

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica

Effetti della corrente elettrica negli esseri viventi

Relatore:

Dainese Diego

Candidato:

Ortolan Massimo

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Indice

1	Impedenza del corpo umano e del bestiame	7
1.1	Impedenza del corpo umano	8
1.2	Valori dell'impedenza totale del corpo umano	9
1.2.1	Dipendenza dalla superficie di contatto e dal grado di umidità . . .	9
1.2.2	Dipendenza dalla frequenza per correnti alternate sinusoidali	10
1.2.3	Influenza della corrente continua	12
1.2.4	Valore della resistenza iniziale del corpo umano	12
1.3	Impedenza del bestiame	13
1.3.1	Valori dell'impedenza totale del bestiame	14
1.3.2	Valori della resistenza iniziale	14
2	Effetti della corrente elettrica aspetti generali	15
2.1	Effetti della corrente sul corpo umano	16
2.1.1	Effetti della corrente alternata sinusoidale a frequenze tra 15-100 Hz	16
2.1.2	Effetti della corrente continua	16
2.1.3	Fattore di percorso	19
2.1.4	Altri effetti della corrente	19
2.1.5	Effetti della corrente sulla pelle	20
2.2	Effetti della corrente sul bestiame	21
3	Effetti della corrente elettrica aspetti speciali	23
3.1	Corrente alternata per frequenze superiori a 100 Hz	23
3.1.1	Intervallo di frequenze da 100 Hz a 1 KHz	24
3.1.2	Frequenze superiori ad 1 KHz	25
3.1.3	Stima della soglia di fibrillazione equivalente per correnti con com- ponenti a frequenze miste	26
3.2	Corrente con forme d'onda particolari	26
3.2.1	Corrente alternata con componente continua	27
3.2.2	Corrente alternata con controllo di fase	28
3.2.3	Corrente alternata con controllo multiciclo	29
3.2.4	Scariche di impulsi di corrente	31
3.2.5	Singoli impulsi unidirezionali di corrente di breve durata	32
3.2.6	Forme d'onda complesse e irregolari	34
3.3	Effetti della corrente attraverso il corpo umano immerso in acqua	36
4	Effetti dei colpi di fulmine	39
4.1	Interazione del colpo di fulmine con esseri umani e bestiame	40
4.1.1	Scarica diretta	40
4.1.2	Scarica per contatto	40

4.1.3	Scarica di rimbalzo	41
4.1.4	Streamer ascendente	41
4.1.5	Tensione di passo	41
4.2	Effetti diretti del colpo di fulmine su un corpo vivente	43
A	Infortuni elettrici in ambito professionale	45

Introduzione

In questo documento verranno descritti gli effetti del passaggio di corrente elettrica attraverso il corpo di un essere vivente ed è basato sulle parti 1, 2 e 4 della norma IEC 60479. La terza parte, riguardante esclusivamente gli effetti sugli animali¹, è stata recentemente allegata alla prima parte della norma (IEC 60479-1 2018).

Questo testo mira a fornire i risultati della ricerca su animali e dell'analisi clinica di incidenti elettrici (i dati ricavati da sperimentazione diretta su esseri umani in vita sono molto limitati), i valori riportati sono quindi del tutto conservativi e, nel caso dell'essere umano, possono essere applicati a persone di tutte le età le cui condizioni fisiologiche non siano compromesse.

Quando un essere vivente si trova ad essere collegato tra due punti di un circuito elettrico i quali si trovano a potenziale diverso il suo corpo sarà interessato da una corrente, la quale scorrerà attraverso di esso incontrando un'impedenza. Questa impedenza sarà discussa all'interno del primo capitolo e, in combinazione con i valori di corrente forniti nei capitoli successivi, può essere usata per ricavare i valori di tensione a cui si può associare una determinata risposta fisiologica.

Il passaggio della corrente viene avvertito, e può arrivare ad essere letale, quando l'energia ad esso associata è sufficientemente elevata, è quindi chiaro che l'effetto che la corrente ha sull'organismo dipenderà dalla sua intensità e dal tempo di esposizione ad essa.

Il secondo capitolo punterà a descrivere i principali effetti fisiologici del passaggio di corrente, fornendo inoltre dei valori di soglia ad essi associati per le forme di corrente più comunemente utilizzate, ovvero corrente alternata sinusoidale a 50/60 Hz e corrente continua.

Nel terzo capitolo l'analisi degli effetti fisiologici verrà estesa per correnti alternate ad alte frequenze e per altri tipi di forme d'onda, si discuterà inoltre il caso particolare della conduzione attraverso un corpo immerso in acqua.

Il quarto capitolo riguarda il colpo di fulmine, verrà data una breve descrizione del fenomeno atmosferico, si discuteranno i vari modi in cui interagisce con un essere vivente ed i danni che causa nel suo organismo.

¹in particolare l'attenzione viene data al bestiame per il quale la probabilità di entrare in contatto con correnti pericolose è più alta rispetto, ad esempio, ad un animale domestico

Capitolo 1

Impedenza del corpo umano e del bestiame

È noto che la corrente scorre lungo il percorso a resistenza minore, questo può trovarsi all'interno del corpo di un essere vivente, il quale avrà una sua impedenza. Quest'ultima non è facilmente rilevabile in quanto varia da soggetto a soggetto, i principali fattori che la influenzano sono il percorso della corrente di contatto¹, la tensione di contatto², la durata di esposizione alla corrente, la frequenza del segnale, il grado di umidità della pelle o pelliccia (nel caso del bestiame), la grandezza della superficie di contatto con le parti attive, la pressione con cui avviene il contatto e la temperatura dell'ambiente.

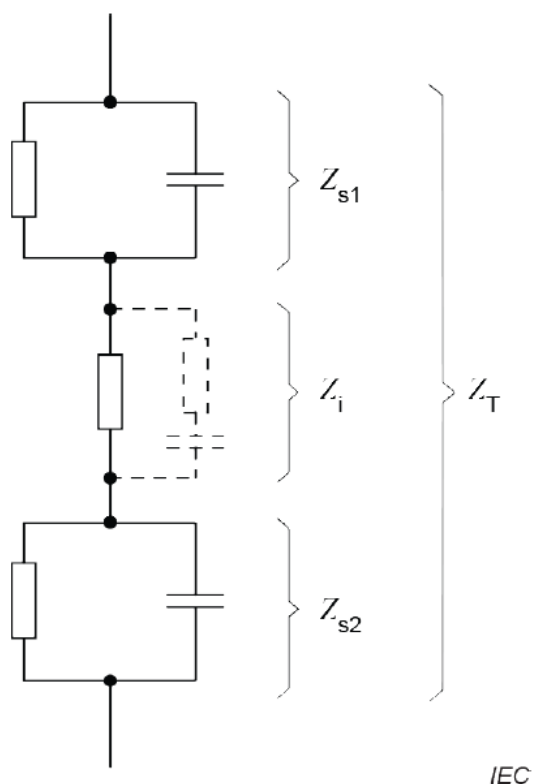


Figura 1.1: Schema semplificato dell'impedenza del corpo umano

¹corrente che scorre all'interno del corpo

²tensione a cui è sottoposto il corpo

1.1 Impedenza del corpo umano

L'impedenza del corpo umano può essere schematizzata come in Figura 1.1, in cui si può individuare l'**impedenza totale del corpo umano Z_T** , essa è costituita da :

- **Impedenze della pelle Z_{s1}, Z_{s2}** : nei punti di ingresso e di uscita la corrente sarà ostacolata dall'impedenza della pelle, questa è principalmente resistiva e presenta una componente capacitiva, la struttura della pelle è infatti formata da strati semi-isolanti e da piccoli elementi conduttivi (pori).

Il suo valore dipende dalla tensione di contatto, frequenza della corrente, durata di esposizione alla corrente, area della superficie di contatto, grado di umidità della pelle, tipo di pelle, pressione di contatto e temperatura.

Per piccoli valori della tensione di contatto Z_s varia di molto da persona a persona in dipendenza con i parametri elencati in precedenza, ad elevate tensioni invece la pelle inizierà a rompersi esponendo i tessuti sottostanti e causando una diminuzione dell'impedenza, fino a farla diventare trascurabile nel momento in cui la pelle si lacererà completamente.

Le Z_s contribuiscono alla maggior parte dell'impedenza totale, la pelle è infatti molto meno conduttiva rispetto ai tessuti interni del corpo umano. Ciò è vero in condizioni nominali ossia in condizioni asciutte ed in assenza di abrasioni, le quali creano percorsi preferenziali per la conduzione di corrente all'interno del corpo.

- **Impedenza interna del corpo umano Z_i** : questa impedenza è prevalentemente resistiva, benché sia stata misurata anche una piccola componente capacitiva trascurabile (indicata in Figura 1.1 con linea tratteggiata), ed il suo valore dipende principalmente dal percorso della corrente ed in minima parte dall'area della superficie di contatto.

Si possono schematizzare, in Figura 1.2, le impedenze interne delle varie parti del corpo, il cui valore viene dato come una percentuale di quello misurato dal percorso da mano destra a piede destro. Si può notare che gli arti contribuiscono per la maggior parte all'impedenza interna totale, per semplicità si possono inoltre considerare uguali tra loro le impedenze di braccia e gambe, dato che hanno valori simili, si farà quindi riferimento allo schema di Figura 1.3.

Quanto appena detto vale quando la conduzione di corrente all'interno del corpo è già iniziata, nell'istante in cui viene applicata una tensione esterna invece le capacità della pelle non hanno ancora avuto il tempo di caricarsi. In questo caso le impedenze Z_{s1} e Z_{s2} della pelle sono trascurabili e la corrente sarà ostacolata dalla **resistenza iniziale del corpo umano R_0** , quest'ultima limita i picchi di corrente nel momento del contatto con una parte in tensione.

La resistenza iniziale R_0 sarà approssimativamente pari all'impedenza interna Z_i e quindi dipenderà anch'essa principalmente dal percorso della corrente di contatto ed in minima parte dall'area della superficie di contatto.

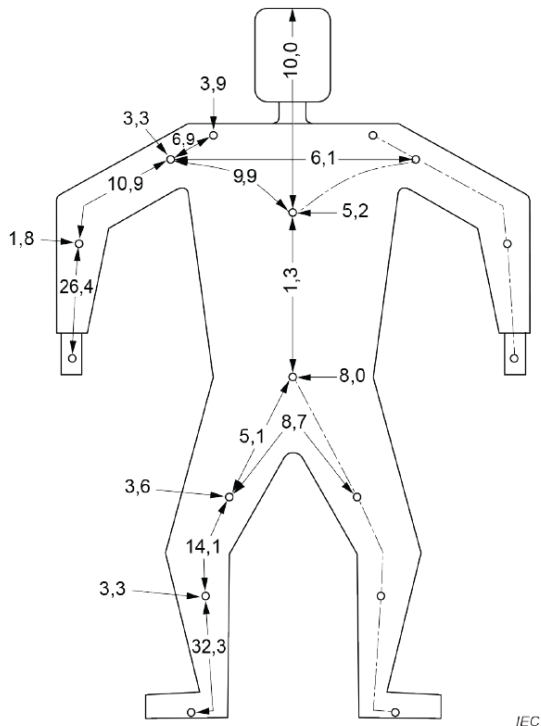


Figura 1.2: Impedenze interne parziali espresse come percentuale dell'impedenza misurata tra mano dx e piede dx

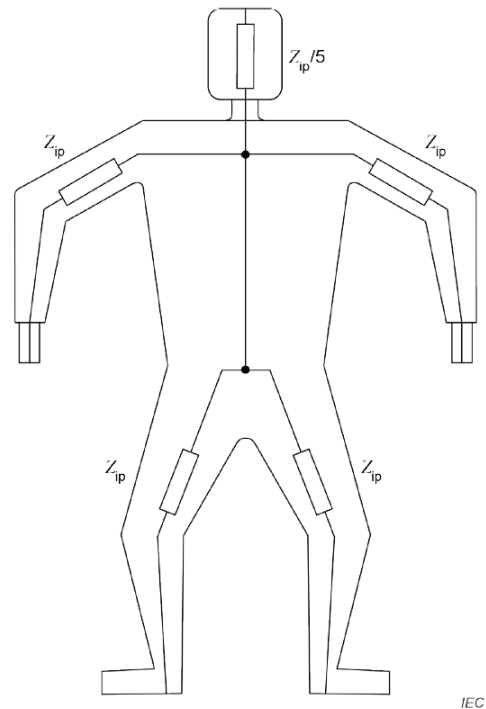


Figura 1.3: Schema semplificato delle impedenze interne

1.2 Valori dell'impedenza totale del corpo umano

Come già anticipato si è rilevato, da prove sperimentali, che l'impedenza totale dipende dalla tensione di contatto, in particolare essa cala all'aumentare della tensione applicata. Di seguito vengono riportati dei grafici dai quali si possono apprezzare le relazioni tra l'impedenza ed alcuni dei principali fattori dalla quale dipende, al variare della tensione di contatto.

I valori di impedenza rappresentati nei grafici sono stati ricavati dall'analisi statistica dei risultati di prove su persone vive e cadaveri, nel caso di prove su esseri umani viventi la tensione di contatto viene applicata tramite due elettrodi di dimensioni uguali, con superfici di contatto attive variabili, impugnati nelle mani (percorso mano-mano).

1.2.1 Dipendenza dalla superficie di contatto e dal grado di umidità

L'impedenza totale diminuisce all'aumentare della superficie di contatto e del grado di umidità, come mostrato nella Figura 1.4. I grafici riportano i valori medi di impedenza ottenuti da prove su una popolazione di esseri umani in vita, per corrente alternata sinusoidale a 50/60 Hz applicata in un range da 25 V a 200V.

Le diverse curve numerate all'interno dei grafici indicano il tipo di elettrodo utilizzato per la prova, al variare del quale cambierà la superficie in contatto con la pelle:

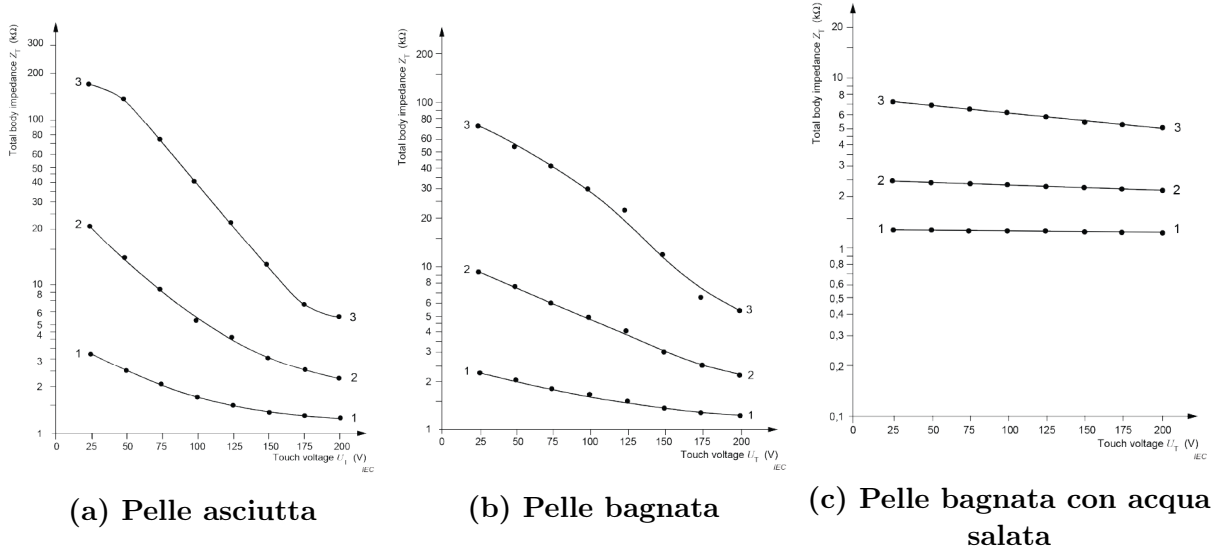


Figura 1.4: Impedenza totale al variare dell'area di contatto e del grado di umidità

1. Superficie di contatto grande, l'ordine di grandezza è 10000 mm^2 (pari all'incirca alla superficie del palmo di una mano);
2. Superficie di contatto media, l'ordine di grandezza è 1000 mm^2 ;
3. Superficie di contatto piccola, l'ordine di grandezza è 100 mm^2 (pari all'incirca alla superficie della punta di un dito).

