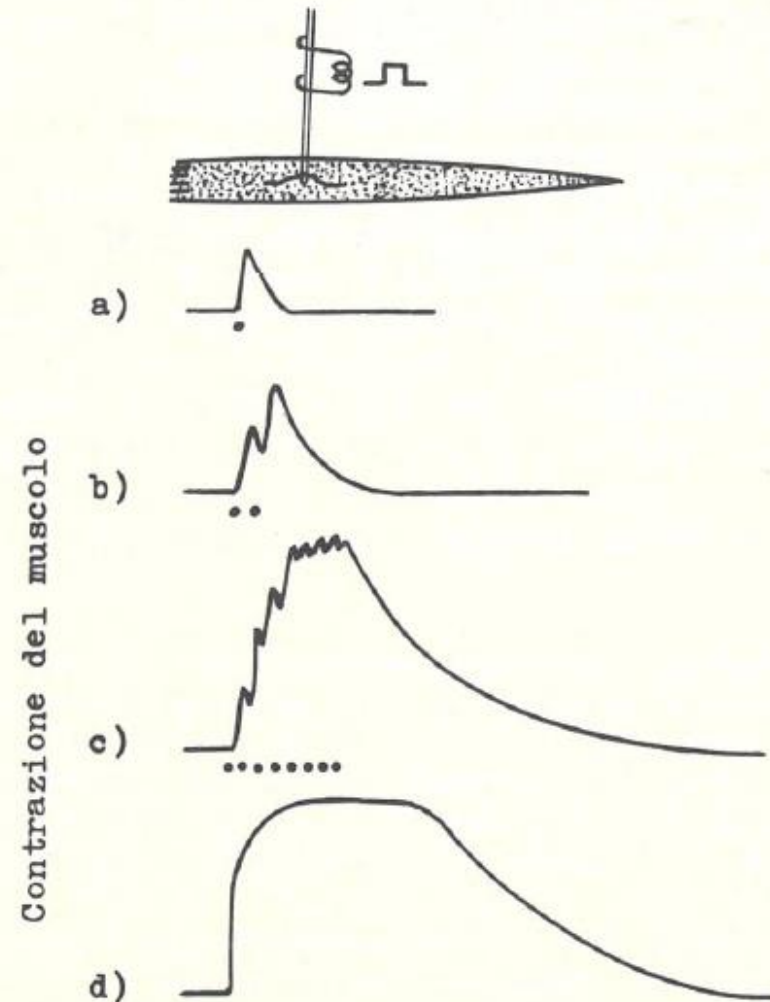
Gli effetti principali che la corrente elettrica produce sul corpo umano sono fondamentalmente quattro:

- tetanizzazione;
- arresto della respirazione;
- fibrillazione cardiaca;
- ustioni.

## 1.2. - La tetanizzazione.

Un impulso elettrico può produrre la contrazione del muscolo: questo fu il risultato spettacolare della esperienza di Galvani che produsse la contrazione del muscolo di rana con la piccola differenza di potenziale che si stabilisce al contatto tra due metalli diversi (ad es. zinco e rame).

In figura I-4 lo stimolo elettrico è applicato ad una fibra nervosa; se lo stimolo ha intensità e durata appropriate, produce un potenziale d'azione che si



Il più elevato valore di corrente per cui il soggetto è ancora capace di lasciare la presa della parte in tensione con la quale è in contatto prende il nome di « *corrente di rilascio* ». Questo valore, variabile da persona a persona, è minore per le donne e i bambini e per le persone di basso peso corporeo che sono in genere più sensibili alla corrente elettrica.

Da esperienze condotte su un gruppo di 134 uomini e 28 donne, sono risultate correnti medie di rilascio di 16 mA e 10 mA rispettivamente (valori efficaci). In corrente continua i valori limite salgono a 76 mA per gli uomini e a 51 mA per le donne (Dalziel).

