



*Istituto Professionale di Stato per l'Industria e l'Artigianato*

*"CAVOUR-MARCONI"*

Loc. Piscille–Via Assisana, 40/d-06154 PERUGIA– Tel. 075/5838322 Fax 075/32371

e-mail: [ipsiapg@tin.it](mailto:ipsiapg@tin.it) - sito internet: [www.ipsiapg.it](http://www.ipsiapg.it)

## **Effetti di una scarica elettrica su un corpo umano**

### **Premessa**

La corrente elettrica è un flusso di cariche elettriche tra due punti di un corpo conduttore avente un diverso potenziale elettrico.

Un conduttore è qualunque materiale attraversato da una corrente elettrica, esso può essere un buon conduttore ed opporre poca resistenza od un cattivo conduttore dove la conducibilità elettrica è esigua.

In tutti i conduttori attraversati da una corrente elettrica si sviluppa una quantità di calore che è direttamente proporzionale al quadrato dell'intensità, alla resistenza del conduttore e al tempo.

In qualunque conduttore il passaggio di un flusso di elettroni genera un campo elettrico ed un campo magnetico.

L'induzione elettromagnetica è il fenomeno per cui un circuito percorso da corrente, genera una tensione su un circuito vicino senza una connessione fisica, ma solo per via magnetica.

Il passaggio della corrente elettrica nei conduttori solidi avviene solo sulla loro superficie. Quando una scarica elettrica attraversa il corpo umano, per la particolarità del conduttore, esso subisce varie modificazioni chimiche, fisiche e biologiche.

Negli USA lo shock elettrico primario è associato ad una mortalità di circa 0,5 per 100.000 persone l'anno. Su 1.000 decessi 5.000 necessitano di un trattamento d'emergenza.

In Italia le folgorazioni rappresentano circa il 4% degli infortuni mortali sul lavoro e sono tra il 3% e il 5% dei ricoveri per ustioni.

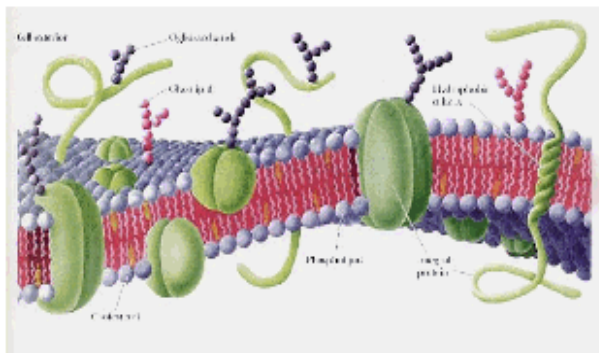
In presenza di un incidente di natura elettrica, dove la persona colpita diventa parte di un circuito o peggio quando interposto tra due conduttori chiude prima il circuito, i danni spesso sono attribuiti al solo valore della tensione mentre concorrono altre variabili:

- Tipo di onda elettromagnetica (sinusoidale, continua, pulsante)
- Effetto Joule (quantità di calore dissipato)
- Frequenza delle onde (le basse frequenze Hertziane risultano essere quelle più pericolose)
- Impedenza del conduttore (la resistenza opposta alla penetrazione)
- Tipo di conducibilità (flusso elettronico o conducibilità elettrochimica)

- La tensione (alte tensioni implicano alta intensità, maggiore lavoro elettrico prodotto)
- L'intensità (espressa come quantità di elettroni movimentati nell'unità di tempo)
- Durata del contatto (la gravità dei danni dipende anche dalla prolungata esposizione)