Dalle prove eseguite si è osservato che nel caso di superfici di contatto nell'ordine di qualche mm^2 , le misure di impedenza variano di molto tra di loro. Questo è dovuto al fatto che una superficie di contatto più ristretta risente molto di più delle piccole variazioni di posizionamento dell'elettrodo, rispetto ad una superficie più grande. Infatti due punti diversi, sul palmo della mano in questo caso, possono trovarsi in condizioni differenti di umidità, temperatura ecc.

Sono state quindi eseguite altre prove nel caso di aree di contatto medie e piccole, su una sola persona, con corrente sinusoidale a frequenza di 50/60 Hz in condizioni asciutte, i cui risultati sono riportati in Figura 1.5. Facendo attenzione alla curva 5 (superficie di contatto di 1 mm^2) si può osservare come per misure eseguite alla stessa tensione di contatto, ci sia una differenza tra i singoli valori di impedenza.

In questo grafico viene inoltre raggiunta la tensione di contatto a cui la pelle si lacerava, all'incirca 220V, si può così osservare la diminuzione dell'impedenza discussa in precedenza.

1.2.2 Dipendenza dalla frequenza per correnti alternate sinusoidali

L'impedenza totale diminuisce all'aumentare della frequenza fino a raggiungere approssimativamente la resistenza interna del corpo (frequenze superiori a 5 KHz), a causa dell'influenza della componente capacitiva della pelle. Nella Figura 1.6 si può osservare il diagramma che riporta i valori medi di impedenza totale al variare della frequenza e della tensione di contatto, ottenuto con area di contatto grande in condizioni asciutte e percorso della corrente mano-mano.

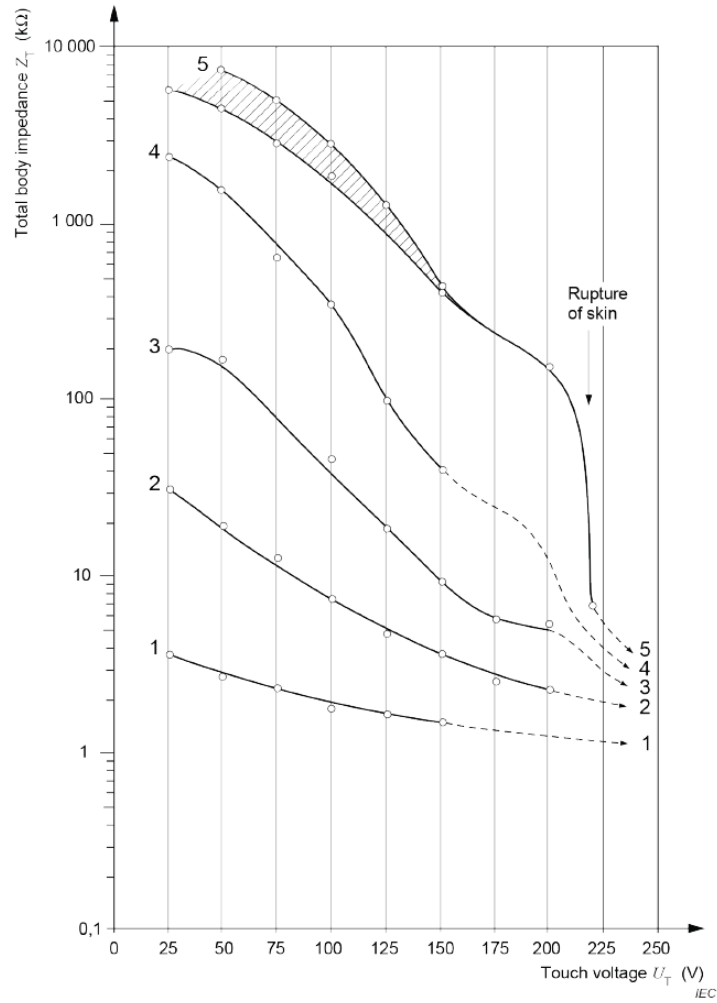


Figura 1.5: Impedenza totale al variare dell'area di contatto (1)8200mm², (2)1250mm², (3)100mm², (4)10mm², (5)1mm²

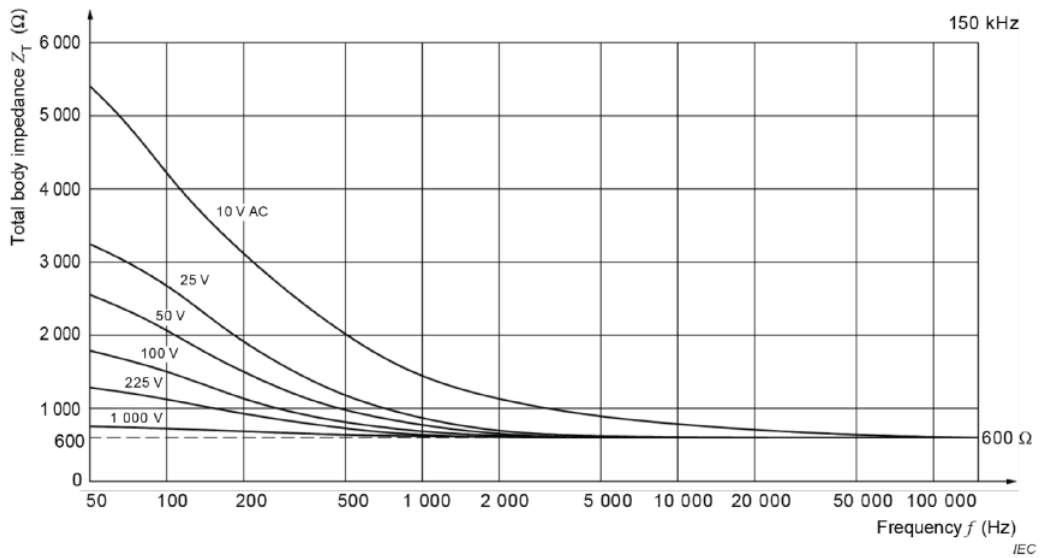


Figura 1.6: Impedenza totale al variare della frequenza

1.2.3 Influenza della corrente continua

Nel caso della corrente continua la componente capacitiva della pelle è nulla, quindi non si parlerà più di impedenza totale ma si andrà a valutare la **resistenza totale R_T** del corpo umano. Nella Figura 1.7 vengono messi a confronto i valori medi di impedenza (si utilizzano i risultati delle prove eseguite a 50/60 Hz) e resistenza totali.

Si può osservare che la differenza tra le due è minima, ciò è dovuto al fatto che le capacità interne al corpo umano sono piccole, inoltre per tensioni superiori a 200V questa differenza è del tutto trascurabile, in quanto l'impedenza totale raggiunge quella interna del corpo a causa del cedimento della pelle.

Dalle considerazioni fatte si possono assumere del tutto validi i valori di impedenza ricavati con corrente alternata a 50/60 Hz anche per il caso di corrente continua.

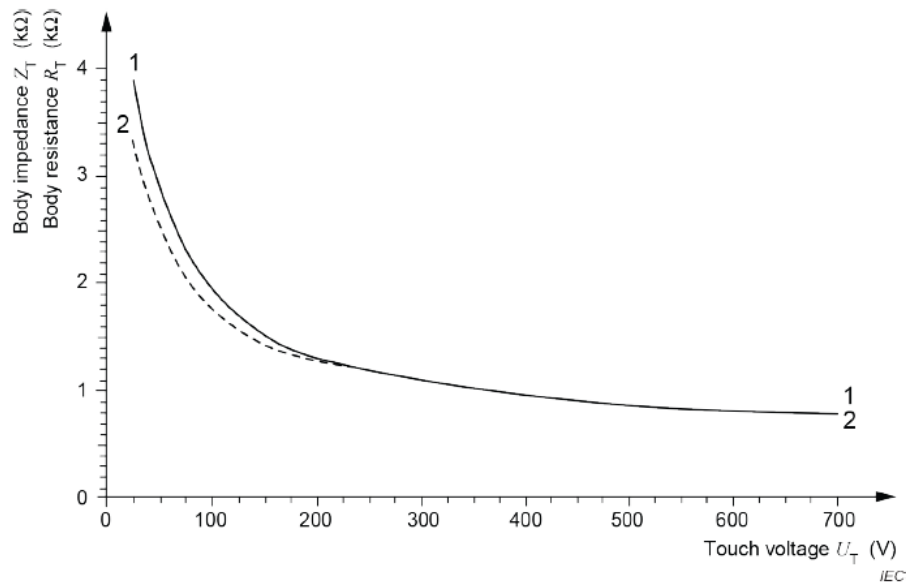


Figura 1.7: Confronto tra Resistenza(1) e Impedenza(2) totali

1.2.4 Valore della resistenza iniziale del corpo umano

La R_0 viene misurata per il percorso mano-mano con area di contatto grande, ottenendo un valore medio di 750Ω .

Ci si può aspettare che la resistenza totale sarà più bassa di impedenza e resistenza totali, perché nel momento del contatto le capacità della pelle e del corpo sono scariche.

1.3 Impedenza del bestiame

L'impedenza del corpo di un quadrupede, un bovino nel caso considerato, può essere schematizzata come in Figura 1.8, in cui sono presenti anche i flussi principali di corrente all'intero del corpo.

Considerando solo i principali percorsi di interesse della corrente, ovvero quelli naso-zampe e zampe anteriori-zampe posteriori, si possono tracciare i circuiti equivalenti di Figura 1.9, in cui viene considerata trascurabile l'impedenza del tronco.

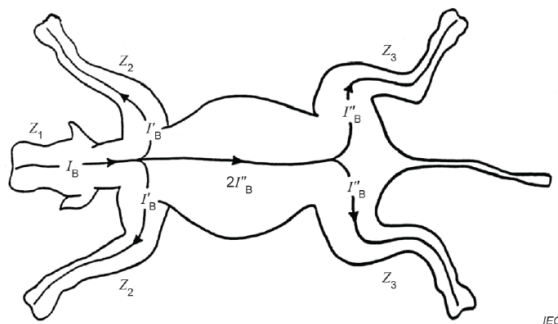


Figura 1.8: Impedenza e flussi di corrente principali

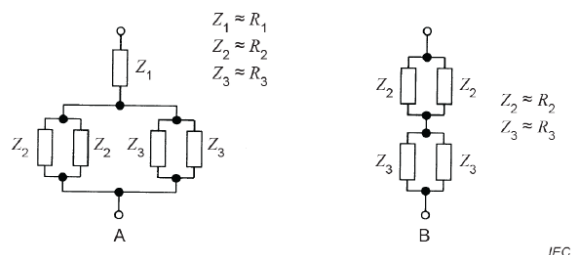


Figura 1.9: Diagrammi equivalenti impedenza per percorso (A) naso-zampe (B) zampe anteriori-zampe posteriori

Come per l'essere umano anche in questo caso sarà presente un **impedenza totale Z_T** che è divisa in:

- **Impedenza interna Z_i :** questa impedenza è prevalentemente resistiva ed il suo valore dipende principalmente dal percorso della corrente ed in minima parte dalla grandezza della superficie di contatto. L'impedenza interna è principalmente concentrata nelle zampe.
- **Impedenza di pelliccia e pelle Z_p :** l'impedenza della pelle ha componenti resistive e capacitive, dato che è formata da uno strato semi-isolante e da piccoli elementi conduttivi³, il suo valore dipende dalla tensione di contatto, frequenza del segnale, durata di esposizione alla corrente, area della superficie di contatto, pressione di contatto, grado di umidità della pelle, temperatura. Come per l'uomo, si è osservato che all'aumentare della tensione di contatto l'impedenza della pelle diminuisce. Per quanto riguarda la pelliccia l'impedenza dipende principalmente dalla sua umidità, in condizioni asciutte è considerata isolante per tensioni fino a 100 V e raggiunge valori in un range da decine a centinaia di K Ω .
- **Impedenza (resistenza) dello zoccolo R_h :** l'impedenza dello zoccolo, se presente, è resistiva. Da misure fatte su bovini, di dimensioni e peso differenti, in condizioni bagnate e per un range di tensione da 20 V a 200 V AC a 50/60 Hz si è ricavato che R_h non dipende in modo significativo dalla tensione ed ha un valore medio di 350 Ω .

Anche nel caso degli animali, dato che l'impedenza totale presenta una componente capacitiva, nel momento di primo contatto con la tensione le capacità non sono cariche e quindi si parla di **resistenza iniziale del corpo R_0** , questa ha un valore prossimo a quello dell'impedenza interna sommata alla resistenza degli zoccoli (se presenti).

³gli elementi conduttivi sono i canali da cui fuoriesce il sudore, presenti se l'animale possiede le ghiandole sudorifere

1.3.1 Valori dell'impedenza totale del bestiame

Viene di seguito riportato uno schema che rappresenta l'impedenza totale media misurata su una popolazione di bovini (Figura 1.10).

I valori riportati sono stati ricavati da misure eseguite a varie tensioni di contatto in condizioni asciutte, per i percorsi naso-zampe e zampe anteriori-zampe posteriori e si ritengono applicabili fino a 230 V.