### 1.3. - L'arresto della respirazione.

Correnti che superino i limiti sopra indicati per la corrente di rilascio producono nell'infortunato segni di asfissia: il passaggio della corrente determina una contrazione dei muscoli addetti alla respirazione o una paralisi dei centri nervosi che sovrintendono alla funzione respiratoria; se la corrente



perdura, l'infortunato perde conoscenza e muore soffocato. Di qui l'importanza della respirazione artificiale (respirazione bocca a bocca), della tempestività con la quale è applicata e della durata per cui è praticata. E' necessario soprattutto intervenire immediatamente dopo l'infortunio, entro 3 ÷ 4 minuti al massimo, per evitare l'asfissia dell'infortunato o lesioni irreversibili ai tessuti cerebrali.

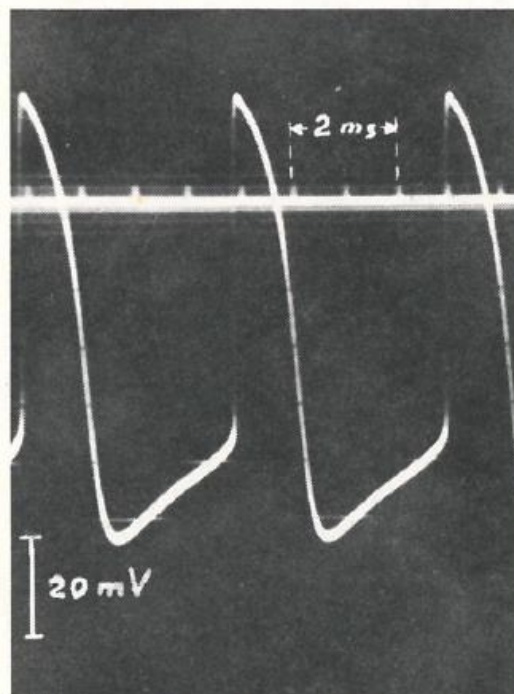
La fotografia I-5 è stata scattata da un fotografo nel corso della drammatica operazione di salvataggio di un operaio rimasto folgorato. Da notare la tempestività con la quale il compagno di lavoro ha praticato la respirazione bocca a bocca, che ha salvato l'infortunato, senza perdere del tempo prezioso nel liberare il corpo penzolante dal palo.