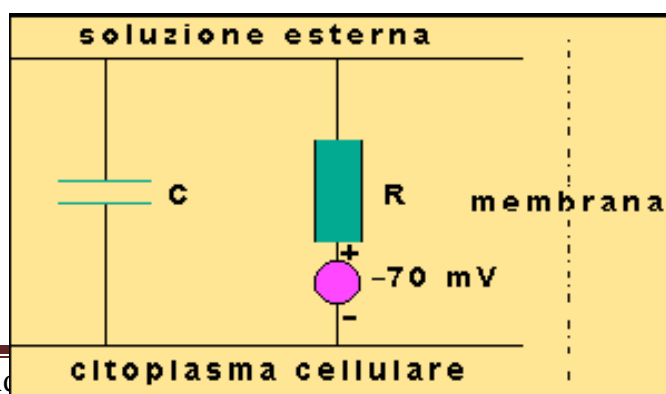
#### Effetti generali dell'elettricità sul corpo umano

- Ustioni lungo il percorso sia superficiali che profonde
- Perdita di coscienza per depolarizzazione dei neuroni
- Polarizzazioni prolungate delle membrane
- Diversa permeabilità delle membrane cellulari
- Rottura delle membrane cellulari
- Fenomeni elettrolitici con formazione di basi forti e necrosi umida
- Fenomeni coagulativi e necrosi profonde per formazione di acidi forti
- Denaturazione delle proteine
- Spasmi della muscolatura liscia e striata
- Disturbi degli equilibri elettrici



(fig. 1)

La membrana cellulare separando cariche elettriche si comporta come un condensatore. La membrana non è perfettamente isolante ed è attraversata da un certo numero di ioni perciò, oltre ad un valore di capacità, presenta anche una resistenza elettrica. Il modello elettrico semplificato delle cellule umane è perciò rappresentato: da un condensatore  $C$  in parallelo con una resistenza  $R$  e, da un generatore di tensione che rappresenta il potenziale di riposo (fig. 2) determinato dalla diversa concentrazione di ioni nella cellula.



(fig 2)

### Potenziale di riposo

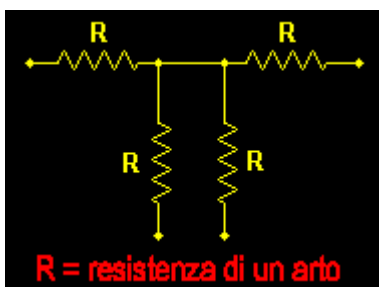
Il corpo umano, è in gran parte composto di una soluzione salina conduttrice, di fatto è costituito da un insieme di atomi o gruppi di atomi che, in ragione della loro affinità elettrochimica si scambiano gli elettroni dell'ultimo orbitale assumendo le caratteristiche di ioni. (cationi, se hanno perso elettroni oppure anioni, se hanno acquistato elettroni); sono tali le cellule (fig. 2) o il liquido interstiziale che le separa. Gli ioni  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^+$ , etc., si muovono verso zone di minor concentrazione e che sono soggetti al campo elettrico generato dall'insieme degli altri ioni. Poiché la cellula ha verso gli ioni un comportamento di tipo selettivo, gli ioni non si diffondono allo stesso modo dentro e fuori la cellula (ad esempio la cellula è molto permeabile allo ione potassio piuttosto che allo ione sodio). Lo ione  $K^+$  viene trasportato all'interno della cellula mentre lo ione  $Na^+$  viene espulso con la tipica azione di pompaggio biochimico a spese dell'organismo (pompa metabolica). La cellula viene quindi a possedere un potenziale negativo all'interno rispetto all'esterno (potenziale di riposo). Nei mammiferi le cellule del sistema nervoso centrale presentano un potenziale di riposo di  $-70$  mV, una cellula miocardica ha delle escursioni tra circa  $-90$  mV e  $+35$  mV una differenza di potenziale notevole se si considerano le piccole dimensioni delle cellule.