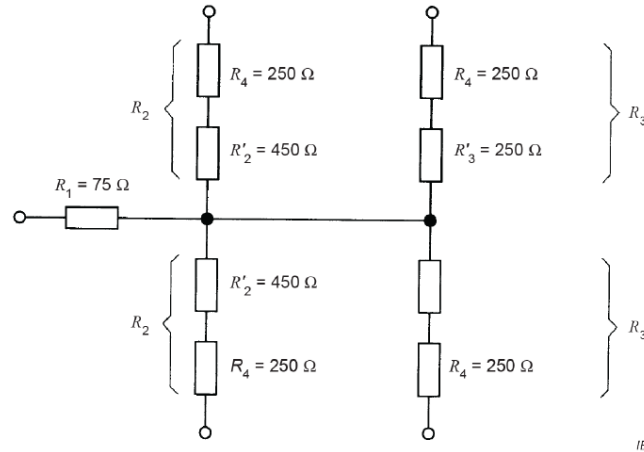


Figura 1.10: Impedenza totale del corpo di bovini

Nella figura 1.10 le resistenze indicate rappresentano le impedenze parziali di:

- R_1 : testa
- R_2 : zampa anteriore
- R_3 : zampa posteriore
- R_4 : zoccolo

1.3.2 Valori della resistenza iniziale

Non sono state eseguite prove per ricavare un valore di resistenza iniziale, non sono quindi disponibili valori reali. I valori riportati sono ricavati con una stima basata sulle misure di R_0 eseguite sull'essere umano, conoscendo il rapporto tra l'impedenza totale del corpo umano e la sua resistenza iniziale ed assumendo che questo sia uguale anche nel caso del bestiame, si ottengono i seguenti valori:

- Percorso naso-zampe: $R_0=175 \Omega$
- Percorso zampe anteriori-zampe posteriori: $R_0=450 \Omega$

Capitolo 2

Effetti della corrente elettrica aspetti generali

Al passaggio di corrente elettrica attraverso il corpo di un organismo vivente sono associati degli effetti fisiologici causati dal fatto che, ogni funzione fisiologica è controllata da piccoli impulsi elettrici i quali possono venire disturbati da un flusso di corrente esterna.

Questi effetti si intensificano all'aumentare dell'intensità e del tempo di esposizione alla corrente esterna, fino a risultare letali.

Dall'analisi clinica di incidenti elettrici ed esperimenti su animali, si possono definire delle soglie entro le quali ci si può aspettare si presentino determinati effetti, particolare attenzione verrà data alla fibrillazione ventricolare la quale è la principale causa di morte negli incidenti elettrici:

- **Soglia di percezione e reazione:** dipende dal percorso della corrente, dalle condizioni di umidità, temperatura e pressione del punto di contatto e dalle caratteristiche fisiologiche dell'individuo.

- **Tetanizzazione e soglia di rilascio:** il flusso di corrente elettrica esterno, se di intensità sufficientemente elevata, può provocare la contrazione involontaria dei muscoli (tetanizzazione) forzando così la vittima di un incidente elettrico a rimanere in contatto con la parte in tensione.

La soglia massima alla quale è ancora possibile controllare i muscoli (soglia di rilascio) dipende dal punto di contatto, dalla forma e dimensione della parte toccata e dalle caratteristiche fisiologiche dell'individuo.

Quanto detto vale nel caso di corrente alternata, per la corrente continua non è definibile una soglia di rilascio, in quanto il passaggio di corrente viene avvertito solo in caso di inizio o fine conduzione ed è accompagnato da contrazioni del muscolo, anche dolorose, per correnti elevate.

- **Soglia di fibrillazione ventricolare:** l'attività cardiaca è regolata da impulsi elettrici generati internamente al cuore nel nodo senoatriale, se disturbati da una corrente esterna sufficientemente elevata e per un tempo sufficientemente lungo portano i ventricoli¹ a contrarsi in modo scoordinato, questo causa una diminuzione della pressione sanguigna (Figura 2.2) con conseguente arresto cardiaco.

Perché si inneschi la fibrillazione ventricolare il cuore deve essere sollecitato nel tratto vulnerabile del ciclo cardiaco, in cui è elettricamente instabile, con un impulso

¹i ventricoli sono le camere inferiori del cuore, che comprimendosi con un ritmo regolare si occupano di pompare il sangue

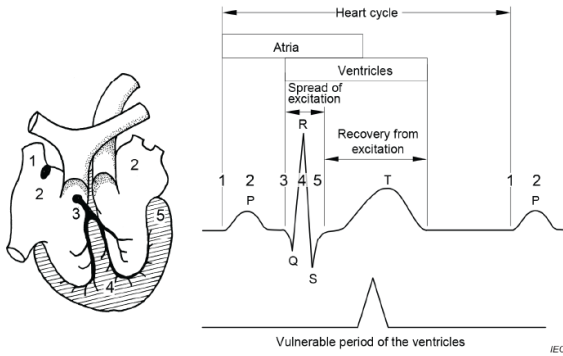


Figura 2.1: Periodo di vulnerabilità dei ventricoli nel ciclo cardiaco

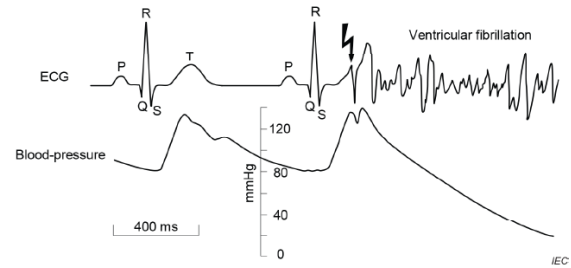


Figura 2.2: Effetti della fibrillazione ventricolare sull'elettrocardiogramma e sulla pressione sanguigna

di corrente di intensità sufficientemente elevata. Questo tratto vulnerabile occupa il 10-20% del ciclo completo e si trova all'inizio del periodo di ripolarizzazione ventricolare (prima parte della curva T in Figura 2.1).

Con un intervento tempestivo la fibrillazione ventricolare è reversibile, il processo con cui si riporta ad una situazione normale il battito cardiaco prevede l'applicazione di brevi impulsi di corrente, distanziati di pochi millisecondi, il cui valore deve essere maggiore del limite superiore di vulnerabilità (ULV upper level of vulnerability), questo processo si chiama defibrillazione.

La soglia entro la quale non si presenta fibrillazione dipende quindi da intensità e durata del flusso di corrente, ma anche dal percorso che essa prende all'interno del corpo.

Inoltre potrebbero esserci dei soggetti più vulnerabili alla fibrillazione, questo dipenderà dalle caratteristiche fisiche e di salute del singolo individuo.

2.1 Effetti della corrente sul corpo umano

Di seguito vengono riportate le soglie di sicurezza per i casi di infortuni elettrici più comuni, i valori sono ricavati, come anticipato, da esperimenti su animali ed osservazioni cliniche di incidenti elettrici. Questi valori sono estremamente conservativi e possono essere applicati ad adulti e bambini che si trovano in condizioni fisiologiche normali.

2.1.1 Effetti della corrente alternata sinusoidale a frequenze tra 15-100 Hz

Per il caso di corrente alternata sinusoidale, gli studi sugli effetti nel corpo umano sono stati eseguiti per frequenze di 50/60 Hz, ma le soglie riportate sono applicabili fino a in un intervallo da 10 a 100 Hz. Dal diagramma di Figura 2.3 si possono individuare le soglie degli effetti precedentemente discussi al variare dell'intensità e del tempo di esposizione alla corrente. Queste soglie delimitano delle zone descritte nella Tabella 2.1.

2.1.2 Effetti della corrente continua

Allo stesso modo della corrente alternata sinusoidale si possono individuare le soglie che delimitano gli effetti nel diagramma tempo/corrente di Figura 2.4, le descrizioni delle varie zone sono riportate nella Tabella 2.2.

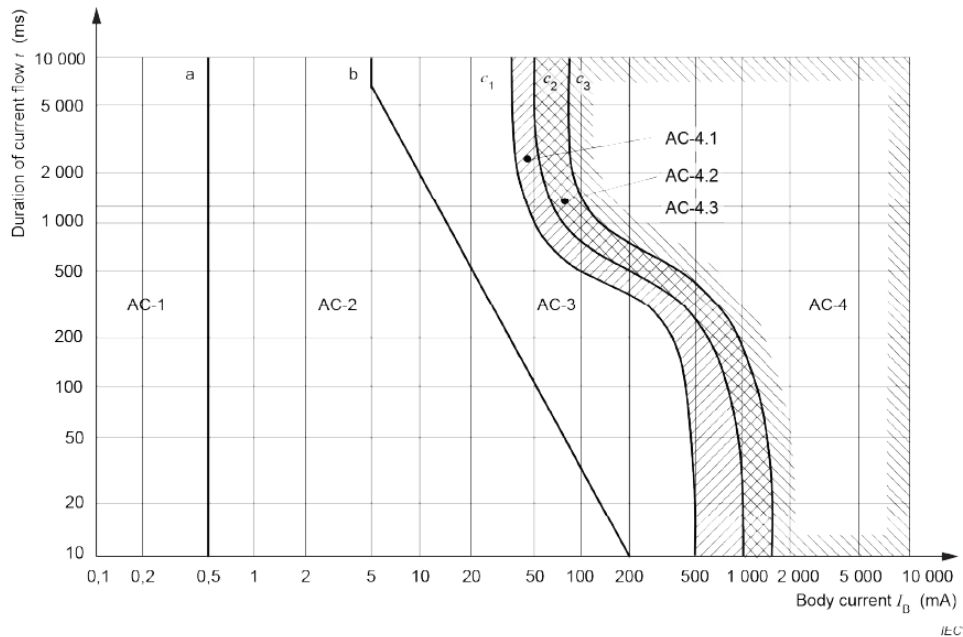


Figura 2.3: Diagramma tempo/corrente per corrente alternata, percorso mano sinistra-piedi

Zone	Limiti	Effetti fisiologici
AC-1	fino a 0.5 mA, curva a	Nessuna reazione con possibile percezione del passaggio di corrente.
AC-2	da curva a fino a curva b	Passaggio di corrente percepito con possibili contrazioni muscolari involontarie ma senza effetti fisiologici dannosi.
AC-3	da curva b a curva c_1	Forti contrazioni muscolari involontarie, difficoltà respiratorie, disturbi reversibili delle funzioni cardiache, possibile immobilizzazione. Questi effetti aumentano di intensità all'aumentare della corrente, ma solitamente non si presentano danni ai tessuti organici.
AC-4	dopo la curva c_1 da curva c_1 a curva c_2 da curva c_2 a curva c_3 dopo la curva c_3	Possono presentarsi effetti fisiopatologici quali arresto cardiaco, arresto respiratorio e ustioni o altri danni al tessuto cellulare. La probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta all'aumentare della corrente e del tempo. AC-4.1 Probabilità di fibrillazione ventricolare aumentata del 5%. AC-4.2 Probabilità di fibrillazione ventricolare aumentata del 50%. AC-4.3 Probabilità di fibrillazione ventricolare aumentata oltre il 50%.

Tabella 2.1: Descrizione delle zone nel grafico tempo/corrente per corrente alternata percorso mano-piede

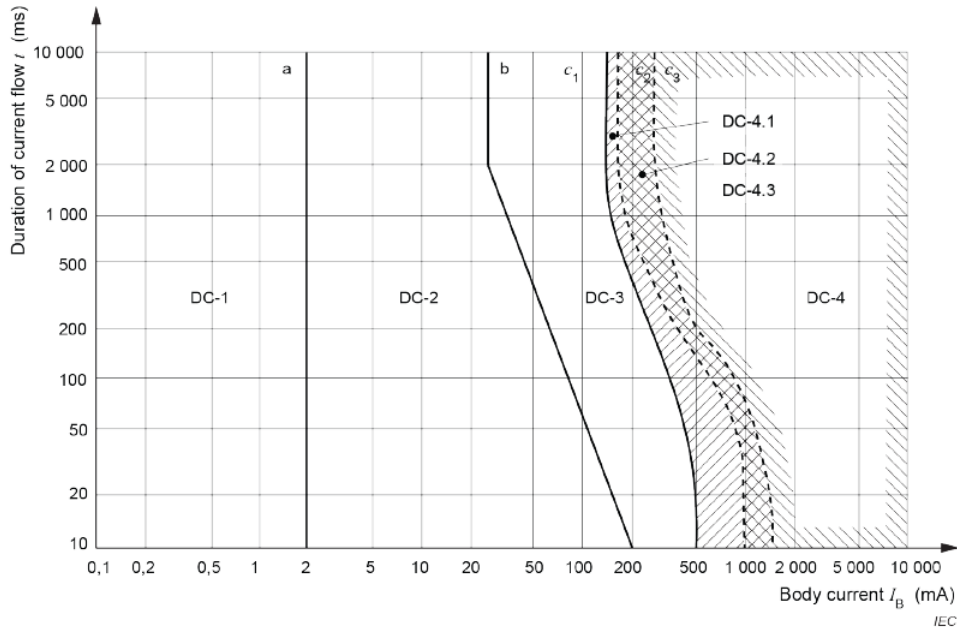


Figura 2.4: Diagramma tempo/corrente per corrente continua, percorso mano sinistra-piedi

Zone	Limiti	Effetti fisiologici
DC-1	fino a 2 mA, curva a	Lieve sensazione come di puntura nel caso di inizio, fine o rapido cambiamento del flusso di corrente.
DC-2	da curva a fino a curva b	Probabili contrazioni muscolari involontarie specialmente nel caso di inizio, fine o rapido cambiamento del flusso di corrente. Non si presentano effetti fisiologici dannosi.
DC-3	da curva b a curva c	Forti contrazioni muscolari involontarie e disturbi reversibili alla formazione e conduzione di impulsi nel cuore, questi effetti aumentano di intensità all'aumentare della corrente. Solitamente non si presentano danni ai tessuti organici.
DC-4	dopo la curva c_1 da curva c_1 a curva c_2 da curva c_2 a curva c_3 dopo la curva c_3	Possono presentarsi effetti fisiopatologici quali arresto cardiaco, arresto respiratorio e ustioni o altri danni al tessuto cellulare. La probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta all'aumentare della corrente e del tempo. DC-4.1 Probabilità di fibrillazione ventricolare aumentata del 5%. DC-4.2 Probabilità di fibrillazione ventricolare aumentata del 50%. DC-4.3 Probabilità di fibrillazione ventricolare aumentata oltre il 50%.

Tabella 2.2: Descrizione delle zone nel grafico tempo/corrente per corrente continua percorso mano-piede

2.1.3 Fattore di percorso

I diagrammi tempo/corrente precedentemente riportati sono relativi al percorso della corrente mano sinistra-piedi, le soglie indicate perciò saranno valide solo per quel percorso. È vero però che della corrente totale attraverso il corpo umano, ovvero la corrente misurata per ricavare i grafici di Figura 2.3 e 2.4, non tutta passerà per il cuore, ci saranno dei percorsi in cui la densità di corrente nel cuore sarà più alta rispetto ad altri.

Viene quindi definito un **Fattore di percorso** F che è da prendere come una stima della pericolosità relativa dei vari percorsi che può prendere la corrente, confrontati con il percorso mano sinistra-piedi:

$$I_h = \frac{I_{REF}}{F}$$

in cui I_h è la corrente che attraversa il corpo per i percorsi dati in Tabella 2.3 e I_{REF} è la corrente tramite il percorso mano sinistra-piedi.

Percorso della corrente	Fattore di percorso F
Mano sinistra-piede sinistro, destro o entrambi	1,0
Entrambe le mani-entrambi i piedi	1,0
Mano destra-mano sinistra	0,4
Mano destra-piede sinistro, destro o entrambi	0,8
Schiena-mano destra	0,3
Schiena-mano sinistra	0,7
Petto-mano destra	1,3
Petto-mano sinistra	1,5
Glutei-mano sinistra, destra o entrambe	0,7
Piede sinistro-piede destro	0,04

Tabella 2.3: Fattore di percorso per diversi percorsi

2.1.4 Altri effetti della corrente

In aggiunta agli effetti descritti nelle sezioni precedenti possono verificarsi altre forme di arresto cardiaco oltre alla fibrillazione ventricolare (come l'asistolia) e danneggiamento dei percorsi di connessione dei neuroni collegati a funzioni vitali.

