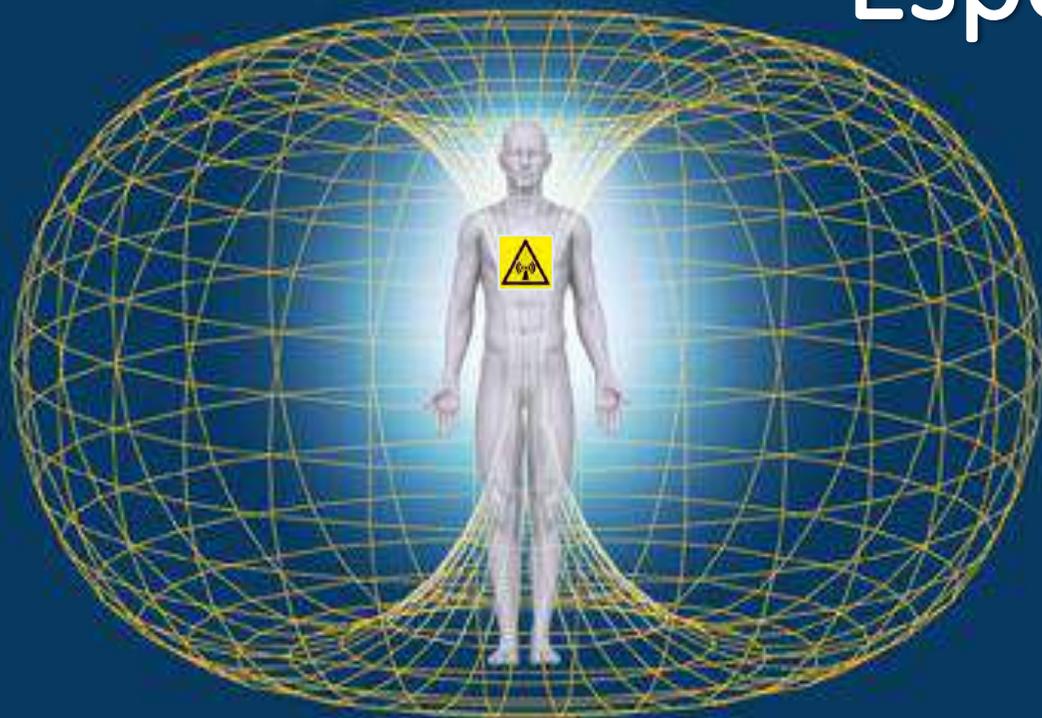


Esposizione umana ai campi elettromagnetici

Introduzione alla valutazione
degli effetti sanitari, sensoriali e
indiretti derivanti dall'esposizione



Vanni Lopresto

*ENEA, Direzione Centrale Infrastrutture e Servizi
Servizio di Prevenzione e Protezione
Centro Ricerche Casaccia, Roma*

Consiglio Nazionale degli Ingegneri
Roma, 25 febbraio 2022

Docente

Vanni Lopresto

- Ricercatore, ASPP Esperto CEM
- ENEA, Direzione Centrale Infrastrutture e Servizi, Centro Ricerche Casaccia, Roma
- Membro CEI CT 106 “Esposizione umana ai campi elettromagnetici”
- Membro CENELEC CLC/TC 106X “Electromagnetic fields in the human environment”
- Membro IEC TC 106 “Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure”



CONTATTI

vanni.lopresto@enea.it

Programma

1° Parte

- ❖ Effetti biologici dei campi elettromagnetici
 - Effetti sanitari
 - Effetti sensoriali
 - Effetti indiretti
- ❖ Effetti dei CEM in funzione della frequenza
 - Campi statici
 - Campi in bassa frequenza
 - Campi in alta frequenza
- ❖ Le basi scientifiche dei limiti di esposizione
 - Linee Guida ICNIRP
 - Grandezze di base e di riferimento
 - Esposizione dei lavoratori e della popolazione

2° Parte

- ❖ Quadro normativo comunitario
 - Raccomandazione 1999/519/CE
 - Direttiva 2013/35/UE
- ❖ Quadro normativo nazionale
 - Legge 36/2001 e decreti attuativi
 - D.Lgs. 81/2008 come modificato dal D.Lgs. 159/2016
- ❖ Norme tecniche e banche dati
 - Norme tecniche CENELEC e CEI
 - Portale Agenti Fisici (PAF)
 - Guida Pratica Non Vincolante (NBG)