### Potenziale d'azione

Se si applica ad una cellula eccitabile un impulso di corrente di polarità inversa a quella della cellula stessa, il potenziale da negativo diviene positivo per ritornare di nuovo al valore iniziale. Quando lo stimolo elettrico eccita la cellula, aumenta notevolmente la permeabilità della membrana agli ioni sodio che, entrando nel citoplasma della cellula, prima la depolarizzano, annullando la differenza di potenziale tra interno ed esterno, e poi ne causano l'inversione di polarità. L'ampiezza minima dell'impulso di corrente necessario ad eccitare la cellula e a determinarne l'inversione del potenziale decresce con l'aumentare della durata per tendere ad un valore costante secondo una curva simile ad un'iperbole equilatera denominata curva di eccitabilità. Uno stimolo elettrico riesce a eccitare la cellula soltanto se produce un flusso di corrente la cui intensità e durata sono superiori ad una soglia che è propria del tipo di tessuto e prende il nome di reobase.

Una corrente elettrica che attraversa un corpo umano supera la resistenza cutanea si ripartisce in tante ramificazioni in ragione della conducibilità incontrata nei tessuti sottostanti, più facilmente sono attraversabili i vasi, i nervi, le ossa.

Da un punto di vista circuitale il corpo umano può essere rappresentato tramite un circuito a quattro resistenze (quadripolo equivalente ad una persona): (fig. 3)



Per gli effetti sul cuore bisogna tener conto anche del percorso della corrente. Ad esempio, tra i più pericolosi, abbiamo i percorsi mano sinistra-torace, mano destra-torace, mani-piedi.

Il valore della corrente elettrica dipende anche dalla resistenza che il corpo umano oppone. Questa diminuisce in presenza di ferite; aumentando la pressione del contatto e aumentando la superficie di contatto; con pelle umida o peggio bagnata dove una corrente di basso voltaggio riesce a far penetrare un notevole flusso di elettroni che poi diventa la causa degli eventuali danni. La resistenza aumenta, invece, in presenza di zone cutanee dallo spesso strato corneo come quelle callose.

Si possono ritenere come livelli di sicurezza i 25 volt in corrente alternata e i 60 volt in corrente continua. Da notare come la corrente alternata si dimostra più pericolosa di quella continua per circa 4,5 volte.

Correnti ad alta frequenza ( $f \gg 50$  Hz) sono meno pericolose di quelle a 50 Hz.

Alcune apparecchiature speciali (antenne televisive, recinzioni elettriche, apparecchiature elettromedicali, interruttore di prossimità etc.) hanno parti metalliche accessibili collegate a circuiti attivi tramite un'impedenza di valore elevato. Per garantire dal pericolo dell'elettrocuzione, il costruttore deve fare in modo che la corrente che può attraversare il corpo di una persona durante il servizio ordinario, non sia superiore a 1mA in corrente alternata o a 3mA in corrente continua. Le parti metalliche che non devono essere toccate durante il servizio ordinario devono presentare una tensione di contatto che non deve dar origine, attraverso il corpo della persona, a correnti non superiori a 3,5 mA in corrente alternata e a 10 mA in corrente continua.

Una corrente continua con una intensità di circa 50 mA o, una corrente alternata di 7 mA sono in grado di provocare contrazioni tetaniche ad una mano impedendole di staccarsi dalla sorgente.

Una corrente di circa 100 mA e frequenza di 60 Hz che attraversi per la durata di un secondo il torace è in grado di provocare una fibrillazione ventricolare.

L'applicazione nell'area dell'encefalo di una corrente tra i 400 e 800 mA provoca crisi epilettica.

La pericolosità della corrente diminuisce all'aumentare della frequenza poiché ad alte frequenze la corrente tende a fluire solo sulla superficie della pelle. Il fenomeno si chiama appunto effetto pelle e le lesioni provocate dal passaggio della corrente elettrica sono solo superficiali e non interessano organi vitali, in ogni caso una penetrazione a livello cellulare, si è visto che, le membrane non risentono dei repentini cambi di polarità ed il trasporto ionico non risulta alterato.