Campi elettrici di elevata intensità (si possono presentare ad esempio a causa di un breve contatto con una linea di distribuzione ad alta tensione) possono danneggiare le cellule, questo effetto è più marcato nelle cellule lunghe e strette come, ad esempio, quelle dei muscoli. Il campo elettrico elevato applicato alla cellula può indurre la formazione di pori nel tessuto muscolare (elettroporazione) che possono allargarsi fino alla lacerazione completa della membrana, con successivi danni irreversibili al muscolo.

Il passaggio di corrente continua all'interno di un corpo può provocare l'elettrolisi del sangue, ciò comporta la formazione di bolle di gas all'interno dei vasi sanguigni, ovvero l'embolia gassosa. Questa provoca sintomi simili alla patologia da decompressione² come ad esempio disturbi cardiaci, vertigini, disorientamento e visione offuscata.

Questo effetto elettrolitico si presenta esclusivamente per la corrente continua, infatti

²patologia che si presenta quando un individuo è soggetto ad una rapida riduzione della pressione ambientale, ne sarà ad esempio soggetto un sub che risale rapidamente da una grande profondità

l'elettrolisi non è possibile per correnti alternate, e non influisce particolarmente sulle soglie di pericolosità in quanto la conduzione di corrente all'interno del corpo deve essere sostenuta per un tempo sufficientemente lungo, maggiore di quanto già definito per le soglie descritte, in particolare con riferimento alla tetanizzazione.

Nei punti di ingresso ed uscita della corrente si possono presentare ustioni, le quali sono superficiali o profonde (fino ad arrivare alla necrosi del tessuto interessato) a seconda dell'intensità del flusso e dalla durata di esposizione ad esso, si possono inoltre presentare lesioni agli organi interni attraverso i quali scorre la corrente.

2.1.5 Effetti della corrente sulla pelle

Sono stati analizzati più nel dettaglio gli effetti della corrente sulla pelle al variare della densità di corrente e del tempo di esposizione ad essa, dalla Figura 2.5 si possono individuare le seguenti zone:

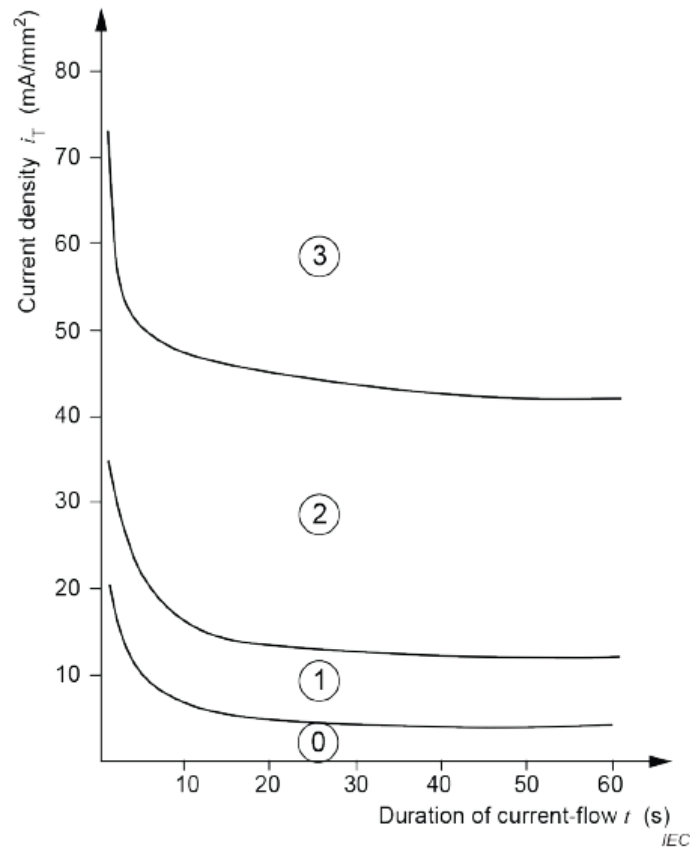


Figura 2.5: Alterazione della pelle in funzione della densità di corrente e del tempo di esposizione

0. Non si osserva nessun cambiamento della pelle, per periodi di esposizione prolungati la pelle sotto l'elettrodo prende una colorazione grigio pallido.
1. Arrossamento della pelle con rigonfiamento di colore biancastro lungo i bordi dell'elettrodo.
2. La pelle sotto l'elettrodo prende una colorazione marrone, per periodi di esposizione prolungati si osservano vesciche attorno all'elettrodo.

3. Carbonizzazione della pelle.

NOTA Per aree di contatto sufficientemente grandi la densità di corrente può essere abbastanza bassa da non provocare danni alla pelle, seppure l'intensità di corrente possa risultare fatale.

2.2 Effetti della corrente sul bestiame

Per il caso degli animali non sono stati eseguiti studi approfonditi, sono limitati all'analisi degli effetti della corrente alternata sinusoidale a 50/60 Hz per solo alcune specie di animali da allevamento, i seguenti risultati sono validi in un range di frequenze da 15 Hz a 100 Hz. Come per l'uomo il centro dell'attenzione è la fibrillazione ventricolare, dalle prove fatte sono state ricavate delle soglie minime di corrente dopo un tempo fisso di 3 secondi, i dati sono riportati in Tabella 2.4:

Specie	Peso medio		Corrente di fibrillazione minima	
	Corpo [Kg]	Cuore [g]	Media [A]	Intervallo [A]
Maiale	79	300	0,24	0,17 a 0,27
Pecora	56	270	0,25	0,16 a 0,39
Vitello	70	420	0,31	0,21 a 0,47
Pony	115	-	0,3	0,16 a 0,41

Tabella 2.4: Soglie di fibrillazione ventricolare di alcune specie animali per corrente alternata

Per shock più prolungati ci si può aspettare che queste soglie siano a correnti più basse.

Capitolo 3

Effetti della corrente elettrica aspetti speciali

Nel capitolo precedente ci si è concentrati sulle forme di corrente con cui è più probabile entrare in contatto, verranno ora invece descritti gli effetti del passaggio di correnti ad elevate frequenze, correnti con forme d'onda diverse dalla sinusoidale e verrà analizzato il caso particolare in cui l'elettrocuzione avviene in acqua.

Quanto segue si ritiene applicabile esclusivamente all'essere umano.

3.1 Corrente alternata per frequenze superiori a 100 Hz

Per queste frequenze non sono disponibili molti dati sperimentali, quanto ottenuto inoltre è espresso in relazione agli studi condotti per correnti alternate alla frequenza di 50/60 Hz tramite il **fattore di frequenza F_f** , dato da:

$$F_f = \frac{I_{S_h}}{I_{S_{REF}}}$$

in cui I_{S_h} è la soglia di corrente per un determinato effetto fisiologico di una determinata corrente alternata a frequenza f , mentre $I_{S_{REF}}$ è la soglia per quello stesso effetto per una corrente a 50/60 Hz.

Più alto sarà il valore di F_f e più alta sarà la soglia di corrente per un certo effetto fisiologico causato da una determinata corrente alternata con frequenza maggiore di 100 Hz, si può quindi in generale assumere che più alto sarà il fattore di frequenza e meno pericolosa sarà la corrente al quale è associato.

Inoltre si ricorda che, essendo l'impedenza della pelle parzialmente capacitiva, essa calerà in modo inversamente proporzionale all'aumentare della frequenza, fino a che l'impedenza totale del corpo umano non sarà composta esclusivamente da quella interna.

Verranno ora forniti i fattori di frequenza per le soglie degli effetti fisiologici visti nel capitolo precedente, per determinati intervalli di frequenze:

3.1.1 Intervallo di frequenze da 100 Hz a 1 KHz

Soglia di percezione e soglia di rilascio

I fattori di frequenza per le soglie di percezione e di rilascio vengono forniti nelle figure 3.1 e 3.2 rispettivamente.

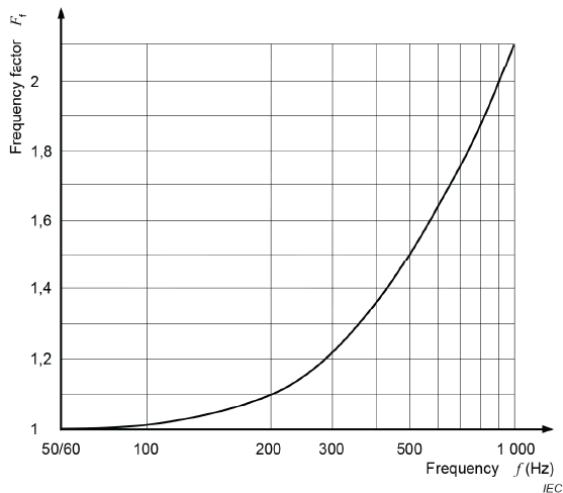


Figura 3.1: Variazione della soglia di percezione nel range 50/60-1000 Hz

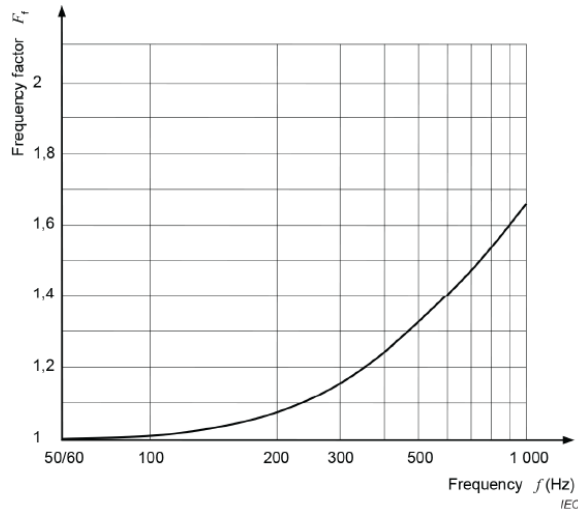


Figura 3.2: Variazione della soglia di rilascio nel range 50/60-1000 Hz

Soglia di fibrillazione ventricolare

Il fattore di frequenza per la soglia di fibrillazione ventricolare è dato in Figura 3.3, questo vale per correnti con percorso mano-mano per una durata di esposizione superiore ad un ciclo cardiaco (non sono disponibili dati sperimentali sulla dipendenza della frequenza per durate inferiori ad un ciclo).

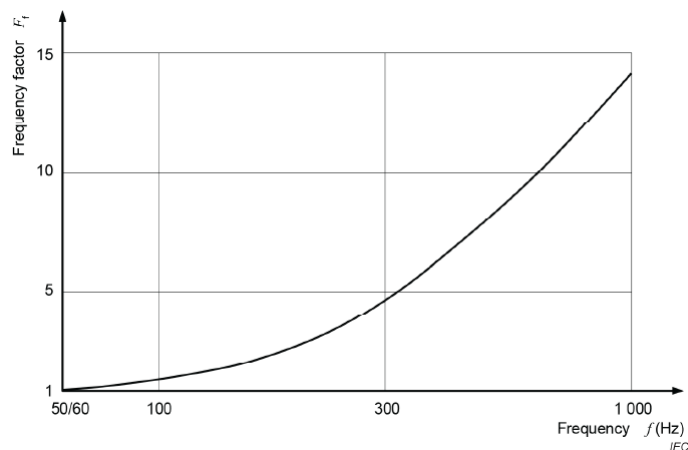


Figura 3.3: Variazione della soglia di fibrillazione ventricolare nel range 50/60-1000 Hz

3.1.2 Frequenze superiori ad 1 KHz

All'aumentare della frequenza il fattore di frequenza tenderà a crescere, questo implica che anche le soglie degli effetti fisiologici saranno a correnti più elevate. Ciò è dovuto al fatto che ad alte frequenze la corrente non penetra all'interno del corpo, ma tende a stare in superficie (effetto pelle) portando ad altri effetti dannosi non relativi alla fibrillazione.

Soglia di percezione e soglia di rilascio

Le soglie di percezione e rilascio vengono fornite in un intervallo da 1 a 10 KHz, nelle Figure 3.4 e 3.5 rispettivamente.

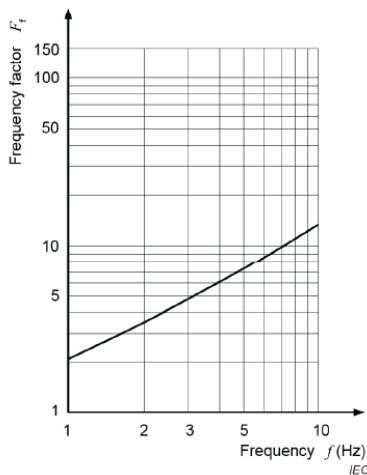


Figura 3.4: Variazione della soglia di percezione nel range 1-10 KHz

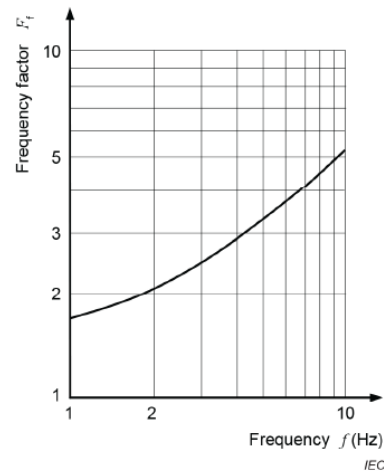


Figura 3.5: Variazione della soglia di rilascio nel range 1-10 KHz

Soglia di fibrillazione ventricolare

La soglia di fibrillazione ventricolare, data l'elevata dannosità, viene fornita in un intervallo più esteso di frequenze che arriva fino a 150 KHz. In Figura 3.6 sono dati i valori del fattore di frequenza ricavati per un percorso mano-mano e durata di esposizione superiore ad un ciclo cardiaco.

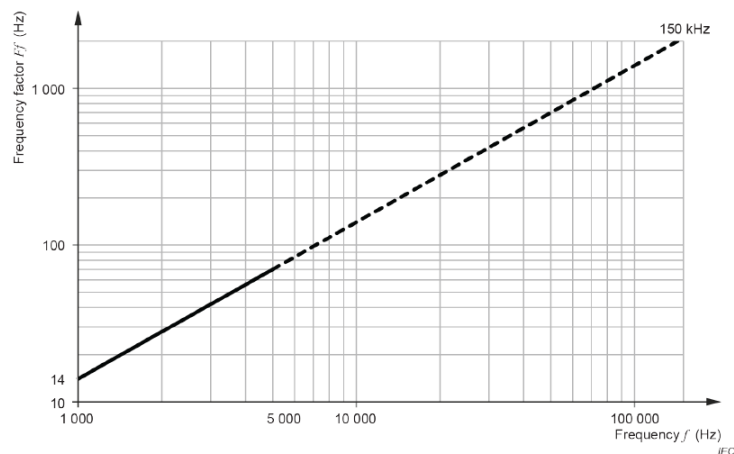


Figura 3.6: Variazione della soglia di fibrillazione ventricolare nel range 1-150 KHz

Effetti termici

Per frequenze elevate sono gli effetti termici a diventare la fonte di pericolo dominante, quindi per frequenze e correnti sufficientemente elevate (indicativamente sopra 100 KHz e corrente nell'ordine dell'ampere) si possono presentare ustioni superficiali che sono più o meno severe a seconda della durata di esposizione.

