

FORMAZIONE ASSOCERT

ESD: CARATTERISTICHE, PERICOLOSITA' E GESTIONE IN AMBITO MEDICO



Unità didattiche ASSOCERT

Effetti delle scariche elettrostatiche (ESD) sugli
esseri umani in ambiente medico

Introduzione

Introduzione



Introduzione

Le scariche elettrostatiche (ESD, dall'inglese Electrostatic Discharge) sono fenomeni fisici transitori caratterizzati dal trasferimento rapido di carica elettrica tra due corpi che si trovano a potenziale elettrico differente.

Dal punto di vista scientifico e normativo, queste scariche possono essere analizzate attraverso tre fasi principali:

- L'accumulo della carica;
- Il superamento della rigidità dielettrica;
- La dinamica elettrica della scarica stessa.

Introduzione

L'elettricità statica si genera tipicamente quando due materiali (almeno uno dei quali isolante o un conduttore isolato da terra) entrano in contatto e vengono successivamente separati.

Quindi dovremo considerare tre aspetti:

1. Trasferimento di elettroni;
2. Separazione;
3. Serie triboelettrica.

Introduzione

Trasferimento di elettroni: durante il contatto, avviene uno scambio di elettroni attraverso il confine dei materiali, creando un eccesso di carica negativa su uno e positiva sull'altro;

Separazione: se i materiali sono isolanti, la carica non può ricombinarsi velocemente durante la separazione e rimane "intrappolata" sulla superficie;

Serie triboelettrica: la polarità e l'intensità della carica dipendono dalla posizione dei materiali nella serie triboelettrica, che li classifica in base alla loro affinità elettronica.

Introduzione

Più due materiali sono lontani tra loro nella lista, maggiore sarà la carica elettrica (e quindi la "scossa") generata dallo sfregamento.

Introduzione

Tendenza	Materiale	Risultato dopo lo sfregamento
Molto positivo	Aria, pelle umana	Cede elettroni (+ +)
Positivo	Vetro, capelli umani, lana, seta	Cede elettroni (+)
Neutro	Cotone (spesso considerato il punto di riferimento)	Poco incline allo scambio
Negativo	Legno, gomma ambra, resine	Acquista elettroni (-)
Molto negativo	Poliestere, PVC, teflon	Acquista elettroni (- -)

Introduzione

Meccanismo di scarica: rottura dielettrica

La scarica avviene quando un oggetto carico viene avvicinato a un conduttore a basso potenziale (come la terra).

L'accumulo di carica crea un campo elettrico intenso nello spazio circostante.

Quando l'intensità del campo supera la rigidità dielettrica dell'aria (circa 30 kV/cm in condizioni standard), l'aria stessa viene ionizzata, diventando un plasma conduttivo che permette il passaggio della corrente sotto forma di scintilla.

Introduzione

Caratterizzazione elettrica e modellazione (HBM)

Scientificamente, il corpo umano coinvolto in una ESD viene modellato come un circuito RLC (Resistenza-Induttanza-Capacità) noto come Human Body Model (HBM) .

Introduzione

Si hanno, dunque:

- Capacità (C): il corpo umano agisce come un serbatoio di energia, con una capacità variabile solitamente tra 100 pF e 500 pF. In contesti specifici, come i veicoli, la capacità può raggiungere i 1000 pF;
- Tensione (U): le tensioni generate da attività quotidiane possono essere molto elevate; ad esempio, camminare può generare oltre 20 kV;
- Corrente di picco (I): nonostante la bassa energia totale (spesso nell'ordine dei millijoule), la corrente di picco può essere molto alta, raggiungendo i 20-30 A.
- Durata transitoria: la scarica è rapidissima, con una durata tipica nell'ordine dei 100 nanosecondi (ns).

Introduzione

Dinamica dell'impulso (Waveform)

La forma d'onda di una ESD non è costante ma dipende dai parametri reattivi del circuito di scarica.

Le scariche possono essere sottosmorzate, sovrasmorzate o a smorzamento critico, a seconda dei componenti reattivi del circuito come spiegato di seguito.

Introduzione

A seconda del bilanciamento tra resistenza, induttanza e capacità, si possono osservare i tre tipi di comportamento prima citati:

- Sottosmorzata (Underdamped): caratterizzata da oscillazioni ad alta frequenza;
- Sovrasmorzata (Overdamped): un decadimento esponenziale lento senza oscillazioni;
- A smorzamento critico (Critically damped): il ritorno più rapido possibile allo stato di equilibrio senza oscillazioni.