Programma

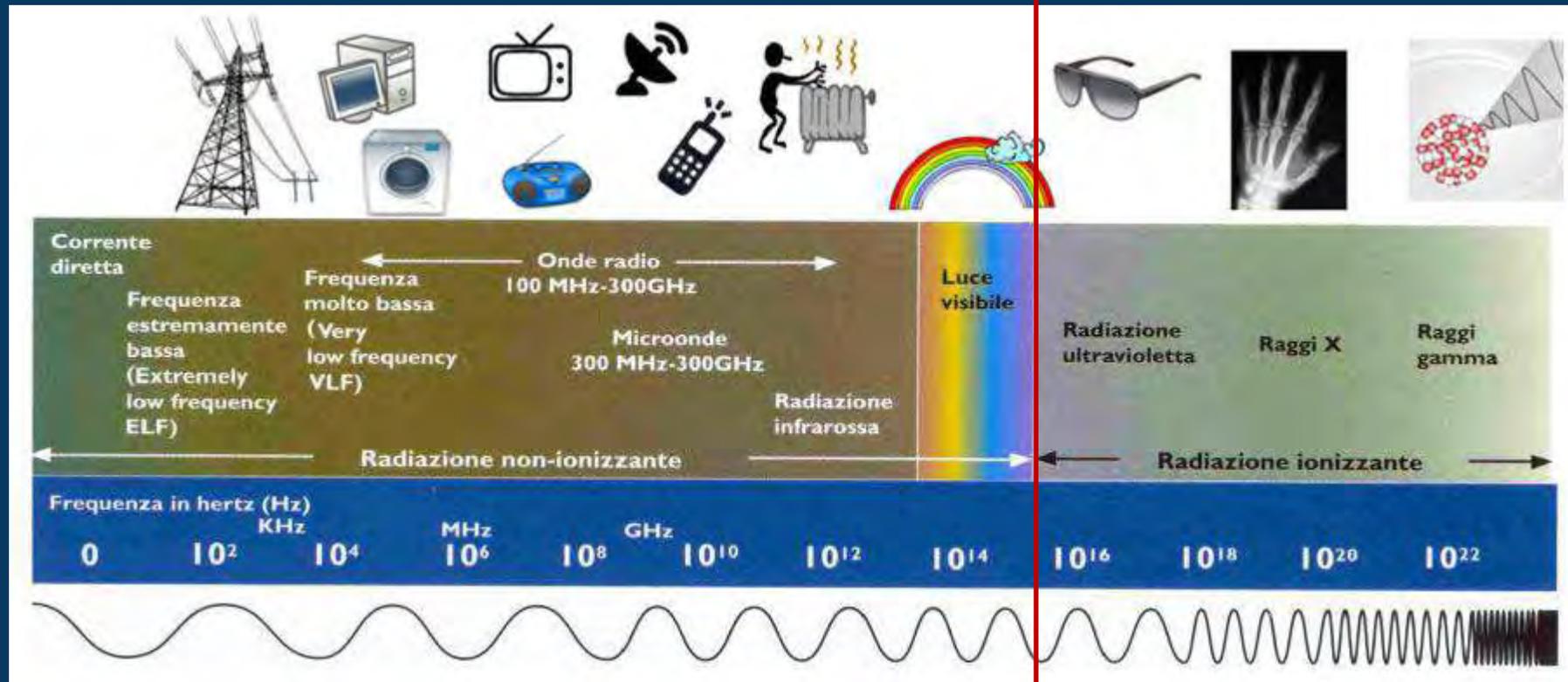
1° Parte

- ❖ Effetti biologici dei campi elettromagnetici
 - Effetti sanitari
 - Effetti sensoriali
 - Effetti indiretti
- ❖ Effetti dei CEM in funzione della frequenza
 - Campi statici
 - Campi in bassa frequenza
 - Campi in alta frequenza
- ❖ Le basi scientifiche dei limiti di esposizione
 - Linee Guida ICNIRP
 - Grandezze di base e di riferimento
 - Esposizione dei lavoratori e della popolazione