3.1.3 Stima della soglia di fibrillazione equivalente per correnti con componenti a frequenze miste

Per correnti con diversi contributi di frequenza, la soglia di fibrillazione ventricolare può essere stimata come equivalente a quella di una corrente sinusoidale pura avente le seguenti caratteristiche:

- frequenza uguale alla fondamentale della corrente con frequenze miste;
- valore efficace I_{ev} uguale alla somma quadratica del valore di picco di corrente I_i delle diverse componenti, pesate con il loro relativo fattore di frequenza F_i , ricavato dalla Figura 3.3

$$I_{ev} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i}{F_i}\right)^2}$$

La relazione presentata è una stima grossolana che combina frequenza per frequenza le componenti, considerando solo la relazione tra valore di picco e valore efficace (dato che il fattore di frequenza è ricavato con il valore efficace) della corrente composta totale. Per individuare con precisione la soglia di fibrillazione bisognerebbe tenere conto anche delle relazioni tra gli angoli di fase delle diverse componenti.

3.2 Corrente con forme d'onda particolari

Fin'ora quando si è parlato di corrente alternata si è fatto riferimento a forme d'onda sinusoidali, per cui le soglie sono state fornite come valori efficaci di corrente.

Per quanto riguarda invece forme d'onda non sinusoidali è più rilevante valutare i valori di picco della corrente, da notare che l'uso dei valori di picco è ugualmente valido anche per correnti sinusoidali, infatti gli effetti fisiologici causati da una corrente alternata sinusoidale ed una non sinusoidale con lo stesso valore di picco, sono comparabili.

Anche in questo caso gli effetti del passaggio della corrente attraverso il corpo sono gli stessi visti in precedenza, si possono quindi fare dei paralleli tra corrente con forma d'onda particolare e sinusoidale pura.

In generale ci si può aspettare che una corrente particolare abbia lo stesso effetto di una sinusoidale pura quando:

- il valore di picco della corrente non sinusoidale è equivalente al valore di picco della corrente sinusoidale;
- i periodi delle due forme d'onda sono equivalenti.

Quanto segue vale per un range di frequenza da 15 a 100 Hz.

3.2.1 Corrente alternata con componente continua

Soglia di rilascio

Dipende da diversi parametri come l'area di contatto, la forma e dimensione dell'elettrodo e dalle caratteristiche fisiologiche dell'individuo.

La soglia di rilascio, espressa come valore di picco in mA, della corrente composta si ricava dalla seguente relazione:

$$I_{AC_P} = 7,176 \cdot e^{-0,1434 \cdot DC} - 0,1061 \quad (3.1)$$

in cui I_{AC_P} è il valore di picco della componente alternata e DC è il valore della componente continua in mA.

La 3.1 è stata estrapolata dalla curva in Figura 3.7, quest'ultima è una stima derivata da una serie di test eseguiti con combinazioni di correnti continue e alternate sinusoidali a frequenza di 60 Hz. Questa stima è del tutto conservativa, la relazione 3.1 può quindi essere usata per calcolare la soglia di rilascio, negli intervalli di corrente continua ed alternata specificati nella figura, per individui di ogni età.

Il range di applicazione della 3.1 è ristretto a combinazioni di corrente continua da 0 a 30 mA¹ e corrente alternata sinusoidale con valori di picco da 0 a 7,07 mA².

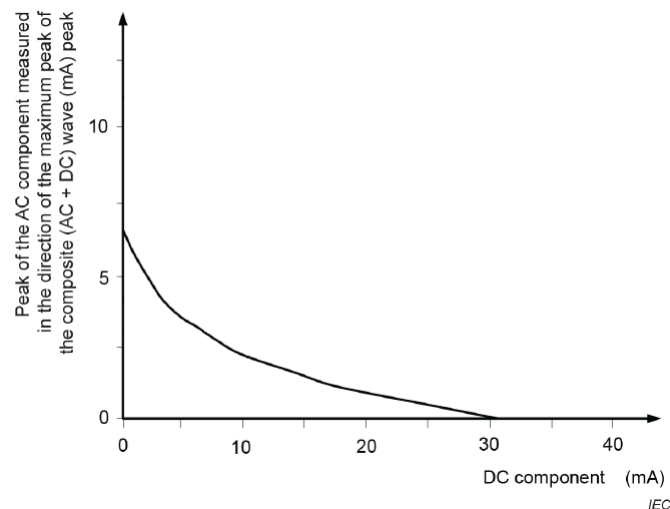


Figura 3.7: Soglia di rilascio per combinazioni di corrente alternata sinusoidale e corrente continua

Soglia di fibrillazione ventricolare

Il pericolo di fibrillazione è da considerarsi uguale rispetto ad una corrente sinusoidale equivalente, con valore efficace I_{ev} , che ha le seguenti caratteristiche:

- per una durata dell'esposizione maggiore di 1,5 cicli cardiaci la corrente equivalente ha lo stesso valore picco-picco I_{pp} della corrente composta, quindi $I_{ev} = \frac{I_{pp}}{2\sqrt{2}}$;

¹ovvero il valore minimo della soglia di rilascio ricavato per corrente continua pura dalla Figura 2.4

²ovvero il valore minimo della soglia di rilascio ricavato per corrente sinusoidale pura dalla Figura 2.3 moltiplicato per $\sqrt{2}$, dato che si vuole ottenere il valore di picco della sinusoide

- per una durata dell'esposizione minore di 0,75 cicli cardiaci la corrente equivalente ha lo stesso valore di picco I_p della corrente composta, quindi $I_{ev} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$;
- per una durata compresa tra 0,75 e 1,5 cicli cardiaci si ha una transizione tra i due casi precedenti, la cui natura non è ancora chiara ed è soggetta a studi.

3.2.2 Corrente alternata con controllo di fase

Il controllo di fase permette di regolare il valore efficace di una tensione alternata sinusoidale, regolando di conseguenza la corrente di contatto, ritardando l'innesco dell'onda di una quantità pari all'angolo α .

Questo tipo di forma d'onda si può trovare ad esempio in circuiti dotati di TRIAC.

In Figura 3.8 sono riportati due esempi di controllo di fase simmetrico con ritardi di 60° e 150° .

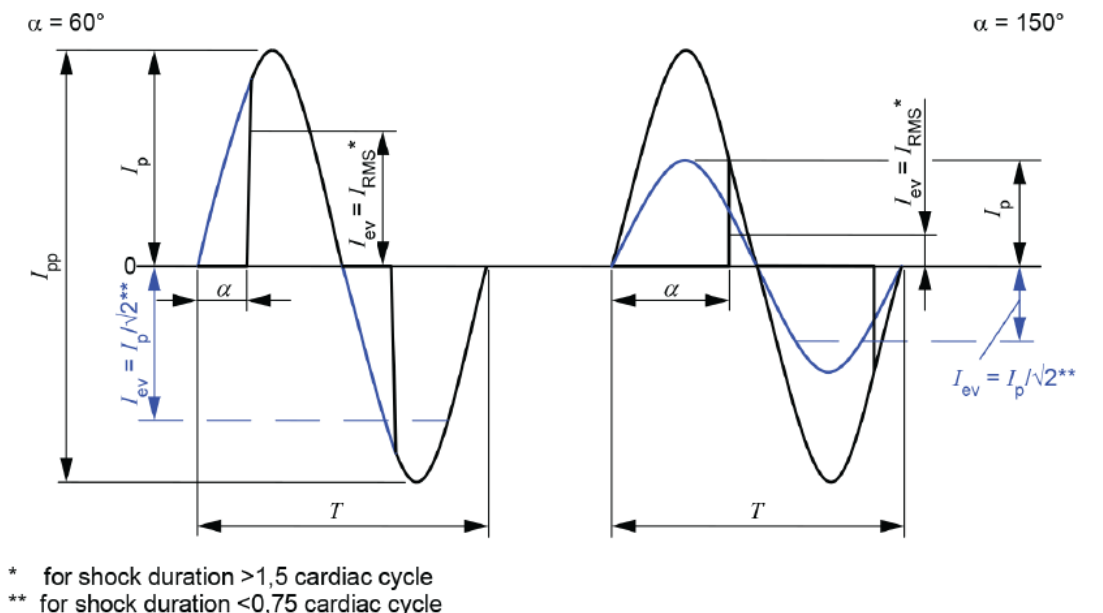


Figura 3.8: Corrente sinusoidale con controllo di fase simmetrico

Soglia di rilascio

Come visto in precedenza dipende da diversi fattori, in generale ci si può aspettare che una corrente con controllo di fase abbia lo stesso effetto, per quanto riguarda la perdita di controllo dei muscoli, di una sinusoidale pura se entrambe hanno lo stesso valore di picco.

Soglia di fibrillazione ventricolare

Il pericolo di fibrillazione è da considerarsi circa uguale rispetto ad una corrente sinusoidale equivalente, con valore efficace I_{ev} , che ha le seguenti caratteristiche:

- per una durata dell'esposizione maggiore di 1,5 cicli cardiaci I_{ev} è anche il valore efficace della corrente con controllo di fase;

- per una durata dell'esposizione minore di 0,75 cicli cardiaci I_{ev} è il valore efficace di una corrente sinusoidale (indicata in blu nella Figura 3.8) avente lo stesso valore di picco della corrente con controllo di fase;
- per una durata compresa tra 0,75 e 1,5 cicli cardiaci si ha una transizione tra i due casi precedenti.

3.2.3 Corrente alternata con controllo multiciclo

Con un controllo multiciclo è possibile variare, all'interno di un periodo T , la durata del tempo in cui un segnale di tensione è in conduzione, variando così gli intervalli di conduzione di corrente. Ciò è possibile modificando il **grado di controllo** p , il quale è dato dal rapporto:

$$p = \frac{t_s}{T}$$

in cui t_s è l'intervallo di conduzione e T è il periodo completo.

Soglia di rilascio

Vale quanto detto nella sezione precedente, quindi è necessario osservare il valore di picco della corrente controllata.

Soglia di fibrillazione ventricolare

Dipende dalla durata dell'esposizione alla corrente e dal grado di controllo p .

Nella Figura 3.9, ottenuta da esperimenti su maiali, si può osservare la relazione tra tempo di esposizione alla corrente (espresso in cicli cardiaci) e grado di controllo p , con la corrente efficace media I_{BRMS} che scorre all'interno del corpo e che provoca fibrillazione.

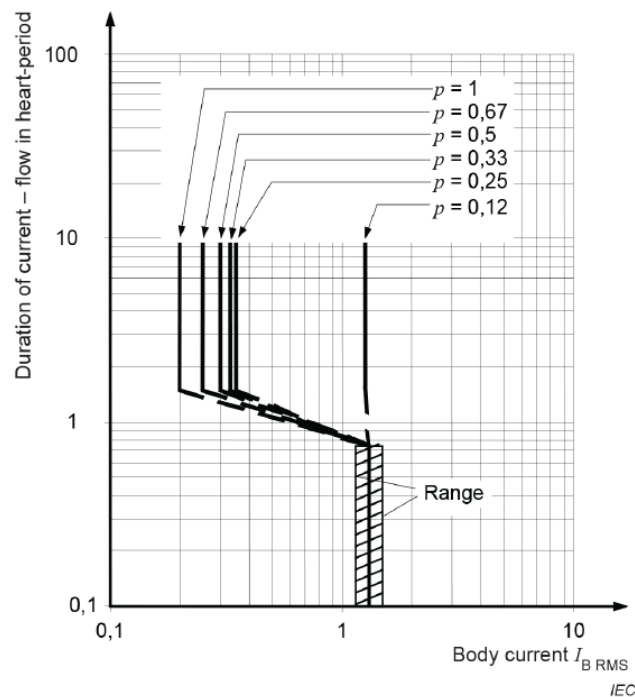
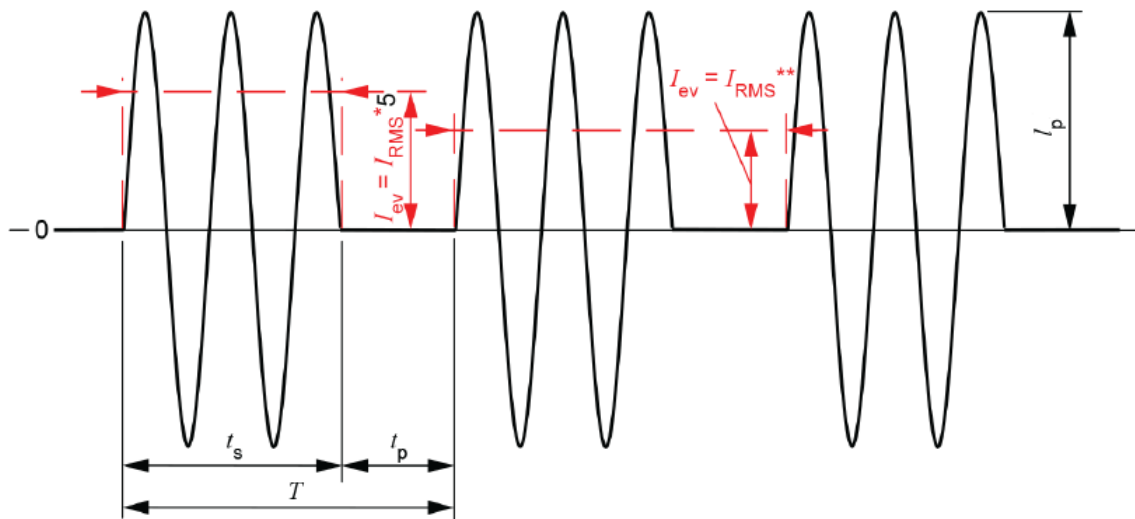


Figura 3.9: Soglia di fibrillazione ventricolare per correnti con controllo multiciclo

Dalla Figura 3.9, anche se ottenuta da esperimenti su animali, si possono fare delle osservazioni valide per l'uomo:

- per una durata dell'esposizione maggiore di 1,5 cicli cardiaci, la soglia di fibrillazione dipende da p .
Per $p \simeq 1$ la soglia è la stessa della forma d'onda sinusoidale pura, mentre per $p \simeq 0,1$ la soglia è la stessa rispetto al caso con durata di esposizione alla corrente minore di 0,75 cicli cardiaci e p qualsiasi;
- per una durata dell'esposizione minore di 0,75 cicli cardiaci la soglia di fibrillazione non è più influenzata da p , la si considererà uguale a quella di una corrente sinusoidale, applicata per 0,1 secondi, la quale ha lo stesso valore efficace della corrente con controllo multiciclo.

In Figura 3.10 sono indicati in rosso i valori efficaci che dovrebbe avere una corrente sinusoidale equivalente per provocare lo stesso effetto della corrente controllata, ovvero fibrillazione ventricolare, per entrambi i casi della durata di esposizione.