Introduzione

Effetti fisiologici e rischi

L'effetto di una ESD sull'uomo è determinato principalmente dalla carica totale trasferita (Q), espressa in microcoulomb (μC), piuttosto che dalla sola tensione.

- Soglie di percezione: sotto gli $0,2 \mu\text{C}$ la scarica è generalmente impercettibile. Valori superiori causano la tipica "scossa statica" associata a dolore e reazioni di sussulto (startle reaction);
- Rischio cardiaco: sebbene rari, i rischi di aritmia possono verificarsi se la carica fluisce direttamente attraverso il miocardio.

Valori più dettagliati verranno esposti più avanti.

Introduzione

Effetti fisiologici e rischi

Un esempio pratico: immaginiamo due scenari con la stessa persona ($C = 100\text{pF}$):

Tensione Accumulata (V)	Calcolo ($Q=C \cdot V$)	Carica Totale (Q)	Percezione Umana
1.000 V	$100\text{pF} \times 1.000\text{V}$	0,1 μC	Impercettibile (sotto soglia)
5.000 V	$100\text{pF} \times 5.000\text{V}$	0,5 μC	Scossa dolorosa e sussulto
10.000 V	$100\text{pF} \times 10.000\text{V}$	1,0 μC	Scintilla visibile e forte dolore

Introduzione

Uno scenario critico è il catetere cardiaco, dove una scarica anche di soli $0,8-1\mu\text{C}$ consegnata nel periodo vulnerabile del ciclo cardiaco può, in rari casi clinici, indurre fibrillazione ventricolare di cui si parla in altra unità didattica.

In questa presentazione si parlerà degli effetti delle scariche elettrostatiche (ESD) sugli esseri umani.

Termini e definizioni

Termini e definizioni

1. Definizione normativa di sistema elettromedicale

Un sistema elettromedicale (ME System) è una combinazione di più apparecchi, di cui almeno uno deve essere un apparecchio elettromedicale, collegati tra loro mediante una connessione funzionale o utilizzando una presa multipla.

Questi componenti devono lavorare insieme per compiere una funzione specifica, come:

- Diagnosi (es. un sistema per prove da sforzo);
- Trattamento (es. un sistema per chirurgia robotica);
- Monitoraggio (es. una centrale di monitoraggio in terapia intensiva).

Termini e definizioni

2. I componenti del sistema

Un sistema può includere dispositivi che non sono nati per uso medico, ma che diventano parte del sistema "clinico":

- Apparecchio EM: lo strumento che entra in contatto diretto con il paziente (es. elettrocardiografo).
- Apparecchiature non mediche: dispositivi di supporto necessari al funzionamento (es. un PC commerciale per visualizzare i dati, una stampante laser o un monitor esterno).

Termini e definizioni

Tipo	Descrizione	Livello di Protezione
Tipo B (Body)	Parti applicate generalmente non conduttive o collegate a terra (es. letti operatori).	Minimo
Tipo BF (Body Floating)	Parti applicate a contatto con la pelle ma isolate da terra (es. ECG, ecografi).	Medio
Tipo CF (Cardiac Floating)	Parti applicate per uso cardiaco diretto (es. cateteri intracardiaci).	Massimo