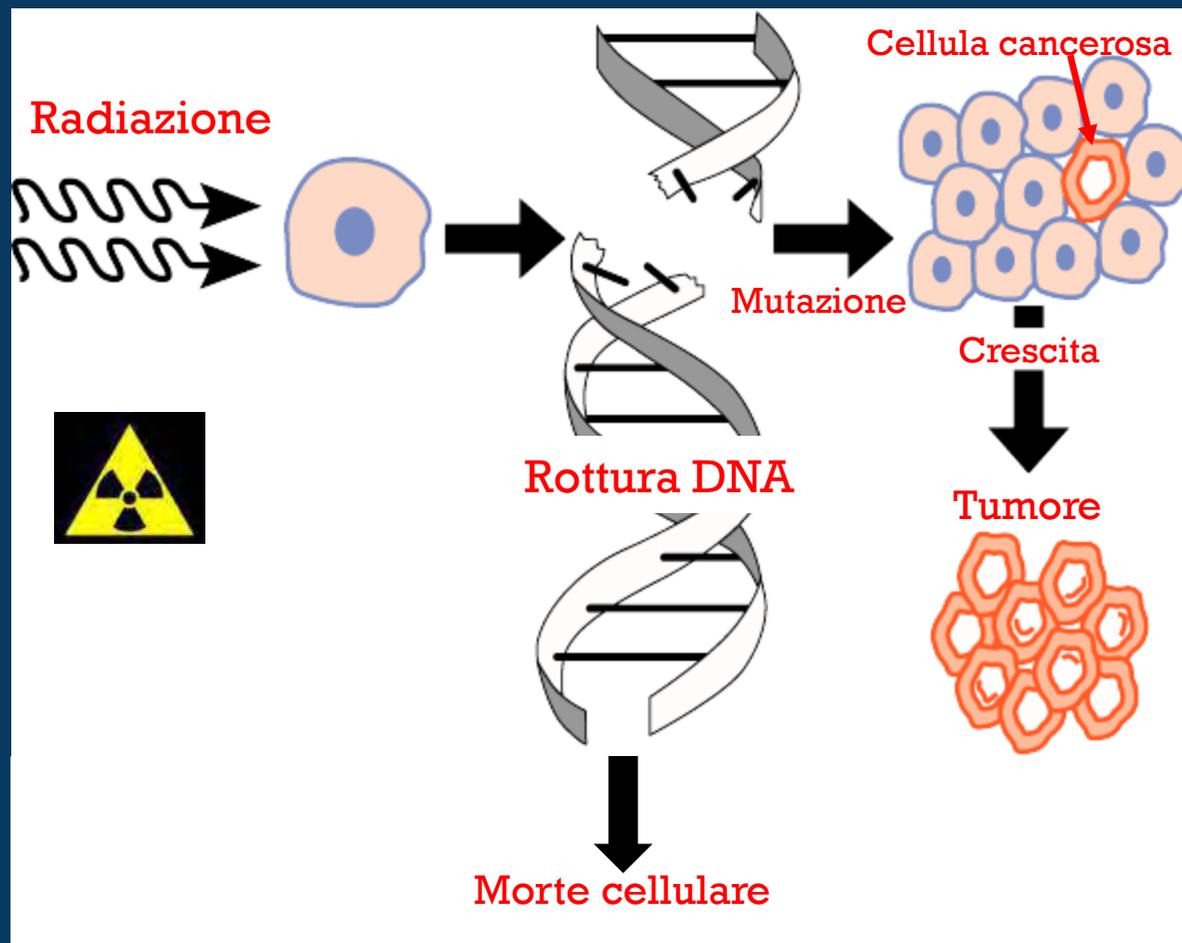
2° Parte

- ❖ Quadro normativo comunitario
 - Raccomandazione 1999/519/CE
 - Direttiva 2013/35/UE
- ❖ Quadro normativo nazionale
 - Legge 36/2001 e decreti attuativi
 - D.Lgs. 81/2008 come modificato dal D.Lgs. 159/2016
- ❖ Norme tecniche e banche dati
 - Norme tecniche CENELEC e CEI
 - Portale Agenti Fisici (PAF)
 - Guida Pratica Non Vincolante (NBG)