Dare dei valori precisi alla resistenza elettrica del corpo umano risulta piuttosto difficoltoso essendo questa influenzata da molte variabili: percorso della corrente, stato della pelle (presenza di calli, sudore, umidità, tagli, abrasioni etc.), superficie di contatto, tensione di contatto (sperimentalmente si è visto che all'aumentare della tensione diminuisce la resistenza). L'impedenza transtoracica di un adulto varia tra i 15 e i 150 Ohm, come si evince, è possibile una valutazione solo statistica e quindi, le norme CEI

fanno riferimento a valori convenzionali riferiti ad un campione medio di popolazione. Nel caso di un contatto che avvenisse tramite strati isolanti (guanti, calzari, pedane etc.) alla  $R_c$  occorre ovviamente aggiungere la resistenza di tali materiali. Ogni individuo reagisce in modo diverso al passaggio della corrente per cui la quantità di corrente necessaria ad innescare una fibrillazione può variare da caso a caso; nonostante questo, il percorso seguito dalla corrente ha una grande influenza sulla probabilità d'innescare. Per questo motivo è stato definito un "fattore di percorso" che indica la pericolosità dei diversi percorsi seguiti dalla corrente considerando come riferimento il percorso mano sinistra-piedi.

### **Fulminazione**

Se la differenza di potenziale tra nuvola e terra supera un valore compreso tra gli 80 milioni e il miliardo di volt, l'aria viene perforata dalle cariche elettriche e si ha il fulmine, con una corrente che ha un valore medio di 10.000 ampere e un valore limite pari a 200.000 ampere.

La perforazione non è istantanea. Dalla nuvola parte una scarica iniziale (detta "scarica pilota" o "scarica leader") non visibile, che procede a scatti con una velocità di 100 chilometri al secondo. Dalla terra parte una scarica di segno opposto, detta di richiamo. Al momento dell'incontro tra le due scariche si ha il fulmine, una scarica finale chiamata scarica di ritorno a velocità di 50.000 Km/sec.

La corrente raggiunge il picco massimo in un tempo brevissimo pari a qualche microsecondo, mentre globalmente il fenomeno può durare da qualche decina o qualche centinaia di microsecondi.

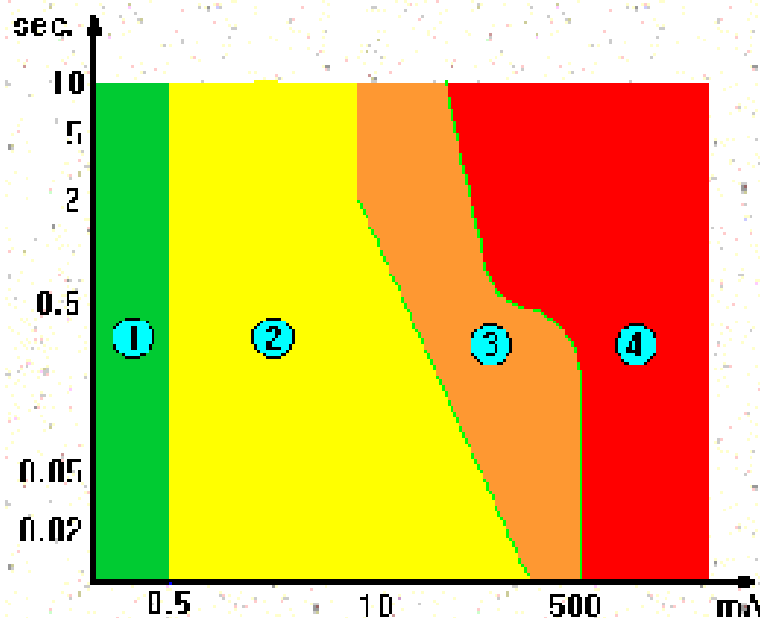
Al suo interno il fulmine può sviluppare una temperatura di 15.000 gradi centigradi. Il calore espande l'aria ed è questa espansione che provoca il tipico rumore del fulmine, ovvero il tuono. Poiché il suono si propaga a 340 metri al secondo, mentre la luce a 300.000 chilometri al secondo, si ha una differenza tra la visione del fulmine (lampo) e la percezione del tuono.