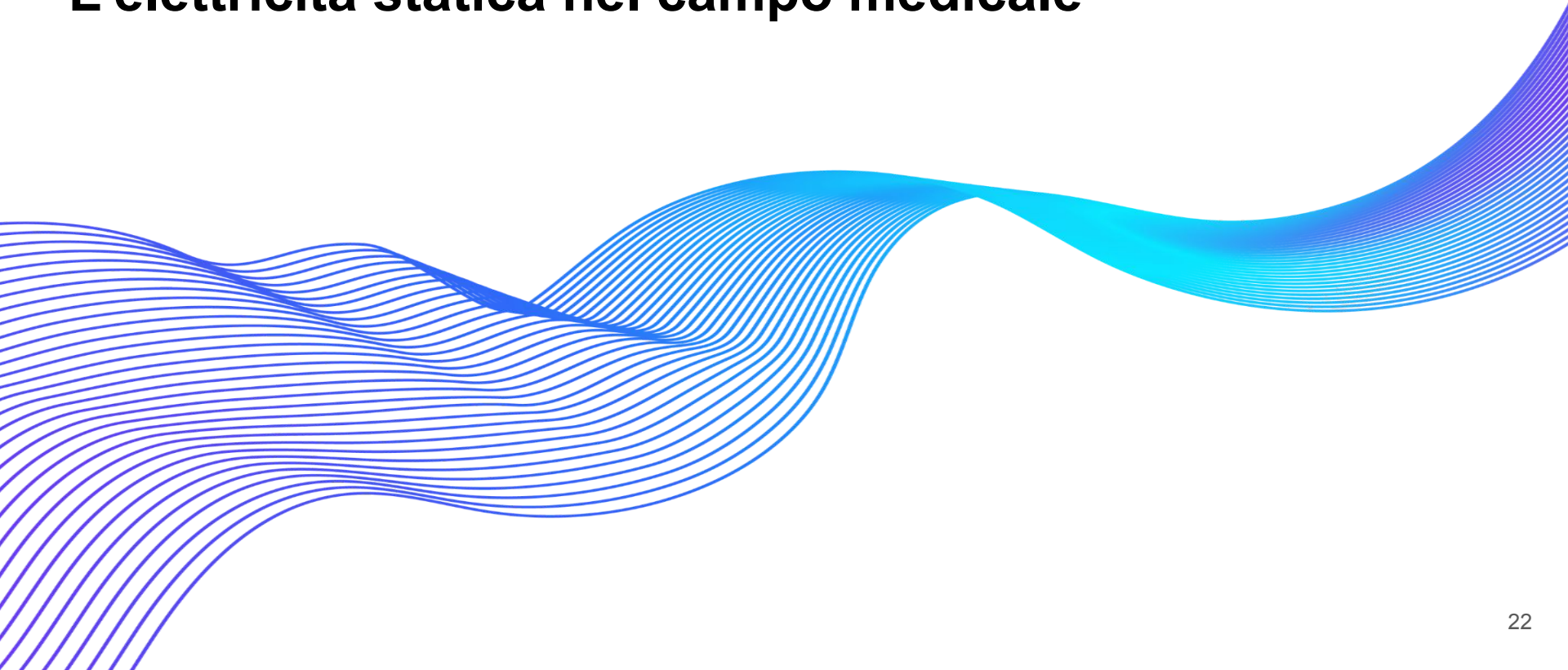
Termini e definizioni

1. Tipi di correnti di dispersione

Non esiste una sola "corrente di dispersione". La normativa ne distingue tre principali che devono essere misurate nel sistema:

- Corrente di dispersione verso terra: La corrente che fluisce dall'alimentazione, attraverso l'isolamento, verso il conduttore di protezione (il cavo di terra);
- Corrente di dispersione sull'involucro (Touch Current): La corrente che fluirebbe attraverso una persona che tocca la scocca dell'apparecchio;
- Corrente di dispersione nel paziente: La corrente che fluisce attraverso il paziente collegato alle parti applicate (elettrodi, sensori) verso terra. Questa è la più pericolosa.

L'elettricità statica nel campo medicale



L'elettricità statica

Pericolo dell'elettricità statica

La "scossa statica" si verifica quando una carica accumulata viene neutralizzata avvicinando un oggetto carico a un conduttore a basso potenziale. I principali scenari di pericolo includono:

- Soggetto carico: un essere umano scarica l'elettricità accumulata (es. camminando su un tappeto) verso un conduttore; sebbene raramente possa causare aritmie cardiache, provoca dolore e reazioni di sussulto;
- Soggetto non carico esposto: un individuo tocca un conduttore ad alta energia (es. veicoli, letti d'ospedale, pale di turbine eoliche), con rischi potenziali per i dispositivi impiantabili;

L'elettricità statica

- Scarica tra persone: in ambito medico, una persona può scaricare su un paziente, con il rischio critico che la carica fluisca attraverso cateteri direttamente verso il miocardio.

Oltre al dolore, il pericolo principale è rappresentato dalle lesioni indirette causate dalla reazione involontaria (sussulto), come cadute da scale, fratture o contusioni.

L'elettricità statica

A differenza della corrente alternata (AC) o continua (DC) industriale, l'ESD è un fenomeno transitorio ultrarapido.

Mentre la IEC 60479-1 si occupa di correnti che durano millisecondi o secondi, la Parte 6 si concentra su impulsi la cui durata è misurata in nanosecondi (ns).