Lo spettro elettromagnetico



Radiazioni ionizzanti



- ❖ Hanno energia sufficiente a causare l'alterazione dei legami chimici e delle strutture atomiche (*ionizzazione*)
- ❖ Possono indurre danni genetici e cancro
- ❖ Producono effetti sia per esposizione *acuta* (intensità) sia per esposizione *cronica* (durata → effetto cumulativo)

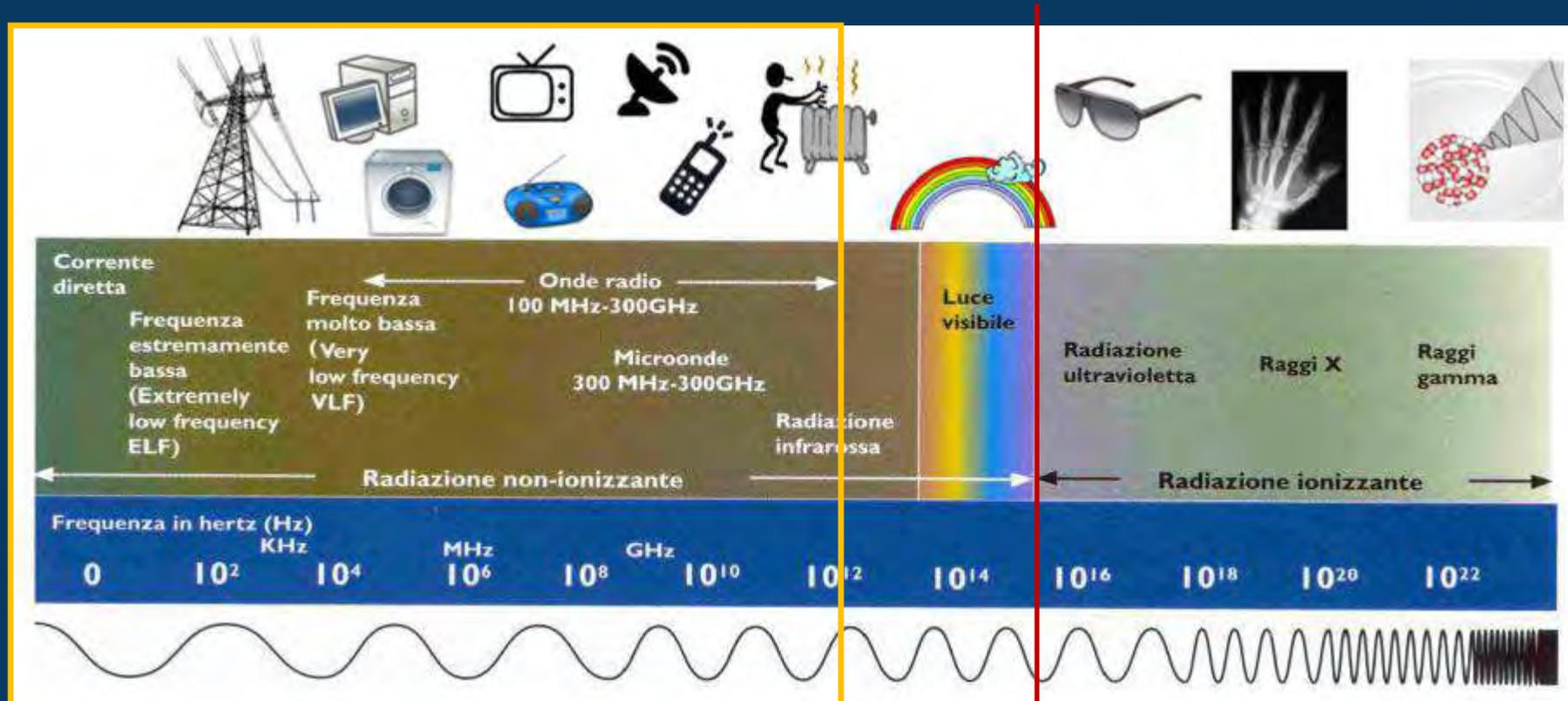
Potenziale di ionizzazione di un elettrone orbitale esterno: $E = 10 \text{ eV}$