Quando un fulmine colpisce una persona, nel corpo umano può entrare attraverso le aperture del cranio, cioè occhi, orecchie, naso e bocca e si scarica a terra dopo aver percorso il sangue e il sistema nervoso. Come conseguenza più probabile si ha asistolia e paralisi dei muscoli respiratori, ma mentre il cuore può riprendere a battere autonomamente, i polmoni hanno bisogno della ventilazione assistita, in assenza della quale la morte può giungere per anossia cerebrale.

È possibile che con un adeguato e precoce soccorso circa il 70% delle persone colpite da un fulmine può sopravvivere senza danni.

In figura sono rappresentate, in base al valore della corrente (espresso in mA - milliampere) e alla durata del fenomeno (in secondi), quattro zone di pericolosità, per una frequenza compresa tra i 15 e i 100 Hz:

- Zona 1 - al di sotto di 0,5 mA la corrente elettrica non viene percepita (si tenga presente che una piccola lampada da 15 watt assorbe circa 70 mA).
- Zona 2 - la corrente elettrica viene percepita senza effetti dannosi.
- Zona 3 - si possono avere tetanizzazione e disturbi reversibili al cuore, aumento della pressione sanguigna, difficoltà di respirazione.
- Zona 4 - si può arrivare alla fibrillazione ventricolare e alle ustioni.



Quando una corrente elettrica attraversa un corpo umano può produrre effetti pericolosi consistenti generalmente in alterazioni delle varie funzioni vitali, in lesioni: al sistema nervoso, ai vasi sanguigni, all'apparato visivo e uditivo, all'epidermide etc. Alcuni tra questi effetti risultano essere particolarmente pericolosi.

### La tetanizzazione

Si ha quando i muscoli rimangono contratti fino a quando il passaggio di corrente elettrica non cessa del tutto.

Il valore più grande di corrente per cui una persona è ancora in grado di staccarsi della sorgente elettrica si chiama corrente di rilascio e mediamente è compreso tra i 10mA e i 15mA per una corrente di 50Hz. Da notare che correnti molto elevate non producono solitamente la tetanizzazione perché quando il corpo entra in contatto con esse, l'eccitazione muscolare è talmente elevata che i movimenti muscolari involontari generalmente staccano il soggetto della sorgente.

Diversamente con l'esposizione di un appropriato flusso di corrente il processo di contrazione delle miofibrille muscolari rimane bloccato da una depolarizzazione forzata e non volontaria del sarcolemma dovuto ad un elevato flusso elettrico proveniente sia dalle fibre nervose che da altri e contigui sistemi di conduzione. L'estemporaneo processo obbliga lo ione calcio  $2^{+}$  come per un segnale proveniente dalla placca motoria, ad impegnare per un tempo prolungato la tropomiosina C, la quale sarà costretta a liberare i siti di aggancio presenti sui miofilamenti di actina e consentire alle teste della miosina la contrazione muscolare.

Per correnti più alte può intervenire l'arresto della respirazione se il processo sopradescritto colpirà diaframma e muscoli respiratori e in alcuni casi lo spasmo della laringe. Per inibizione dei centri del respiro presenti nel bulbo, se la scarica interesserà la regione encefalica.

La corrente elettrica, a seguito del calore dissipato per effetto Joule, riscalda le parti attraversate, è lesiva per le pareti cellulari, ha un'azione di denaturazione delle proteine, si innescano fenomeni di termocoagulazione, si possono avere ustioni superficiali o profonde. La necrosi muscolare si manifesta anche con l'immissione in circolo di grandi quantità di mioglobina che risulta essere nefrotossica.

Nel caso in cui la pelle venisse esposta per un flusso di corrente la cui densità fosse di circa 60 milliampere al  $\text{mm}^2$ , questa sarebbe carbonizzata in pochi secondi.