#### 1.4. - La fibrillazione ventricolare.

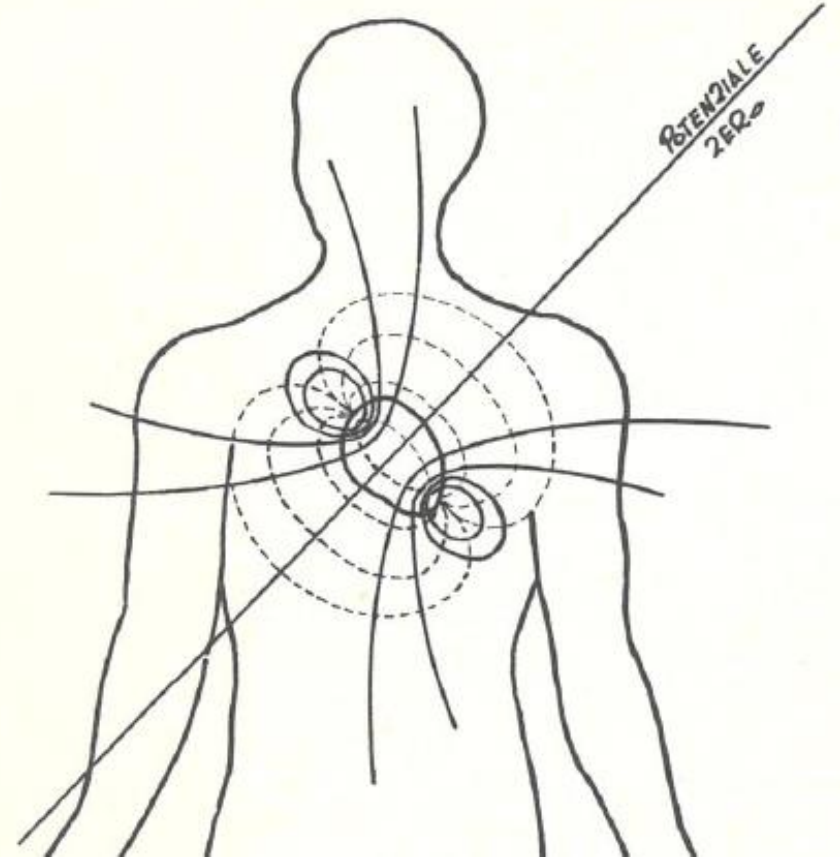
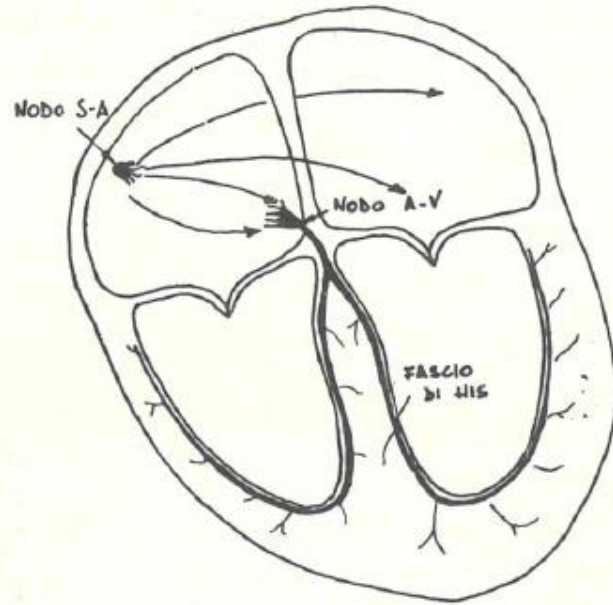
Per meglio intendere il modo con il quale la corrente elettrica agisce sul cuore è opportuno richiamare alcune nozioni sulla attività elettrica cardiaca.

Come è noto il muscolo cardiaco (miocardio) si contrae ritmicamente  $60 \div 100$  volte al minuto e sostiene, al pari di una pompa, la circolazione sanguigna nei vasi. La contrazione delle fibre muscolari è prodotta da impulsi elettrici provenienti da un particolare centro — il nodo senoatriale — posto nella parte superiore dell'atrio destro. E' questo un vero e proprio generatore biologico di impulsi elettrici che comandano il cuore. In figura I-6 l'oscilloscopio ha registrato i potenziali d'azione emessi dal nodo senoatriale nel cuore di un coniglio.

Tramite il tessuto specifico di conduzione (fascio di His, fibre di Purkinje) gli impulsi di comando provenienti dal nodo seno-atriale vengono trasmessi al



muscolo cardiaco. L'impulso raggiunge quindi il nodo atrio-ventricolare dal quale si diparte il fascio di His che conduce lo stimolo alle fibre muscolari dei ventricoli; questi si contraggono e producono così la sistole ventricolare che spinge il sangue nel sistema arterioso (fig. I-7).



## 1.5. - Le ustioni.

Il passaggio di corrente elettrica su una resistenza è accompagnato dallo sviluppo di calore per effetto Joule. Il corpo umano non fa eccezione a questa regola generale. Lo sviluppo di calore è particolarmente accentuato nei punti di entrata e di uscita della corrente, perché:

- la pelle presenta un'elevata resistenza elettrica, mentre i tessuti interni sono in confronto buoni conduttori;
- la resistenza di contatto tra pelle e parte in tensione va a sommarsi alla resistenza della pelle (a volte si formano addirittura dei piccoli archi);
- la densità di corrente è maggiore nei punti di entrata e di uscita della corrente specie se l'area di contatto è piccola (6).

Le ustioni prodotte sono tanto più gravi quanto maggiore è la densità di corrente e quanto più lungo è il tempo per il quale la corrente permane. Alle alte tensioni gli effetti termici della corrente sono predominanti, lo sviluppo di calore provoca estese distruzioni di tessuti superficiali e profondi, la rottura di arterie con conseguenti emorragie, la distruzione di centri nervosi, ecc. Le ustioni da folgorazione sono le più profonde e le più difficili da guarire. Spesso la morte sopravviene per insufficienza renale.