* for shock duration $>1,5$ cardiac cycle and $p \ll 1$ or shock duration $< 0,75$ cardiac cycle

** for shock duration $< 0,75$ cardiac cycle

IEC

Figura 3.10: Corrente con controllo multiciclo

3.2.4 Scariche di impulsi di corrente

Un singolo impulso di corrente non provoca fibrillazione ventricolare se la combinazione tra intensità e durata rimane sotto la soglia della curva c_1 , definita nelle Figure 2.3 e 2.4, inoltre non si avrà perdita prolungata del controllo dei muscoli, quindi non appena viene avvertita la presenza di corrente l'impulso è generalmente terminato ed è possibile il rilascio della sorgente di corrente.

Scariche di più impulsi, anche se singolarmente rientranti nella soglia definita dalla curva c_1 , possono sovrapporre i loro effetti e creare disturbi in particolare nel cuore. Gli effetti di questi impulsi si sovrappongono se sono separati da meno di 300 ms, possono così portare alla fibrillazione se vanno a sollecitare il cuore in modo da provocare una risposta ventricolare.

Soglia di fibrillazione ventricolare per impulsi separati da meno di 300 ms

In questo caso si vengono a formare dei fronti d'onda di attivazione dell'attività cardiaca, i quali saranno sempre più eterogenei. L'effetto cumulativo di questi fronti è quello di spezzare le onde necessarie all'attività cardiaca in onde più piccole, fino ad innescare la fibrillazione ventricolare.

La soglia di fibrillazione varierà a seconda del numero di impulsi che attraversano il cuore, se l'intensità e la durata di questi impulsi non supera singolarmente la curva c_1 la soglia si abbasserà di una certa percentuale, rispetto a quella indicata nelle Figure 2.3 e 2.4, per ogni impulso successivo.

Nella Tabella 3.1 è indicata l'entità della diminuzione della soglia nel caso peggiorativo in cui gli impulsi sono separati da meno di 100 ms:

	Stima della percentuale della soglia di fibrillazione [%]
Primo impulso di corrente	100
Secondo impulso di corrente	65
Terzo impulso di corrente	42
Quarto impulso di corrente	27
Quinto impulso di corrente	18
Sesto impulso di corrente	12
Settimo impulso di corrente	10 o meno

Tabella 3.1: Stime delle soglie di fibrillazione ventricolare per impulsi separati da meno di 100 ms

3.2.5 Singoli impulsi unidirezionali di corrente di breve durata

Questa sezione si concentrerà sugli impulsi con forme d'onda di interesse tecnico in un range di durata da 0,1 a 10 ms.

Le forme d'onda considerate sono l'impulso rettangolare (a), l'impulso sinusoidale unidirezionale (b) e la scarica di un condensatore con costante di tempo T (c), rappresentate in Figura 3.11.

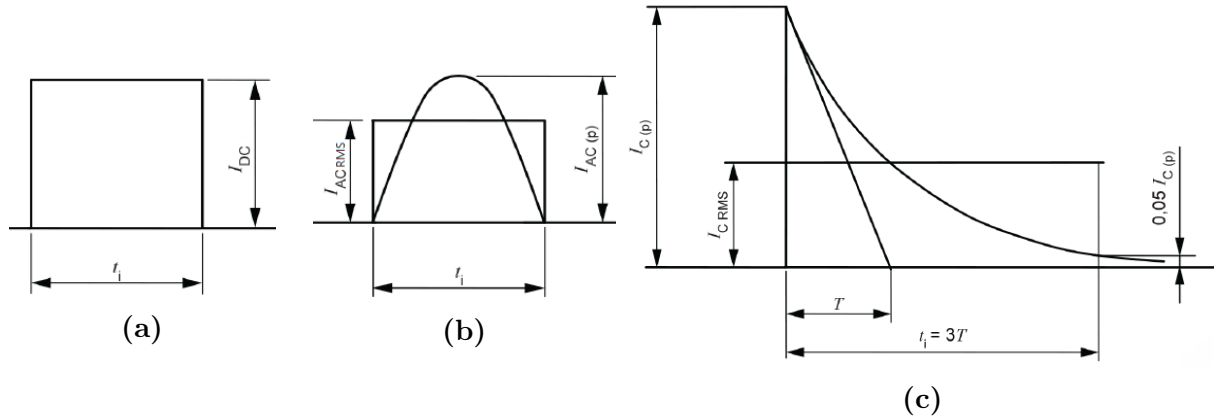


Figura 3.11: Forme d'onda degli impulsi considerati

Energia di fibrillazione specifica

Dalla ricerca scientifica si è osservato che il fattore scatenante principale della fibrillazione per singoli impulsi di breve durata è l'**energia di fibrillazione specifica** F_e , ovvero il minimo valore $I^2 \cdot t$ che causa fibrillazione per un singolo impulso unidirezionale. L'energia di fibrillazione per le diverse forme d'onda si ricava con le seguenti relazioni:

- per un impulso rettangolare $F_e = I_{DC}^2 \cdot t_i$;
- per un impulso sinusoidale unidirezionale $F_e = \frac{I_{AC(p)}^2}{2} \cdot t_i = I_{ACRMS}^2 \cdot t_i$, in cui I_{ACRMS} è il valore efficace di corrente dell'impulso sinusoidale;
- per la scarica di un condensatore $F_e = I_{C(p)}^2 \cdot \frac{T}{2} = I_{CRMS}^2 \cdot t_i$, in cui I_{CRMS} è il valore efficace della corrente per una durata di $3T$.

Soglie di percezione e dolore, caso della scarica di un condensatore

Le soglie di percezione e dolore, nel caso particolare della scarica di un condensatore, dipendono dalla forma degli elettrodi, dalla carica dell'impulso e dalla sua corrente di picco. Queste sono riportate nella Figura 3.12 in funzione di tensione e carica del condensatore e sono state ottenute da misure eseguite con elettrodi grandi, percorso mano-mano ed in condizioni asciutte.

Analizzando la figura riportata si possono individuare la Zona A, la quale indica la soglia di percezione, e la Curva B, la quale indica la soglia del dolore.

Inoltre dall'intersezione delle coordinate di capacità (asse diagonale C) e tensione di carica del condensatore è possibile ricavare la carica e l'energia (asse diagonale W) associate all'impulso che provoca una determinata reazione, lette sui rispettivi assi.

In termini di energia specifica la soglia del dolore si trova tra i 50 e i 100 mA²s, per correnti che scorrono da mano a mano ed area di contatto grande.

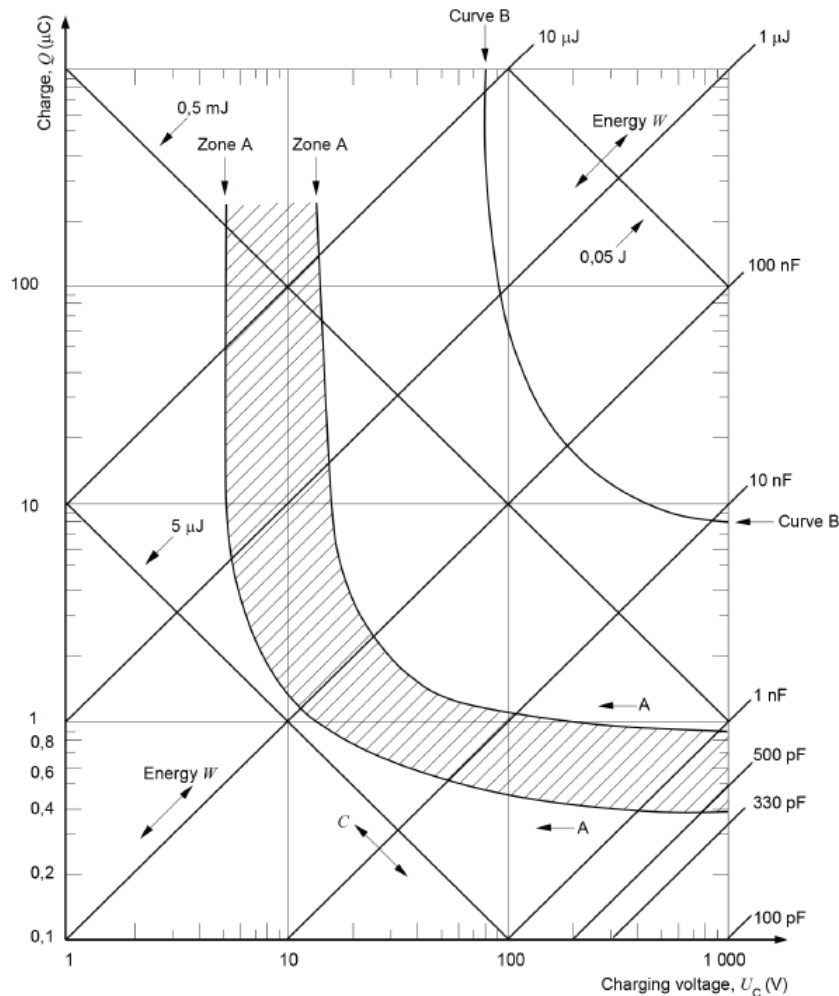


Figura 3.12: Soglie di percezione e dolore per la scarica di un condensatore

Soglia di fibrillazione ventricolare, caso generale

La soglia di fibrillazione ventricolare dipende dalla forma, durata e intensità dell'impulso, dal percorso della corrente attraverso corpo, dalle caratteristiche fisiologiche dell'individuo e dall'istante in cui l'impulso è applicato all'interno del ciclo cardiaco.

A riguardo dell'ultima dipendenza elencata si è osservato da esperimenti su animali che, per impulsi di breve durata e bassa energia, si innesca la fibrillazione solo se l'impulso viene applicato durante il periodo vulnerabile del ciclo cardiaco.

Le soglie di fibrillazione ventricolare vengono fornite in Figura 3.13 e sono rappresentate in termini di valore efficace della corrente che scorre all'interno del corpo attraverso il percorso mano sinistra-piedi. Le curve C_1 , C_2 , C_3 delimitano le seguenti zone:

- Inferiore a C_1 : rischio di fibrillazione ventricolare nullo;
- Compreso tra C_1 e C_2 : rischio di fibrillazione basso, con probabilità fino al 5%;
- Compreso tra C_2 e C_3 : rischi di fibrillazione medio, con probabilità fino al 50%;
- Superiore a C_3 : rischio di fibrillazione alto, con probabilità superiore al 50%;

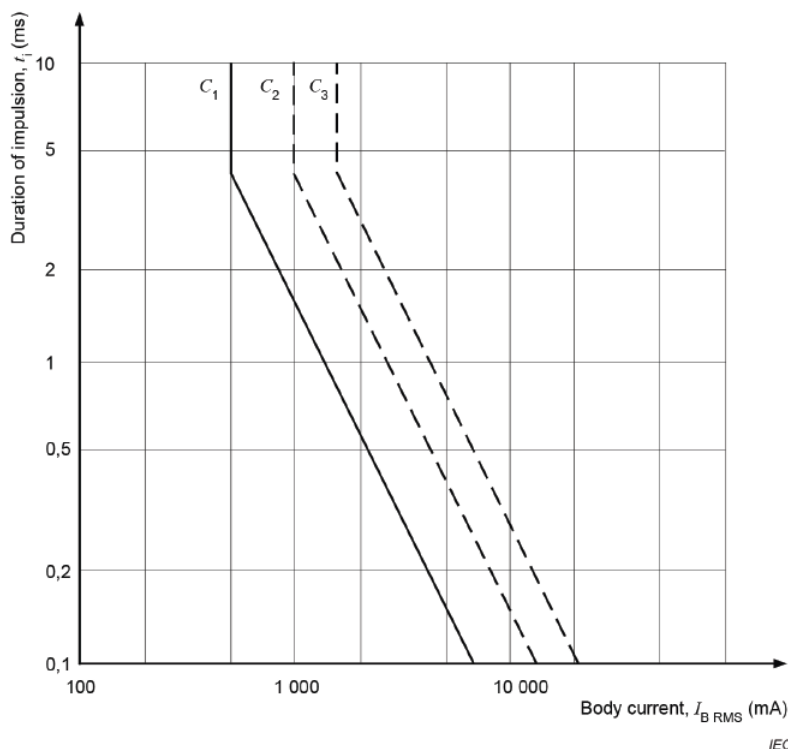


Figura 3.13: Soglie di fibrillazione ventricolare per impulsi di breve durata

3.2.6 Forme d'onda complesse e irregolari

Con forma d'onda complessa ed irregolare si intende un'onda all'interno della quale non si osservano ripetibilità, non è facilmente descrivibile matematicamente e non è facilmente scomponibile con un'analisi in frequenza, viene dato un esempio in Figura 3.14.

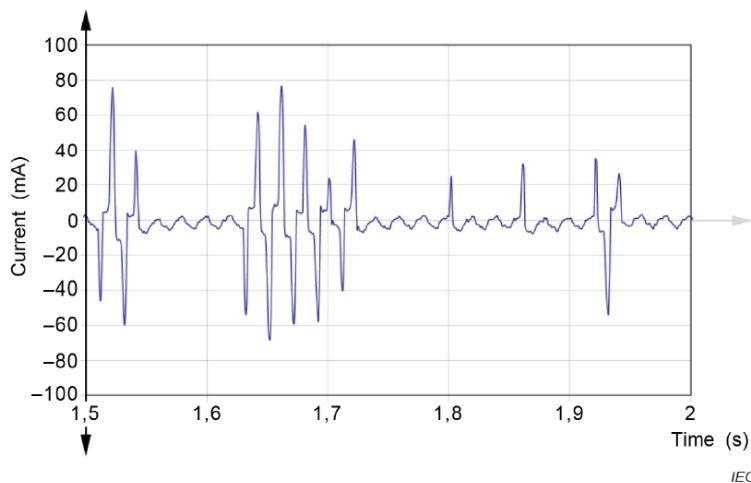


Figura 3.14: Esempio di corrente con forma d'onda complessa ed irregolare

Questo tipo di forme d'onda di corrente non è immediatamente assimilabile a nessuno dei casi discussi fin'ora, è stato perciò sviluppato un metodo iterativo per valutarne la pericolosità il quale da come risultato dei valori di corrente che possono essere inseriti nel già noto grafico valido per corrente alternata sinusoidale di Figura 2.3, ricavando così l'effetto fisiologico provocato.

Il metodo menzionato prevede i seguenti passaggi:

- L'onda viene digitalizzata, si otterranno così una serie di campioni di valori istantanei di corrente separati da un tempo t_s , e filtrata con un filtro passa basso con frequenza di taglio di 100 Hz, dato che il grafico in Figura 2.3 vale fino alla frequenza di 100 Hz;
- All'interno dell'intervallo di tempo N in cui l'onda é campionata viene considerata una finestra di tempo di durata pari a k volte il periodo di campionamento t_s la quale, partendo dall'inizio dell'intervallo, viene fatta traslare avanzando da un campione al successivo, fino a che non vengono considerati tutti i possibili intervallini di durata $k \cdot t_s$ all'interno di N , ovvero fino a che non si raggiunge l' $N - k$ -esimo campione;
- Per ogni finestra k ricavata al punto precedente viene calcolato il valore efficace di corrente e si considera solo il massimo di questi valori, chiamato **corrente probabile**;
- k viene incrementato ed il secondo e terzo punto vengono ripetuti fino a che non si ottengono un numero soddisfacente di valori di corrente;
- Le correnti probabili, ricavate per diverse finestre di durata $k \cdot t_s$, vengono poi assemblate in una curva la quale può essere inserita nella Figura 2.3 per la valutazione dell'effetto fisiologico.