### **Fibrillazione ventricolare generalità**

Il cuore funziona grazie a stimoli elettrici, pertanto una corrente elettrica esterna può alterare il suo funzionamento fino alla fibrillazione ventricolare

E' l'effetto più pericoloso, ed è dovuto alla sovrapposizione delle correnti provenienti dall'esterno con quelle fisiologiche che, generando delle contrazioni scoordinate, fanno perdere il giusto ritmo al cuore. Il cuore ha la funzione di pompare il sangue lungo le vene e le arterie del corpo. Per questo scopo, i muscoli del cuore, le fibrille, si contraggono e si espandono ritmicamente a circa 60/100 volte al minuto. Questi movimenti sono coordinati da un vero e proprio generatore d'impulsi elettrici, il nodo seno-atriale. Appositi tessuti conduttori si incaricano di propagare questi impulsi che, passando attraverso il nodo atrio-ventricolare, arrivano alle fibre muscolari del cuore. Quando gli impulsi elettrici arrivano alle fibrille, queste ultime producono le contrazioni dando luogo al battito cardiaco. Il cuore, proprio a causa della natura elettrica del suo funzionamento, è particolarmente sensibile a qualunque corrente elettrica che proviene dall'esterno, sia essa causata da uno shock elettrico o introdotta volontariamente come nel caso del pace-maker. La corrente generata dal pace-maker è semplicemente un supporto agli impulsi elettrici prodotti nel nodo seno-atriale e non produce anomalie nel normale funzionamento del cuore ma lo aiuta a correggere certe disfunzioni. Una corrente esterna che attraversa il cuore potrebbe in questo caso avere effetti molto gravi per l'infortunato perché potrebbero alterarsi la sincronizzazione ed il coordinamento nei movimenti del cuore con paralisi dell'operazione di pompaggio del sangue. Questa anomalia si chiama fibrillazione ed è particolarmente pericolosa nella zona ventricolare perché diventa un fenomeno non reversibile in quanto esso persiste anche se lo stimolo é

cessato. Meno pericolosa, grazie alla sua natura reversibile, è invece la fibrillazione atriale.

La fibrillazione ventricolare è reversibile entro i primi minuti soltanto se il cuore è sottoposto ad una scarica elettrica appropriata. Solo così si possono evitare gravi danni al tessuto miocardico, al cervello e nel peggiore dei casi la morte dell'infortunato.

### **Nel particolare**

Il tessuto miocardico per sua natura è un conduttore, ed in molte zone le cellule sono organizzate in microcircuiti. Queste riconoscono in un gruppo di cellule del NS la proprietà di circuito primario. La funzione contrattile si esplica quando il segnale elettrico dal circuito primario abbia attraversato per induzione tutti i microcircuiti e da questi in tutte le cellule, giungendo alla periferia.

Quando i circuiti secondari, per una delle tante cause, e fra queste l'influenza di una corrente esterna non riconoscono il circuito primario perdono la capacità di una depolarizzazione sincronizzata.

L'invasione di un flusso di corrente elettrica esterna avente un valore di induzione elettromagnetica notevolmente elevato, che per la sua durata colpisce anche nel periodo di vulnerabilità, distrugge il delicato equilibrio dove i microcircuiti vengono attivati e sottratti alla dipendenza del circuito primario, con conseguenti depolarizzazioni autonome, perdita del sincronismo, contrazione di tipo vermicolare, maggior consumo di molecole di adenosintrifosfato.

Qualora questo fenomeno fosse di breve durata (un tempo inferiore al ciclo cardiaco), e i valori della intensità non fossero elevati, è possibile che possa verificarsi solo l'azzeramento dei potenziali elettrici, lasciando la facoltà alle cellule del circuito primario di riprendere la sua normale funzione come in una defibrillazione.