Oltre che dal passaggio diretto di corrente attraverso il corpo umano le ustioni possono essere provocate da fiammate ed archi con spruzzi di metallo rovente.



FIG. I-11. - Ustioni dovute al passaggio di corrente in un sistema a 15 kV.

## 1.7. - La curva di sicurezza.

Un valore di corrente è più o meno pericoloso dipendentemente dal tempo per il quale permane nel corpo umano. La curva di sicurezza tende a stabilire per ogni valore di corrente il tempo al di sotto del quale quel valore di corrente non è da considerarsi pericoloso, o viceversa, per ogni intervallo di tempo il valore massimo di corrente tollerabile per il corpo umano.

E' questo un compito non facile. Non solo per l'incertezza dei dati sperimentali ma anche perché occorre considerare dei valori mediamente non pericolosi, procedendo su base probabilistica. Sfortunatamente esistono uomini, e ancor più donne e bambini, che non rientrano nella media. Questo problema sorge d'altronde ogni qual volta si voglia stabilire un livello di sicurezza, di pericolosità o di sopportabilità. Il necessario compromesso tra sicurezza ed economia scaturisce, ovviamente, dai lavori delle Commissioni e Comitati di Esperti Nazionali ed Internazionali (7).

Le differenti zone di pericolosità della corrente elettrica illustrate in figura I-13 sono state indicate dalla IEC per uomini di 50 kg di peso e per tragitto della corrente tra le estremità (mano-mano; mani-piedi) (8). La curva tra