Nella Figura 3.15 si possono vedere due esempi di curve ricavate con il metodo descritto, in particolare vengono evidenziate le soglie di fibrillazione ventricolare e si può notare che, nel primo caso la corrente non provoca effetti letali, mentre nel secondo si avrà fibrillazione ventricolare.

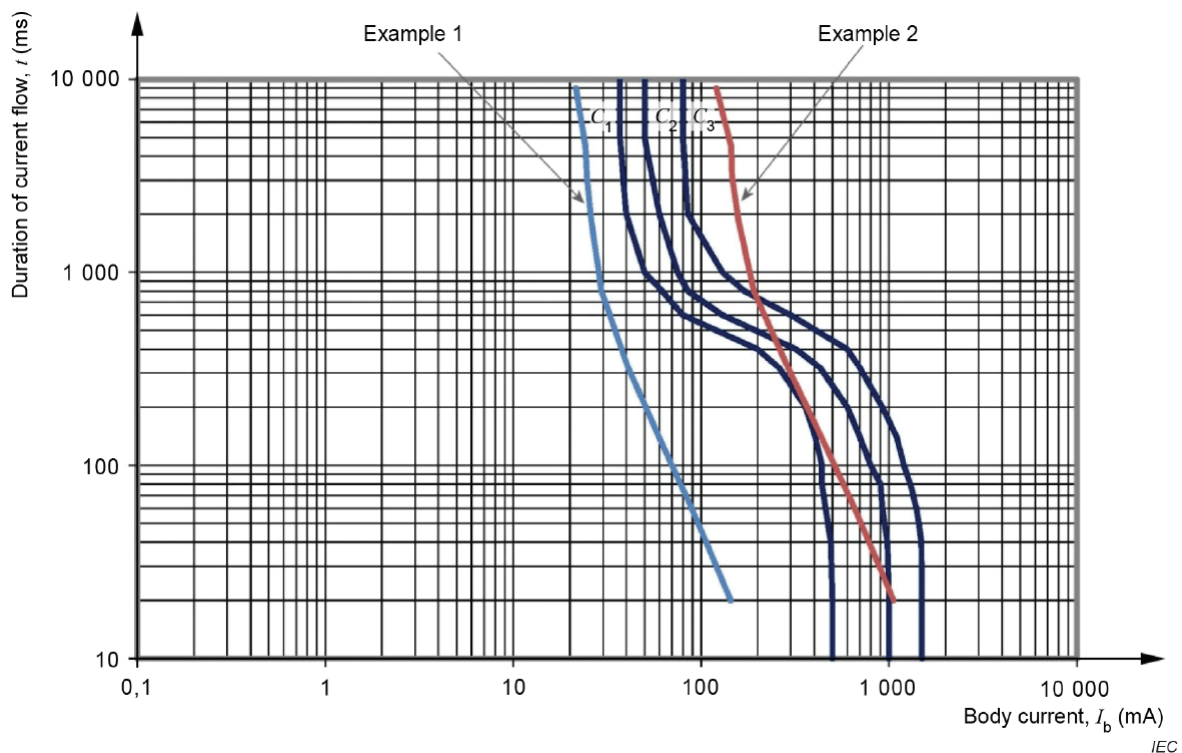


Figura 3.15: Esempio di curve di correnti probabili

NOTA Questo metodo non considera la possibile diminuzione della soglia di fibrillazione ventricolare data da impulsi separati da meno di 300 ms, descritta nella Sezione 3.2.4.

3.3 Effetti della corrente attraverso il corpo umano immerso in acqua

Se il corpo è immerso in acqua³ le dinamiche della conduzione di corrente cambiano rispetto ai casi precedenti, infatti non ci saranno più un singolo punto di entrata e di uscita ma il percorso della corrente dipenderà dalla resistività non solo del corpo, che sarà eterogenea, ma anche dalla resistività del liquido in cui è immerso, acqua in questo caso. Ad esempio se l'acqua è meno resistiva rispetto al corpo umano la maggior parte della corrente scorrerà attorno al corpo, mentre per il caso contrario la corrente tenderà a scorrere attraverso il corpo.

Nelle tabelle 3.2 e 3.3 vengono indicati dei valori di resistività per soluzioni di acqua e parti/tessuti del corpo, rispettivamente.

Soluzione di acqua	Resistività $\Omega \cdot \text{cm}$
Acqua piovana	da 254 a 420000
Acqua dura	1780
Acqua del rubinetto	da 1290 a 16000
Acqua del rubinetto con detergente	520
Acqua di piscina	300
Soluzione salina isotonica	60
Acqua di mare	22

Tabella 3.2: Resistività di soluzioni di acqua

Tessuti e parti del corpo umano	Resistività $\Omega \cdot \text{cm}$
Sangue	62,9
Fluido cerebrospinale	64,6
Braccio	160
Muscolo	240
Collo	280
Dita e mano	280
Torace	da 375 a 455
Tronco	415
Cervello	588
Testa	840
Muscolo cardiaco	da 925 a 1150
Osso	16000

Tabella 3.3: Resistività del corpo umano

NOTA I valori nelle tabelle sopra riportate sono stati misurati a temperatura ambiente, nel caso della Tabella 3.2, e a temperatura normale del corpo umano, nel caso della Tabella 3.3. Inoltre data l'eterogeneità del corpo umano le misure in Tabella 3.3 sono da considerarsi come dei valori medi indicativi.

³l'acqua pura non è conduttiva, con l'aggiunta di impurità la resistività cala significativamente

Conduzione della corrente attraverso un corpo immerso

La corrente che scorre attraverso il corpo dipende anche dalle caratteristiche di impedenza di uscita della sorgente elettrica:

- Se l'impedenza di uscita è bassa rispetto alla combinazione dell'impedenza dell'acqua e del corpo immerso in essa, la sorgente è vista come un generatore ideale di tensione dal carico. Questo vuol dire che la corrente attraverso ogni possibile percorso dipende dall'impedenza di tale percorso, dato che la tensione è costante ai capi di ognuno di essi.
- Se l'impedenza di uscita è alta rispetto alla combinazione dell'impedenza dell'acqua e del corpo immerso in essa, la sorgente è vista come un generatore di corrente ideale dal carico. Ciò vuol dire che la corrente attraverso ogni possibile percorso è una parte della corrente totale, ovvero quella che scorre attraverso l'impedenza di uscita della sorgente.

In Tabella 3.4 viene descritto qualitativamente il comportamento della corrente che scorre nella soluzione di acqua, per entrambe le caratteristiche di impedenza della sorgente elettrica, nei casi in cui l'impedenza dell'acqua sia alta o bassa rispetto a quella del corpo immerso.

	Soluzione con resistività alta rispetto al corpo	Soluzione con resistività bassa rispetto al corpo
Generatore di tensione ideale	La corrente attraverso il corpo è determinata dal voltaggio della sorgente e dall'impedenza del corpo in serie con l'acqua che si trova tra esso e gli elettrodi. Più alta è la resistività dell'acqua in serie con il corpo e meno corrente passerà attraverso il corpo.	La corrente attraverso il corpo è determinata dal voltaggio della sorgente e dall'impedenza del corpo in serie con l'acqua che si trova tra esso e gli elettrodi. Più bassa è la resistività dell'acqua in serie con il corpo e più corrente passerà attraverso il corpo.
Generatore di corrente ideale	La corrente totale è determinata dal rapporto tra tensione ed impedenza della sorgente. La corrente attraverso il corpo è invece determinata dalle impedenze relative di corpo ed acqua in parallelo. Più alta è la resistività dell'acqua e più corrente passerà attraverso il corpo.	La corrente totale è determinata dal rapporto tra tensione ed impedenza della sorgente. La corrente attraverso il corpo è invece determinata dalle impedenze relative di corpo ed acqua in parallelo. Più bassa è la resistività dell'acqua e meno corrente passerà attraverso il corpo.

Tabella 3.4: Relazione tra caratteristiche dell'impedenza della sorgente e resistività dell'acqua

Effetti fisiologici della corrente attraverso il corpo immerso e soglie

Dato che l'area di contatto è molto grande, la densità di corrente attraverso la pelle è generalmente abbastanza bassa da permettere lo scorrimento di correnti pericolose all'in-

terno del corpo senza che l'individuo interessato percepisca le tipiche sensazioni associate ad uno shock elettrico.

Nel caso di completa immersione del corpo l'effetto di tetanizzazione può essere particolarmente pericoloso, in quanto la perdita del controllo dei muscoli può portare all'annegamento.

È noto che si avrà fibrillazione ventricolare quando una corrente sufficientemente elevata passa attraverso il corpo ed interessa in particolare il cuore, nel caso di corpo immerso questo effetto fisiologico può essere facilitato, infatti un corpo immerso può cambiare in modo imprevedibile la sua orientazione rispetto ad un campo elettrico presente in acqua. Ciò vuol dire che si può venire a creare una situazione in cui la corrente attraversa il corpo in modo da massimizzare la densità di corrente nel cuore⁴, innalzando così la probabilità di fibrillazione.

La definizione delle soglie per gli effetti della corrente attraverso un corpo immerso non è possibile, infatti ci sono troppe variabili che contribuiscono all'impedenza del percorso scelto dalla corrente, viene però fornito un valore conservativo di corrente valido per una corrente sinusoidale con frequenza di 50/60 Hz, superati i 5 mA efficaci⁵ possono presentarsi tetanizzazione, difficoltà respiratorie e anche fibrillazione ventricolare.

⁴percorso petto-mano sinistra

⁵questo valore non ha nessuna relazione con quello in Figura 2.3

Capitolo 4

Effetti dei colpi di fulmine

Dato che la fisica degli infortuni provocati dai fulmini è diversa da quella delle correnti "artificiali", quanto esposto nei capitoli precedenti non è più valido.

Questo capitolo si concentrerà sulle dinamiche del colpo di fulmine e sugli effetti diretti che la corrente da esso generata ha su un corpo vivente. , sono però da prendere in considerazione anche gli effetti indiretti.

È bene anche considerare che un colpo di fulmine può danneggiare oggetti/strutture e portare a situazioni pericolose che non riguardano il passaggio diretto di corrente attraverso un essere vivente, gli effetti indiretti più comuni sono causati da:

- Danni alle linee di distribuzione e/o comunicazione: possono trasmettere impulsi di corrente all'interno di un edificio o abitazione, provocando possibili incendi e danni a dispositivi elettrici.
- Danni per colpo diretto: quando viene colpita una struttura questa può essere danneggiata causando il distacco di frammenti ad alta velocità o il suo collasso.

Fisica di base dei fulmini

Un fulmine è un scarica di alta corrente di breve durata, che si forma quando il campo elettrico crescente, tra due punti staticamente carichi, supera una certa soglia ed il suo percorso si misura in chilometri.

Questi due punti possono trovarsi entrambi nella nuvola¹ oppure tra nuvola e suolo² o aria³, per gli scopi di questo documento ci si concentrerà sui fulmini nuvola-suolo.

Il fulmine viene innescato da una **scarica pilota**, ovvero un canale ionizzato che si sviluppa verso il suolo, la quale avanza nell'aria in passi di qualche decina di metri e può dividersi in diversi rami. Quando uno di questi rami si trova in prossimità del terreno, o tipicamente di una struttura alta, si verranno a formare dei canali ionizzati di carica opposta che risalgono, denominati **streamers**, di cui uno di questi andrà a collegarsi con il ramo discendente.

Si forma così il canale di conduzione completo in cui può passare l'**arco di ritorno** che, partendo da terra, va a neutralizzare le cariche nel canale ionizzato. La corrente che forma questo arco non è facilmente misurabile, si può però definire un intervallo indicativo da 2 a 200 kA per una scarica, che tipicamente ha una durata di una decina di microsecondi.

¹fulmini nuvola-nuvola

²fulmini nuvola-suolo

³fulmini nuvola-aria

Si possono presentare 4 tipi di scarica verso il suolo, illustrati in Figura 4.1, di cui il più comune è quello con il canale negativo che si forma discendente dalla nuvola (a). I casi di canale ascendente (b),(d) sono poco comuni e tendono a formarsi da montagne o strutture molto alte.

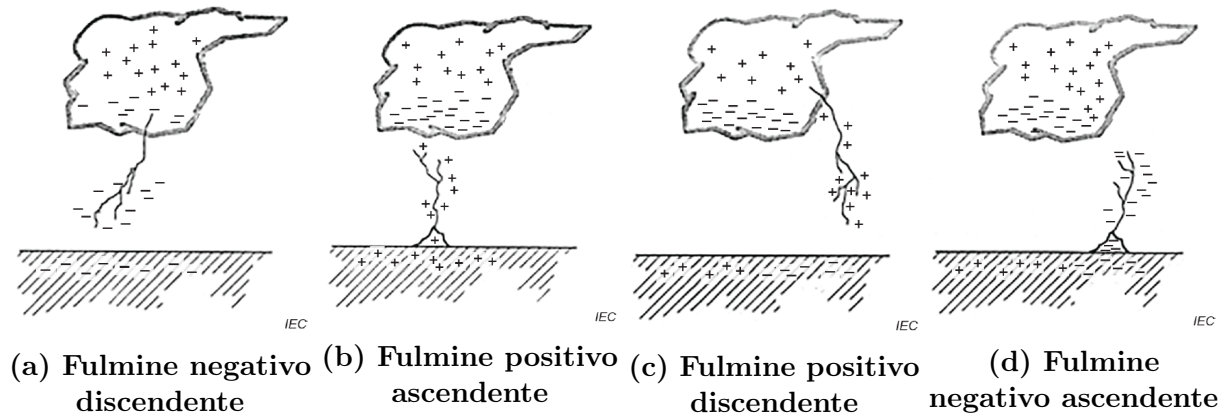


Figura 4.1: Categorizzazione di fulmini nuvola-suolo

4.1 Interazione del colpo di fulmine con esseri umani e bestiame

I modi in cui una scarica di un fulmine può colpire un essere vivente sono 5, gli effetti che questa può provocare dipenderanno dal percorso della corrente all'interno del corpo e dalle condizioni della sua superficie, ma verranno trattati in seguito.

4.1.1 Scarica diretta

Quando la scarica pilota si collega ad uno streamer che si è sviluppato attraverso un essere vivente, tutta la corrente dell'arco di ritorno passerà per il suo corpo.

A seconda dello stato dell'individuo colpito (tipo di pelle, tipo di peli/capelli, grado di umidità ecc.) può capitare che il campo elettrico sulla superficie del corpo raggiunga un valore al quale si avrà rottura dielettrica dell'aria, permettendo la formazione di un arco elettrico esterno in cui passerà la maggior parte della corrente presente all'interno del corpo, diminuendone drasticamente il suo valore interno. Un altro fattore che influenza la formazione ed il percorso di questi archi esterni è la presenza di oggetti metallici indossati sul corpo.

4.1.2 Scarica per contatto

Quando viene toccato un oggetto, non necessariamente metallico, il cui potenziale è stato innalzato da un colpo di fulmine, la corrente passerà all'interno del corpo della vittima con modalità di conduzione simili al caso precedente.