Proprio questo risultato viene raggiunto impiegando il defibrillatore, un'apparecchiatura medica che applica un impulso elettrico al torace dell'infortunato tramite due elettrodi. I fattori che possono rendere probabile l'insorgere della fibrillazione ventricolare sono diversi. Tra i più significativi c'è

l'intensità della corrente che attraversa il corpo nell'unità di tempo, di cui una piccola parte passa attraverso il cuore e causa la fibrillazione. Questa quantità è molto difficile da determinare in modo certo, nonostante i numerosi studi che sono stati realizzati per valutare il minimo valore di corrente che può dare inizio a questo fenomeno, l'impossibilità di realizzare esperimenti diretti con l'uomo rendono molto difficoltosa una raccolta di dati sufficientemente attendibili.

### **La defibrillazione**

È una pratica terapeutica che utilizza una scarica controllata di corrente elettrica allo scopo di correggere anomalie funzionali su basi elettriche del cuore. Essa è largamente usata nella cardioversione di molte turbe del ritmo. In un arresto cardiaco, dovuto a fibrillazione ventricolare o a tachicardia ventricolare senza polso, al momento della scarica, la corrente che riesce a colpire il cuore non supera il 4% del totale, tutto il resto si disperde ramificandosi in altri tessuti. La quantità di elettroni che sono messi in campo sono tra i 30 e i 40 Ampere per una corrente monofasica scaricati tutti in 3-5 msec. L'effetto che si ottiene è una simultanea depolarizzazione di tutte le fibre del miocardio.

Dopo il silenzio elettrico le cellule del NS sono in condizioni di iniziare le depolarizzazioni guida.

Le prime esperienze di defibrillazione le fecero i Russi nel 1952 utilizzando corrente alternata di rete per correggere turbe del ritmo cardiaco, ma il primo che si occupò della defibrillazione elettrica moderna fu l'americano Paul Maurice Zoll, nel 1953 egli dimostrò che entro i primi minuti un cuore in arresto se opportunamente stimolato con una corrente elettrica può riprendere la sua attività. In seguito egli si occupò della costruzione dei primi defibrillatori.

La corrente che è in uso nel cuore è di natura elettrochimica e quindi di tipo continua, di conseguenza i primi defibrillatori, che ancora oggi resistono, erano dei monofasici.

Erano costruiti in modo semplice perché utilizzavano una corrente continua da un pacco batterie o da un trasformatore, avevano un regolatore di tensione e un condensatore le cui armature erano gli elettrodi entro i quali doveva trovarsi il cuore al momento della scarica. La seconda generazione fu quella dei defibrillatori semiautomatici, che consentivano a laici di eseguire una defibrillazione in quanto la macchina era in grado di stabilire se il ritmo era defibrillabile esonerando l'operatore dal fare una diagnosi. Oggi i nuovi defibrillatori bifasici hanno tempi di ricarica ridotti (4 secondi) e tempi di scarica da 5 a 10 msec con un'energia di lavoro standard a 150J ed il tempo di scarica fermato quando un processore rileva l'avvenuta efficacia riducendo ulteriormente i danni collaterali relativi all'effetto Joule sulle cellule colpite. L'AHA, che per prima ha applicato un algoritmo della defibrillazione, stabiliva range utili di energia da utilizzare che andavano da 200J a 360J per gli adulti e nei bambini da 2 a 4 J/Kg per i monofasici, tenuto conto che la soglia minima efficace è stata calcolata tra i 175J e 320J. Per i defibrillatori bifasici i livelli partivano da 120J e arrivavano fino a 170J. Altro genere di defibrillatori sono quelli automatici impiantabili, sono in grado di riconoscere ed automaticamente convertire una fibrillazione ventricolare, le loro minuscole dimensioni consentono anche un impianto sottocute in quelle persone soggette a ricorrenti fenomeni di questa aritmia.

In conclusione il successo di una defibrillazione, per quanto brillanti possano essere le nuove macchine resta legata al tempo d'intervento, alla possibilità di trovare un cuore non in acidosi metabolica, non in ipossia e che ancora resiste una certa scorta di molecole di ATP senza le quali le teste dei miofilamenti di miosina non agganceranno l'actina con impossibilità alla contrazione muscolare.

Fonti:

<http://doc.studenti.it>