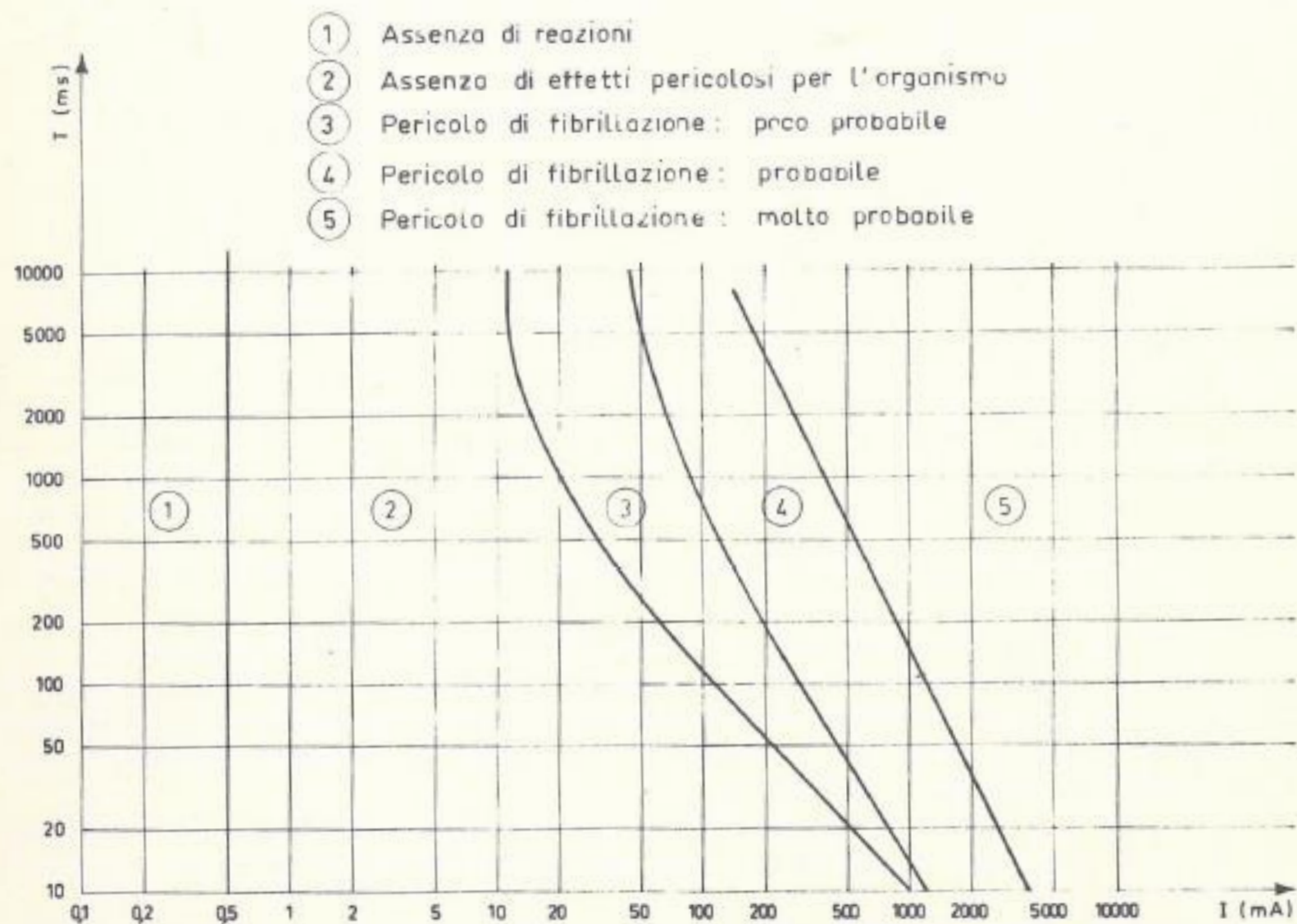
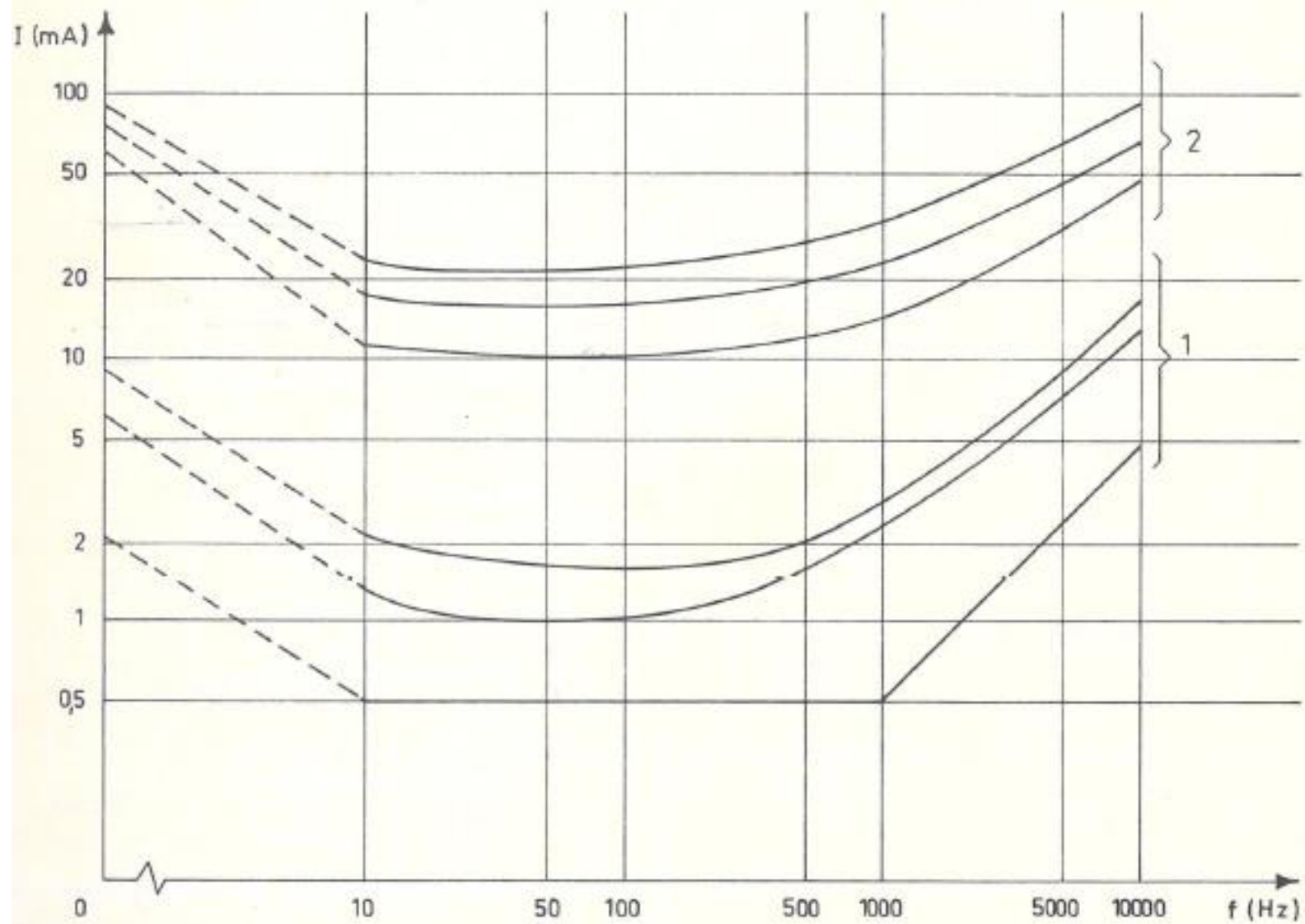