L'elettricità statica

Scientificamente, se abbiamo una serie di scariche ripetitive (es. un processo industriale), l'effetto fisiologico sul corpo non dipende solo dal singolo picco, ma dalla carica totale trasferita nell'unità di tempo

$$I_{agg} = Q \cdot f$$

dove

- Q è la carica;
- f è la frequenza degli impulsi.

La scarica avviene quando il campo elettrico tra il corpo e l'oggetto supera la rigidità dielettrica dell'aria (circa 30kV/cm in condizioni standard).

L'elettricità statica

Modelli di ESD

Per valutare i rischi, le sorgenti di ESD sono modellate elettronicamente tramite circuiti che includono

- Capacità (C): per modellare la carica immagazzinata;
- Resistenza (R) e Induttanza (L): per simulare la forma d'onda della scarica;
- Impedenza del bersaglio (ZL): che rappresenta il corpo umano o l'oggetto colpito.

Esistono modelli specifici per il corpo umano che tengono conto della complessità del sistema braccio/mano durante l'avvicinamento al punto di scarica.

L'elettricità statica

Il corpo umano, in ambito elettrostatico, non è un semplice conduttore, ma un sistema complesso di impedenze parassite dove si ha.

- Capacità del corpo (C_b): varia tipicamente tra 100 pF e 500 pF. Una persona in piedi su un pavimento isolante con scarpe sottili ha una capacità maggiore rispetto a una persona su un tappeto spesso (effetto del dielettrico e della distanza dal piano di terra);
- Resistenza interna (R_b): in una scarica ESD, la resistenza della pelle viene "perforata" quasi istantaneamente a causa dell'alta tensione (punzonatura dielettrica), riducendo l'impedenza del corpo a valori molto bassi (500-1500 Ω);
- Induttanza (L): le membra (braccia e dita) introducono una componente induttiva (circa 1 μ H) che modella la forma d'onda della corrente, causando spesso oscillazioni smorzate.

L'elettricità statica

Quantificazione della scossa statica

Il corpo umano è visto come una capacità di accumulo di energia (come un condensatore), influenzata da fattori ambientali come l'umidità.

Ad esempio, le tensioni generate camminando o uscendo da un veicolo arrivano fino a decine di kV.

Un caso critico è il soccorso con elicottero, dove la carica può essere molto elevata.

L'elettricità statica

La scarica non è un evento lineare.

Quando un dito si avvicina a un oggetto metallico carico si hanno:

- Fase di pre-scarica: si genera un "effetto punta" dove il campo elettrico si concentra;
- Ionizzazione: l'aria diventa plasma conduttivo;
- Picco di corrente: si raggiungono correnti di picco elevate (anche $>30\text{A}$), ma per un tempo così breve ($<100\text{ns}$) che l'energia totale rimane nell'ordine dei millijoule (mJ).

L'elettricità statica

Effetto della carica trasferita

Poiché le ESD hanno tipicamente una durata inferiore a $1\text{ }\mu\text{s}$, i loro effetti sono determinati principalmente dalla carica totale trasferita:

- $<0,2\text{ }\mu\text{C}$: nessuna percezione;
- $0,5 - 2,0\text{ }\mu\text{C}$: percezione chiara, spesso descritta come una "puntura";
- $>4,0\text{ }\mu\text{C}$: scossa dolorosa che induce una reazione motoria involontaria.
- Cariche elevate: superano la soglia del dolore e del sussulto.

L'elettricità statica

La reazione di sussulto (Startle Reaction) è il pericolo principale.

Una scarica innocua può causare una contrazione muscolare improvvisa che porta a cadute dall'alto o urti contro macchinari in movimento.

L'elettricità statica

Sebbene una ESD superficiale non possa fermare il cuore (l'energia non penetra abbastanza in profondità), il discorso cambia radicalmente con i cateteri intracardiaci.

Tuttavia si può avere una particolare vulnerabilità del miocardio durante la fase di ripolarizzazione dei ventricoli (onda T dell'ECG) poiché il cuore è elettricamente instabile.

L'elettricità statica

Scarica tramite catetere

Se una carica elettrostatica viene trasferita direttamente attraverso un catetere o un elettrodo (es. durante un intervento chirurgico), una carica di pochi microcoulomb può indurre extrasistoli o, in soggetti con patologie pregresse, innescare una fibrillazione ventricolare.