❖ Legge di Planck → $E = h \cdot f$ ($h = 4.13 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$)

❖ $f = 2.4 \times 10^{15} \text{ Hz} \rightarrow E = 10.3 \text{ eV} \rightarrow \text{ionizzazione}$

→ $E \geq 10 \text{ eV}$ per $\lambda \leq 124 \text{ nm}$ (UVC)

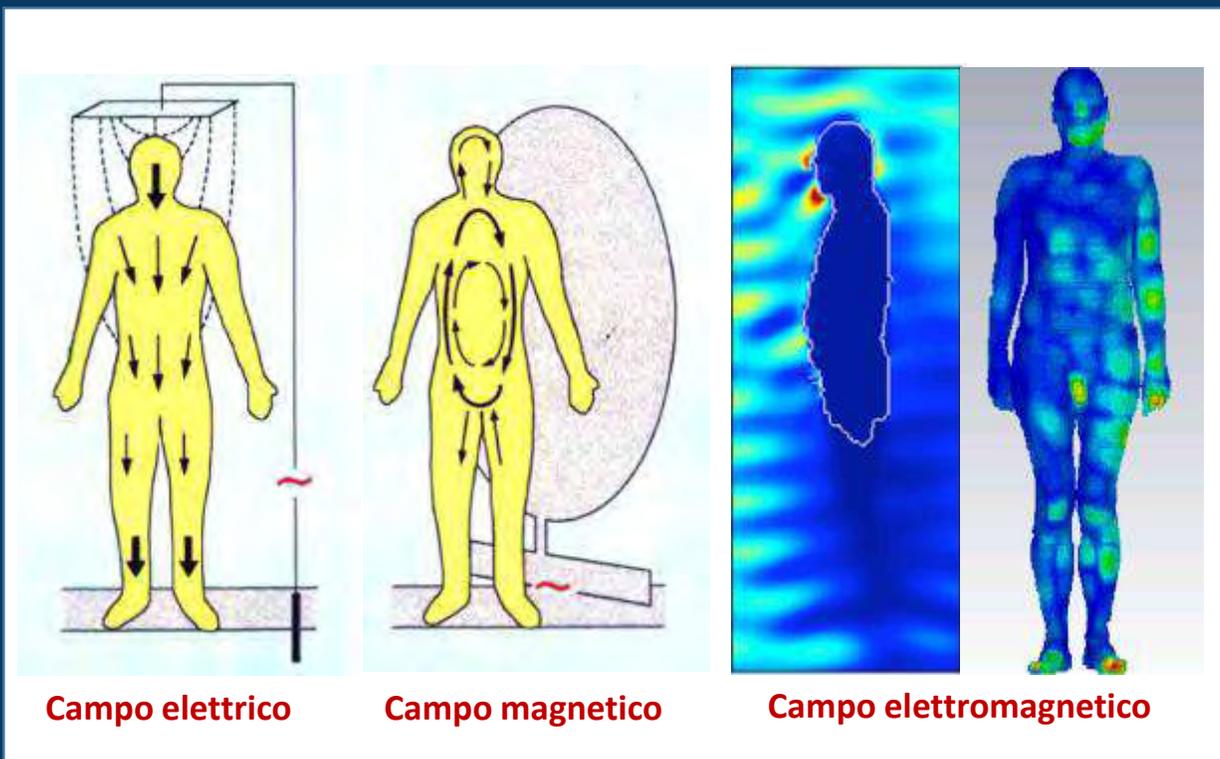
Campi elettromagnetici non ionizzanti (CEM)



Potenziale di ionizzazione di un elettrone orbitale esterno: $E = 10 \text{ eV}$

- Legge di Planck $\rightarrow E = h \cdot f$ ($h = 4.13 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$)
- $f = 300 \text{ GHz}$ $\rightarrow E = 1.2 \times 10^{-3} \text{ eV}$ \rightarrow energia non sufficiente a causare ionizzazione!