FIG. I-13. - Zone di pericolosità della corrente elettrica a 50 Hz. All'interno di ciascuna zona gli effetti non sono identici ma aumentano con l'intensità di corrente senza discontinuità tra zone contigue.



- 1 Soglia di percezione
- 2 Soglia di tetanizzazione

### 1.11. - La resistenza elettrica del corpo umano.

Il corpo umano è un'insieme eterogeneo di liquidi e tessuti organici di resistività variabile: le maggiori resistività si riscontrano nella cute, nel tessuto osseo e nel tessuto adiposo.

Dal punto di vista elettrico il corpo umano può essere rappresentato con una complessa rete di resistenze variamente collegate in serie e in parallelo, alle quali bisognerebbe aggiungere, alle alte frequenze, capacità e induttanze. La corrente si ripartisce all'interno del corpo secondo i principi di Kirchhoff, defluendo dal « nodo » di ingresso e confluendo in quello di uscita.

La resistenza elettrica del corpo non è costante, ma varia da soggetto a soggetto e nella stessa persona muta con le condizioni fisiologiche e ambientali.

Le principali variabili che influiscono sul valore della resistenza elettrica del corpo umano sono le seguenti:

#### a) *Stato della pelle*

La maggior parte della resistenza del corpo è concentrata nella pelle, nei punti di entrata e di uscita della corrente. L'umidità diminuisce la resistenza della pelle. Il sudore, soluzione conduttrice di cloruro di sodio e di altri sali, peggiora ancor più la situazione.

Se il contatto con la parte in tensione avviene in un punto dove la pelle in qualche modo è tagliata, ferita o contusa, la resistenza del corpo cade a valori bassissimi; se viceversa nella zona di contatto la pelle è indurita, ad esempio dalla presenza di calli, lo spesso strato di pelle contribuisce ad aumentare la resistenza, a favore della sicurezza.

b) *Tipo di contatto (mano-mano, mani-piedi)*

I valori più bassi di resistenza si hanno nei contatti diversi da quelli comuni: mano-mano, mani-piedi. Il contatto sulla fronte sembra ad esempio essere il più sfavorevole. Il tragitto della corrente e quindi la sua pericolosità è naturalmente in diretta relazione con la posizione degli elettrodi.

c) *Superficie di contatto*

All'aumentare dell'area di contatto con la parte in tensione diminuisce la resistenza del corpo. Ciò accade ad esempio alla persona che operi all'interno di una caldaia o di una tubazione; in tal caso l'ampia superficie di contatto ed i punti più imprevedibili di entrata e di uscita della corrente, rendono la persona estremamente vulnerabile.