A questo fenomeno si associa la tensione di contatto, ovvero la tensione applicata alla vittima nel punto di contatto, ed è data da:

$$u = i_L \cdot R + L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

è composta da una componente resistiva ed induttiva, dalla relazione tipica di un circuito RL si possono individuare i_L , corrente attraverso la struttura toccata, ed R e L , resistenza ed induttanza tra il punto di contatto e la terra o altra superficie a potenziale diverso dalla struttura toccata.

4.1.3 Scarica di rimbalzo

Quando un individuo si trova in prossimità di una struttura il cui potenziale è stato innalzato da un colpo di fulmine, la differenza di potenziale tra struttura e vittima può essere abbastanza alta da superare la rigidità dielettrica dell'aria. Si viene quindi a formare una scarica che entrerà nel corpo della vittima.

La struttura da cui parte la scarica di rimbalzo può anche essere un'altra persona.

4.1.4 Streamer ascendente

Quando uno streamer si forma attraverso un individuo ma non si collega alla scarica pilota, la corrente dell'arco di ritorno non passerà nel corpo. Ciò non vuol dire che la corrente dello streamer ascendente non possa provocare danni da sé, questa può infatti raggiungere valori che vanno da decine a qualche centinaia di ampere ed hanno una durata di pochi microsecondi.

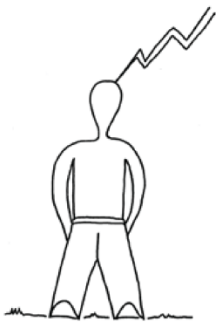


Figura 4.2:
Scarica diretta



Figura 4.3: Scarica
per contatto

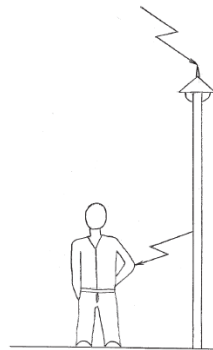


Figura 4.4:
Scarica di
rimbalzo



Figura 4.5: Streamer
ascendente

4.1.5 Tensione di passo

Quando un fulmine colpisce il suolo la sua corrente viene distribuita attraverso la resistenza del terreno, si formerà così un gradiente di potenziale che si sviluppa radialmente all'interno del terreno a partire dal punto colpito.

Questo gradiente fa sì che ogni punto del terreno vicino si trovi ad una tensione diversa a seconda della distanza dall'impatto, la tensione di un determinato punto è data dalla seguente relazione:

$$U = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

in cui I è la corrente attraverso il terreno di resistività ρ ed r è la distanza del punto di contatto dal punto di impatto, in Figura 4.6 viene dato un esempio per un colpo di fulmine che trasmette $I = 10$ kA nel terreno di resistività $\rho = 100 \Omega\text{m}$.

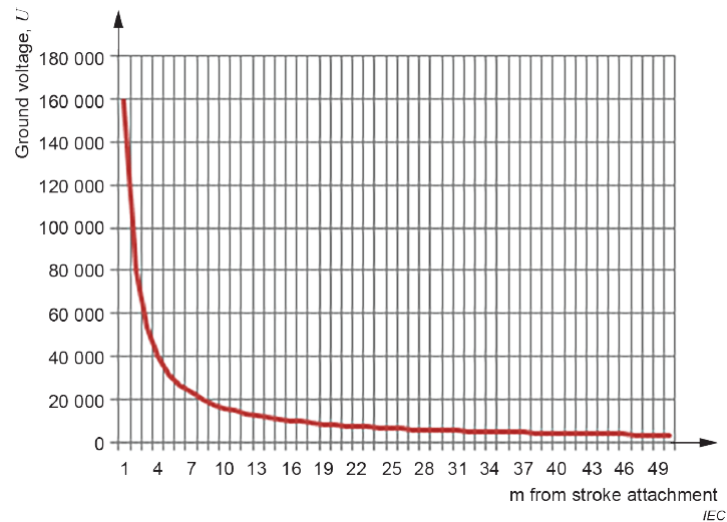


Figura 4.6: Esempio di gradiente della tensione di passo

Quando un individuo si trova in prossimità del punto di impatto, i suoi piedi/zampe si troveranno a distanze diverse rispetto al punto in cui il fulmine colpisce il terreno, si viene quindi a creare una differenza di potenziale.

La pericolosità della corrente derivante dalla tensione di passo è diversa a seconda che si parli dell'essere umano o del bestiame:

- **Uomo:** la differenza di potenziale tra i due punti di contatto difficilmente arreca danni (piccola differenza di distanza), inoltre per la maggior parte dei casi si considera la persona in piedi con solo i piedi in contatto con il terreno, questo fa sì che il percorso che prende la corrente non preveda il cuore;
- **Bestiame:** nel caso di un quadrupede i punti di contatto con il terreno possono trovarsi a distanze più grandi tra loro, rispetto al caso umano, ed è più probabile che il percorso della corrente comprenda il cuore. Inoltre il terreno su cui si trovano, solitamente fangoso, è particolarmente conduttivo, questo fa sì che la tensione di passo porti facilmente al decesso di uno o più animali.

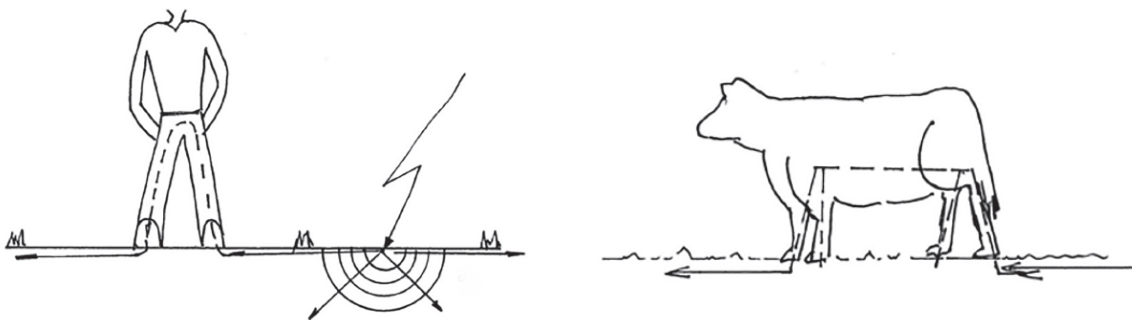


Figura 4.7: Esempi di tensione di passo

4.2 Effetti diretti del colpo di fulmine su un corpo vivente

Al contrario di quanto accade per la corrente proveniente da apparecchi elettrici la principale causa di morte per colpo di fulmine non è la fibrillazione ventricolare, bensì l'**asistolia**. Quest'ultima è un'altra forma di arresto cardiaco in cui l'attività elettrica cardiaca cessa completamente, il cuore smetterà così di pompare sangue con conseguente blocco della circolazione sanguigna. L'asistolia è trattabile con massaggio cardiaco e non è defibrillabile.

Con la cessazione dell'attività cardiaca si presenta anche l'arresto respiratorio, che porta ad ipossia⁴, il quale ha durata superiore rispetto all'arresto cardiaco, ciò significa che seppur in un primo intervento sia stata ripristinata l'attività cardiaca, se non si è ripresa anche l'attività respiratoria si viene a presentare un secondo arresto cardiaco.

Il colpo di fulmine causa una serie di altri disturbi:

Disturbi neurologici

Quando il funzionamento del sistema nervoso centrale viene intaccato si presentano dei disturbi neurologici, nel caso di un colpo di fulmine questi sono stati classificati in:

- **Immediati e transitori:** perdita dei sensi, infarto cerebrale⁵, encefalopatia ipossica⁶, emorragia cerebrale, paralisi transitoria di un arto investito dalla corrente dovuta a spasmi vascolari(keraunoparalisi), spasmi.
- **Prolungati:** danneggiamento delle giunzioni tra nervo e muscolo con possibile perdita delle funzioni motorie, neuropatia⁷, parestesia⁸, parkinsonismo⁹.

Disturbi fisici

Il colpo di fulmine causa traumi fisici, infatti possono venir danneggiati organi interni e tessuti attraversati dalla corrente. In particolare è comune che si presentino infiammazione dell'occhio e cecità temporanea, c'è inoltre la possibilità che in seguito all'incidente si sviluppi la cataratta.

Le ustioni fanno parte dei danni direttamente causati da un fulmine, ma data la natura impulsiva di questo fenomeno la corrente scorre all'interno del corpo per un tempo molto breve, questo fa sì che le ustioni causino pochi danni, saranno più profonde solo nei punti di ingresso ed uscita della corrente.

Il tuono, che accompagna il fulmine, crea un'onda d'urto che perfora i timpani, causando sordità e perdita di equilibrio, può inoltre danneggiare gli organi interni comprimibili, come polmoni e intestino.

A causa delle elevate correnti interne si perderà il controllo dei muscoli, ciò causa dei movimenti involontari che possono portare a contusioni, tagli o fratture.

⁴carezza di ossigeno nell'organismo

⁵mancanza di circolazione di sangue nel cervello

⁶mancanza di ossigeno nel cervello

⁷patologia che altera le funzioni dei nervi

⁸alterata percezione della sensibilità a diversi stimoli sensitivi (termici, tattili, dolorifici, vibratorii)

⁹disturbo caratterizzato da sintomi simili alla sindrome di parkinson

Disturbi psicologici

In seguito a qualsiasi trauma ci si può aspettare che si presentino disturbi psicologici, i più comuni sono i deficit dell'attenzione e della memoria, disturbi del sonno, perdita di capacità cognitive, stress post-traumatico, attacchi d'ansia e depressione.

Appendice A

Infortuni elettrici in ambito professionale

Secondo i dati forniti dall'INAIL, ogni anno di tutti gli infortuni sul lavoro con esito mortale circa il 4% è di natura elettrica.

Mortale o non l'infortunio elettrico si presenta principalmente in due forme, a causa di arco elettrico provocando ustioni e per conduzione di corrente all'interno del corpo della vittima.

Quest'ultimo caso si avrà ogni qual volta un soggetto non isolato fa' contatto con una parte in tensione, si possono definire due tipi di contatto:

- **Contatto diretto:** la vittima entra in contatto con una parte attiva¹ di un circuito elettrico, come un morsetto o un cavo scoperto.
- **Contatto indiretto:** la vittima entra in contatto con una parte di un circuito elettrico che in condizioni nominali del suo funzionamento non è in tensione, come ad esempio la carcassa di un elettrodomestico.

La protezione dal contatto indiretto viene solitamente integrata nel circuito elettrico tramite la messa a terra e l'aggiunta di interruttori differenziali, per quanto riguarda il contatto diretto invece si cerca di rendere non accessibili le parti attive.

Nel caso si debba operare in presenza di parti in tensione scoperte le norme EN 50110 (con validità europea), CEI 11 27 (con validità nazionale) ed il testo unico della sicurezza sul lavoro (D.Lgs. 81/2008) definiscono delle procedure atte a ridurre il rischio elettrico, la cui mancanza di rispetto porta con alta probabilità all'infortunio.

Queste procedure si applicano non solo per i lavori elettrici sottotensione ma anche per lavori, non riguardanti direttamente un impianto elettrico, la cui attività viene svolta in prossimità di parti attive. Infatti di tutti gli incidenti elettrici riportati dall'INAIL nel periodo 2002-2012, solo il 30% riguardano infortuni per contatto diretto derivati da attività di manutenzione o installazione di impianti elettrici, il restante 70% riguarda i casi in cui il contatto accidentale è avvenuto a seguito di attività di altro genere.

Le dinamiche dell'infortunio sono diverse a seconda che si tratti del primo o secondo caso:

- **Contatto diretto durante l'attività lavorativa ordinaria:** avviene prevalentemente durante lo svolgimento di lavori edili, in questi ambienti infatti può venire meno la segnaletica adeguata, inoltre l'inadeguata formazione dell'operaio ordinario per i lavori in prossimità di parti attive e/o la mancata comunicazione dei rischi

¹parte normalmente in tensione di un circuito elettrico

elettrici presenti sul luogo in cui si svolge l'attività lavorativa possono portare all'infornio. L'80% di questi infortuni avviene a causa del contatto di macchinari quali autobetoniere, autogru, piattaforme elevabili ecc. con linee elettriche aeree di media o alta tensione, il restante 20% riguarda altre svariate attività come ad esempio il taglio di una tubatura contenente un cavo in tensione.

- **Contatto diretto durante l'attività lavorativa su un impianto elettrico:** in questo caso l'infornio si attribuisce per il 90% dei casi ad un mancato rispetto di una procedura operativa, come ad esempio il mancato sezionamento della parte di impianto su cui si sta svolgendo l'attività oppure l'assenza o la non conformità dei dispositivi di protezione individuale. Nel 10% dei casi è invece un problema tecnico dell'impianto su cui si opera o dei DPI ad essere la causa del contatto.

Esempi di infortuni

Vengono di seguito riportati alcuni esempi di infortuni di natura elettrica riportati in un documento pubblicato dall'istituto svizzero ESTI [5]:

Tipo di attività	Descrizione dell'incidente	Conseguenze
Lavoro elettrico sotto-tensione	Durante l'esecuzione di un test annuale su un impianto elettrico l'infortunato viene incaricato di sostituire il contatore di corrente del modulo di un interruttore magnetotermico in un pannello elettrico. Durante l'installazione del dispositivo di misura il bordo del supporto metallico di questa unità, già collegato all'impianto di terra tramite la carcassa del pannello elettrico, si viene a trovare a circa 2 mm dall'alimentazione dell'interruttore, ciò provoca un cortocircuito dal lato delle barre di collettore che sviluppa un arco elettrico di oltre 35 kA. L'attività è stata eseguita senza previo sezionamento dell'alimentazione ed in assenza di DPI adeguati.	Ustioni a viso e mani dell'addetto all'installazione e danni temporanei all'udito, causati dallo scoppio dell'arco elettrico, ad una seconda persona presente sul luogo dell'intervento.
Lavoro non elettrico	L'infortunato è incaricato di smontare delle vecchie tubature di ventilazione, a tal fine viene utilizzata una sega elettrica collegata all'alimentazione tramite una prolunga. Viene utilizzata una scala a pioli metallica per raggiungere le tubature, durante l'attività il cavo della prolunga viene danneggiato ed entra in contatto con la scala che verrà portata in tensione. Inoltre il contatto di terra della spina della prolunga era stato tagliato, prevenendo così l'intervento dei dispositivi di protezione.	L'infortunato toccando la scala subisce una forte esposizione non letale alla corrente elettrica, a seguito dell'incidente si presentano dolori alle braccia.

Bibliografia

- [1] *Effects of current on human beings and livestock. Effects of lightning strokes.* PD IEC TR 60479-4:2020. British Standard Institution, 2020. ISBN: 978 0 539 00572 1.
- [2] *Effects of current on human beings and livestock. General aspects.* BS IEC 60479-1:2018. British Standard Institution, 2019. ISBN: 978 0 539 00726 8.
- [3] *Effects of current on human beings and livestock. Special aspects.* BS IEC 60479-2:2019. British Standard Institution, 2019. ISBN: 978 0 539 01637 6.
- [4] *Il contatto elettrico diretto.* INAIL(Istituto nazionale per l'assicurazione contro gli infortuni sul lavoro), 2017. ISBN: 978 88 7484 534 7.
- [5] *Infortuni legati all'elettricità nel 2015.* ESTI(Ispettorato federale degli impianti a corrente forte), 2015.