Interazione bioelettrica



- **Esposizione:** un corpo è immerso in un campo elettromagnetico
- **Accoppiamento:** le forze del campo interagiscono con le cariche elettriche presenti nei tessuti e inducono delle grandezze fisiche nel corpo dell'individuo esposto
- **Interazione:** le grandezze fisiche indotte dal campo esterno provocano nel corpo una deviazione dalle condizioni di equilibrio elettrico
- **Effetto:** variazione morfologica o funzionale rilevabile in tessuti o organi
- **Danno:** quando l'effetto fisiologico indotto non può essere naturalmente compensato dall'organismo e determina una condizione di detrimento per la salute

Effetti biologici dei CEM

- ❖ L'interazione di un campo elettromagnetico con la materia vivente non provoca necessariamente un effetto biologico apprezzabile e/o un danno per la salute
- ❖ Si verifica un **effetto biologico** quando l'esposizione al campo determina una **variazione fisiologica notevole o rilevabile** nel soggetto esposto
- ❖ Un effetto biologico **non comporta necessariamente conseguenze avverse per la salute** se le variazioni indotte sono confrontabili con quelle associate ai normali processi fisiologici che l'organismo è naturalmente in grado di compensare mediante **meccanismi di riparazione e adattamento**

Effetti avversi dei CEM

Possono derivare da:

- un'interazione diretta del campo con l'organismo biologico (effetti avversi diretti)
- un'interazione del campo con dispositivi medici, elementi metallici impiantati o portati sul corpo, oggetti metallici ed elementi presenti nell'ambiente (effetti avversi indiretti)

Gli effetti avversi per i quali è stato sperimentalmente accertato un nesso di causalità con l'esposizione al campo sono effetti acuti

- Gli effetti acuti sono **effetti a breve termine di tipo deterministico**, cioè si verificano entro un breve tempo dall'esposizione al campo ogni volta che il livello di esposizione raggiunge un determinato valore di soglia
- Una volta superata la soglia, la gravità dell'effetto aumenta proporzionalmente al livello di esposizione ma, a differenza delle radiazioni ionizzanti, gli effetti acuti dei CEM non sono cumulativi nel tempo

Effetti avversi di tipo diretto

Effetti sanitari

- Si verificano quando le variazioni fisiologiche indotte dall'esposizione al campo sono al di fuori dell'intervallo che l'organismo può normalmente compensare
- Persistono per tempi lunghi o permanentemente dopo la cessazione dell'esposizione e comportano una condizione di detrimento per la salute → rischio per la salute

Effetti sensoriali

- Si verificano quando le variazioni fisiologiche indotte dall'esposizione al campo determinano disturbi transitori (cessano in breve tempo una volta terminata l'esposizione) che influenzano le capacità cognitive o le funzioni muscolari
- Pur non comportando danni alla salute possono influire negativamente sulla capacità di agire e operare in modo sicuro → rischio per la sicurezza

Effetti avversi di tipo indiretto

- **Interferenza del campo con dispositivi medici attivi** (stimolatori cardiaci e defibrillatori, pompe per l'infusione di farmaci, ecc.)
- **Interferenza del campo con dispositivi medici passivi** (protesi metalliche, clip chirurgiche, ecc.) ed **elementi metallici inclusi nel corpo** (schegge, piercing, tatuaggi con pigmenti metallici, ecc.)
- **Rischio propulsivo di oggetti ferromagnetici** all'interno di campi magnetici statici di elevata intensità (> 100 mT)
- **Scariche elettriche e correnti di contatto attraverso gli arti** determinate dal contatto con un oggetto conduttore a un potenziale diverso dal corpo all'interno di un campo elettromagnetico
- **Innesco di dispositivi elettro-esplosivi (detonatori), incendi ed esplosioni** dovuti all'accensione di materiali infiammabili a causa di scintille prodotte da campi indotti, correnti di contatto o scariche elettriche

Effetti avversi di tipo indiretto

- **Interferenza del campo con *dispositivi medici attivi*** (stimolatori cardiaci e defibrillatori, pompe per l'infusione di farmaci, ecc.)
- **Interferenza del campo con *dispositivi medici passivi*** (protesi metalliche, clip



❖ **Le soglie degli effetti indiretti sono solitamente inferiori rispetto a quelle degli effetti diretti**

❖ **Gli effetti indiretti possono comportare rischi anche gravi per la salute e la sicurezza!!**

- **Innesco di dispositivi elettro-esplosivi (detonatori), incendi ed esplosioni** dovuti all'accensione di materiali infiammabili a causa di scintille prodotte da campi indotti, correnti di contatto o scariche elettriche