d) *Pressione di contatto*

Ad una maggior pressione di contatto corrisponde una minor resistenza. E' il caso degli apparecchi portatili, saldamente sorretti e guidati durante l'uso dall'operatore. I muscoli della mano contratti nello sforzo sono inoltre maggiormente esposti al pericolo di tetanizzazione.

e) *Durata del contatto*

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

f) *Natura della corrente*

I valori di resistenza del corpo umano misurati in corrente continua e a frequenza industriale sono pressappoco gli stessi. Alle alte frequenze la resistenza, o più esattamente l'impedenza, diminuisce invece notevolmente.

g) *Tasso di alcool nel sangue*

Una notizia poco piacevole per i bevitori: oltre a tutte le malattie e pericoli cui gli alcoolizzati sono esposti, essi hanno anche maggiori probabilità di rimanere folgorati: infatti un elevato tasso di alcool nel sangue diminuisce la resistenza elettrica (... e non solo fisica!) del corpo.

h) *Tensione di contatto*

La resistenza del corpo diminuisce all'aumentare della tensione applicata, riscontrandosi le variazioni maggiori ai livelli più bassi di tensione.

La resistenza del corpo umano è una grandezza estremamente variabile; sono stati indicati sopra alcuni tra i parametri più importanti ed evidenti, ma la resistenza elettrica è intimamente connessa con l'intero complesso dell'attività biologica nel corpo umano. La figura I-20 indica, ad esempio, le variazioni di resistenza elettrica registrate in una persona prima, durante e dopo un periodo di intensa concentrazione mentale.

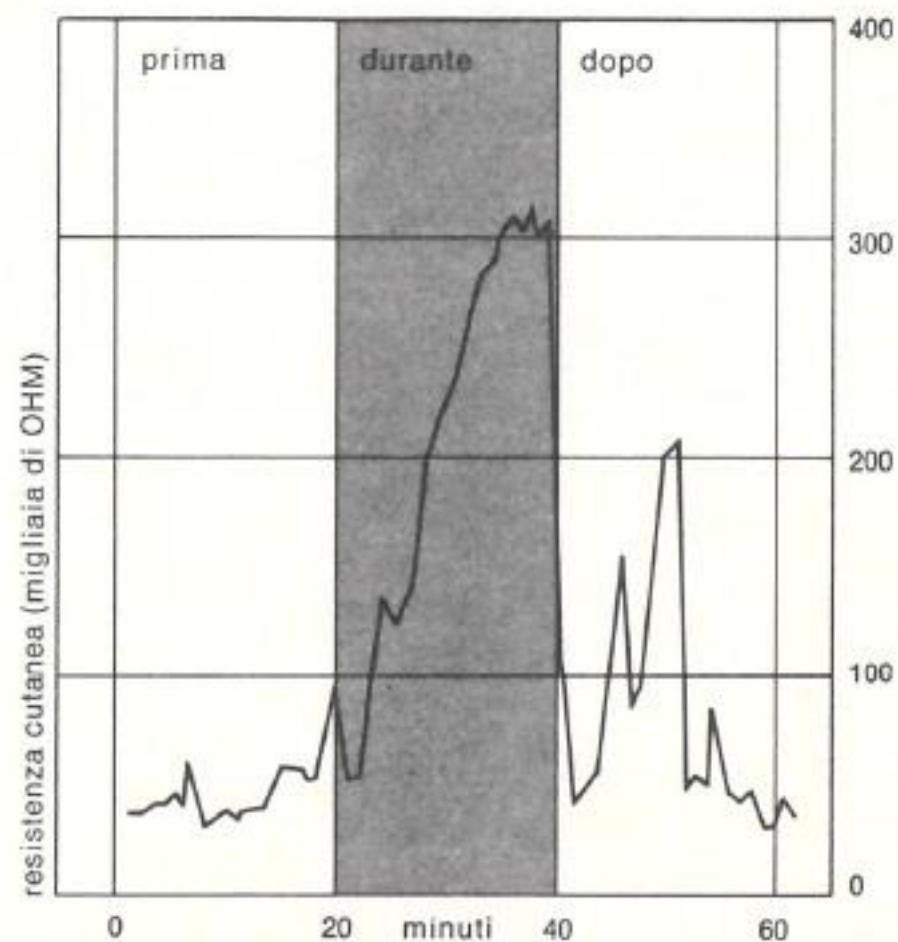


FIG. I-20. - La resistenza elettrica del corpo umano,  $R_c$ , è una grandezza intimamente connessa con le condizioni fisiologiche della persona. La registrazione soprariportata ne è una prova: il picco di  $R_c$  corrisponde a un periodo di intensa concentrazione del soggetto. (Da Scientific American).