Questo accade perché la densità di corrente nel punto di contatto con il cuore è estremamente elevata.

L'elettricità statica

Carica ambientale

In casi estremi (es. 400 pF a 25 kV), la carica può raggiungere i 10 μC con una durata stimata di circa 2 μs .

Quando una persona cammina su un tappeto sintetico, il contatto e la separazione continua tra le suole delle scarpe e le fibre causano un trasferimento di elettroni.

Se l'umidità relativa (RH) è bassa (<20%), la resistività superficiale dei materiali aumenta drasticamente, impedendo alla carica di disperdersi verso terra, permettendo al corpo umano di raggiungere tensioni superiori ai 20 kV.

L'elettricità statica

Minimizzazione della scossa

La mitigazione del rischio si basa sull'uso di materiali dissipativi e sulla corretta messa a terra, come descritto nella norma IEC TS 60079-32-1.

La protezione, infatti, non si basa sull'isolamento, ma sulla dissipazione:

- Controllo dell'umidità: mantenere $RH > 40\%$ crea un sottile strato d'acqua sulle superfici che le rende naturalmente più conduttive;
- Materiali dissipativi: utilizzo di pavimenti e calzature con resistenza verso terra compresa tra $10^6 \Omega$ e $10^9 \Omega$.

L'elettricità statica

Strategie di Mitigazione Tecnica (Hardware)

A. Protezione agli Ingressi (TVS Diodes)

Sulle porte di comunicazione (USB, Ethernet) e sugli ingressi dei sensori vengono installati diodi TVS (Transient Voltage Suppressors).

Questi componenti agiscono come "valvole di sfogo" ultra-rapide: quando arriva il transitorio ESD, il diodo entra in conduzione in meno di un nanosecondo, deviando la corrente verso la massa prima che raggiunga il microprocessore.

L'elettricità statica

B. Isolamento Galvanico

Per le parti applicate (Tipo BF o CF), si utilizzano barriere di isolamento (fotoaccoppiatori o trasformatori di segnale).

Questo impedisce che una ESD che colpisce l'involucro dell'apparecchio si trasferisca al paziente attraverso i cavi degli elettrodi.

L'elettricità statica

B. Isolamento Galvanico

Per le parti applicate (Tipo BF o CF), si utilizzano barriere di isolamento (fotoaccoppiatori o trasformatori di segnale).

Questo impedisce che una ESD che colpisce l'involucro dell'apparecchio si trasferisca al paziente attraverso i cavi degli elettrodi.

L'elettricità statica

C. Faraday Cage (Schermatura)

L'involucro del dispositivo è progettato per agire come una gabbia di Faraday. Se l'involucro è metallico, deve essere correttamente collegato a terra; se è plastico, spesso viene rivestito internamente con vernici conduttive per dissipare la carica sulla superficie esterna.



L'elettricità statica

3. Strategie di mitigazione ambientale (Safe Zone)

Negli ambienti critici (Sale Operatorie, Laboratori di Cateterismo), la mitigazione avviene anche a livello infrastrutturale:

- Pavimenti antistatici/dissipativi: pavimenti speciali con resistenza controllata (tra 10^5 e $10^8 \Omega$) che permettono alle cariche degli operatori di fluire verso terra in modo lento e sicuro, evitando scintille;
- Umidità controllata: gli impianti di climatizzazione ospedalieri mantengono l'umidità tra il 40% e il 60%. Come abbiamo visto, l'umidità crea un sottile strato conduttivo sulle superfici che previene l'accumulo triboelettrico;
- Abbigliamento tecnico: camici e calzature certificate ESD che impediscono la generazione di cariche durante il movimento.

L'elettricità statica



L'elettricità statica

4. Gestione delle "Parti applicate" e connettori

Un punto critico sono i connettori dei sensori che il medico tocca frequentemente.

- Recessed Contacts: i pin dei connettori medici sono spesso "affondati" (incassati) all'interno della plastica. Questo impedisce al dito dell'operatore di avvicinarsi troppo ai contatti elettrici, aumentando la distanza d'aria e sfruttando la rigidità dielettrica della plastica per prevenire l'arco voltaico.





Grazie per l'attenzione

Aggiornamenti Tecnici ASSOCERT

Formazione

Effetti delle scariche elettrostatiche (ESD) sugli esseri umani
in ambiente medico

44

rev.0 del 21.12.2025