Effetti a lungo termine dei CEM



- Allo stato attuale non vi sono evidenze sufficienti di effetti dei CEM indotti dalle esposizioni *croniche*, cioè dalle esposizioni prolungate nel tempo anche a bassi livelli
- Più aumenta il tempo di latenza di un effetto più diventa difficile stabilire un **nesso causale** tra l'esposizione e un possibile effetto – che potrebbe avere un'origine **multifattoriale** o un'incidenza caratterizzata da **fluttuazioni statistiche**
- In base a **evidenze limitate** riscontrate da alcuni studi epidemiologici, la IARC ha classificato nel **gruppo 2B** (*possibili* cancerogeni umani) i **campi magnetici a bassa frequenza** (2001) con riferimento a un aumento del rischio di sviluppo di leucemie infantili, e i **campi elettromagnetici a radiofrequenza** (2011) con riferimento a un aumento del rischio di sviluppo di alcuni tumori cerebrali e del nervo acustico in utilizzatori intensivi di telefoni cellulari
- La IARC ha altresì evidenziato che i risultati di tali studi **non sono conclusivi né sufficienti a dimostrare un nesso causale** circa una possibile associazione tra esposizione cronica a CEM e rischio di sviluppo di tumori
- Le principali autorità scientifiche ritengono quindi che, attualmente, **non sussistono evidenze plausibili** circa relazioni tra dose ed effetto **utili a definire valori di soglia e restrizioni per le esposizioni subacute o croniche a CEM**

Effetti dei CEM in funzione della frequenza

Gli effetti acuti indotti dall'interazione dei CEM con gli organismi biologici dipendono dall'intervallo di frequenze di esposizione:

- Nell'intervallo delle **basse frequenze** (fino a circa 100 kHz) gli effetti sono relativi alla **stimolazione degli organi sensoriali, nervi e muscoli** (effetti non termici)
 - Nell'intervallo delle **alte frequenze** (da 10 MHz a 300 GHz) gli effetti sono relativi al **riscaldamento dei tessuti** (effetti termici)
 - Nell'intervallo delle **frequenze intermedie** (da 100 kHz a 10 MHz) si associano **effetti di stimolazione e di riscaldamento**
- **Esposizioni elevate** (cioè a campi al di sopra di determinati valori di soglia) possono comportare rischi per la salute e/o per la sicurezza

Programma

1° Parte

- ❖ Effetti biologici dei campi elettromagnetici
 - Effetti sanitari
 - Effetti sensoriali
 - Effetti indiretti
- ❖ Effetti dei CEM in funzione della frequenza
 - Campi statici
 - Campi in bassa frequenza
 - Campi in alta frequenza
- ❖ Le basi scientifiche dei limiti di esposizione
 - Linee Guida ICNIRP
 - Grandezze di base e di riferimento
 - Esposizione dei lavoratori e della popolazione

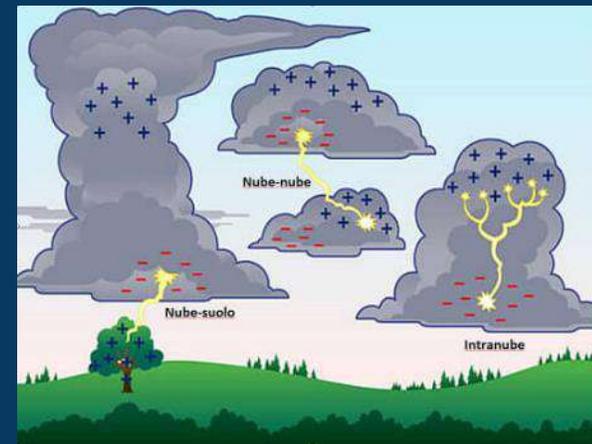
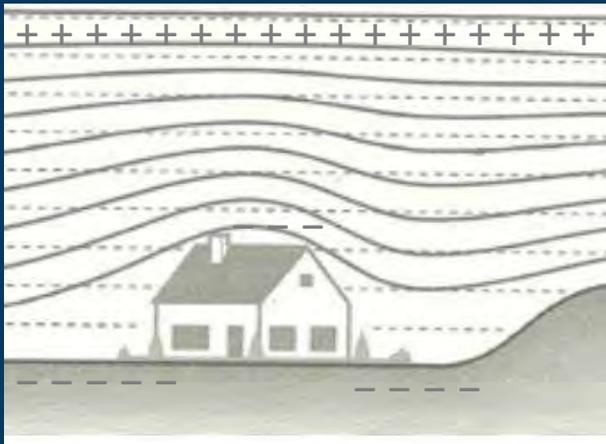
2° Parte