I valori della resistenza del corpo umano, che in genere vengono dichiarati con molta sicurezza, devono quindi essere intesi in senso convenzionale, come valori medi in condizioni « convenzionali », avendo ben presente che in particolari casi possono ridursi in maniera considerevole.

In figura I-21 è riportato il campo dei valori proposti in sede internazionale per la resistenza del corpo umano in funzione della tensione.

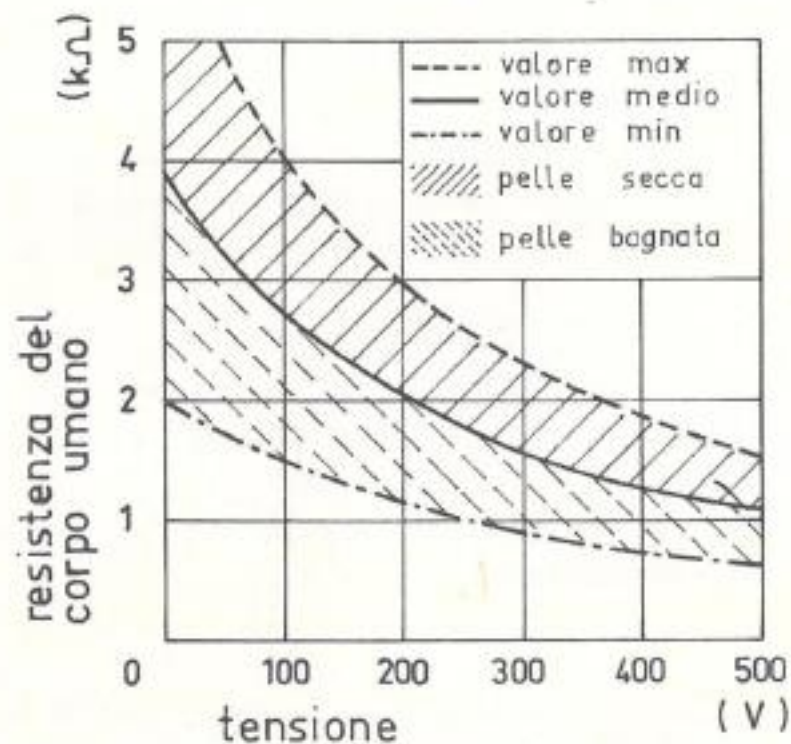


FIG. I-21. - Resistenza del corpo umano in funzione della tensione di contatto, per pelle umida e secca, nel caso di corrente fluente tra le estremità.

I valori di resistenza del corpo umano, assunti in sede IEC, per un contatto tra le estremità (mano-mano, mani-piedi) sono i seguenti:

| Tensione | Resistenza |
|----------|------------|
| V        | $\Omega$   |
| 25       | 2500       |
| 50       | 2000       |
| 250      | 1000       |
| 250      | 650        |

Questi valori sono validi per corrente alternata fino a 100 Hz e per corrente continua. Valori meno elevati devono essere considerati se la corrente non passa attraverso le estremità, se la superficie di contatto è molto estesa e in casi particolari (ved. paragrafo 1.10).

| Tensione<br>V | Tempo massimo di<br>sopportabilità<br>(s) |
|---------------|-------------------------------------------|
| 50            | 5                                         |
| 75            | 1                                         |
| 90            | 0,5                                       |
| 110           | 0,2                                       |
| 150           | 0,1                                       |
| 220           | 0,05                                      |
| 280           | 0,03                                      |