- ❖ Quadro normativo comunitario
 - Raccomandazione 1999/519/CE
 - Direttiva 2013/35/UE
- ❖ Quadro normativo nazionale
 - Legge 36/2001 e decreti attuativi
 - D.Lgs. 81/2008 come modificato dal D.Lgs. 159/2016
- ❖ Norme tecniche e banche dati
 - Norme tecniche CENELEC e CEI
 - Portale Agenti Fisici (PAF)
 - Guida Pratica Non Vincolante (NBG)

Campi elettrici statici naturali

I campi elettrici statici sono presenti naturalmente nell'atmosfera:

- valori dell'ordine di 100 V/m con tempo sereno
- valori fino a 30 kV/m sotto alle nuvole temporalesche



Campi elettrici statici artificiali

Le **linee elettriche in corrente continua** possono produrre all'interno dei vagoni valori di campo elettrico statico fino a 20 kV/m



Effetti dei campi elettrici statici

Effetti diretti

- I campi elettrici statici inducono **cariche elettriche sulla superficie del corpo**
- Una densità di carica sufficientemente elevata può essere percepita grazie all'azione sui peli cutanei e ad effetti come le **microscariche elettriche**
- La **soglia di percezione** di cariche elettriche di superficie è compresa tra 10 e 45 kV/m, ma varia tra gli individui e dipende dal grado d'isolamento da terra
- Per la maggior parte delle persone la sensazione fastidiosa di cariche elettriche di superficie non è avvertibile a intensità di campo inferiori a 25 kV/m (Raccomandazione 1999/519/CE)

Effetti indiretti

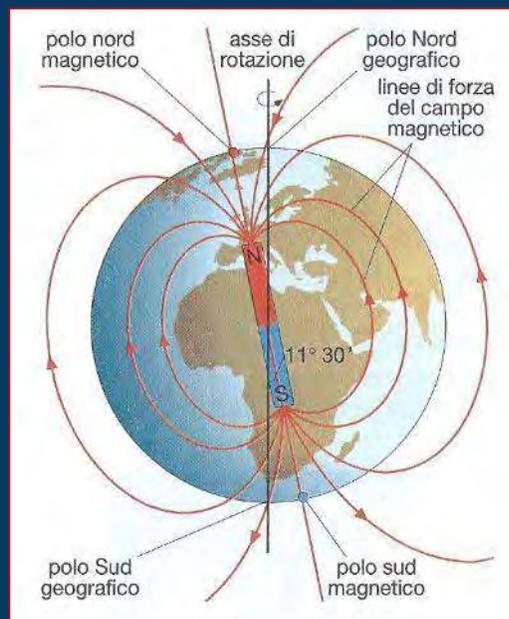
Possono verificarsi **scariche elettriche** quando:

- un individuo isolato da terra tocchi un oggetto conduttore messo a terra
- un individuo messo a terra tocchi un oggetto conduttore isolato da terra



Campi magnetici statici naturali

Il **campo geomagnetico** sulla superficie terrestre varia tra $30 \mu\text{T}$ all'equatore e $70 \mu\text{T}$ ai poli, ed è probabilmente implicato nell'orientamento e nella migrazione degli uccelli e di altre specie animali



Campi magnetici statici artificiali



Campi magnetici statici artificiali sono generati laddove si utilizzi una corrente continua (CC) – ad esempio:

- **linee elettriche in CC** (50-100 μT a 1 m da linea interrata a 500 kV, 2 kA)
- **colonnine per ricarica rapida di veicoli elettrici** (fino a 500 μT a 1 cm dal cavo di alimentazione in CC)
- **magneti superconduttori** (fino a 1,5 – 3 T nelle RM di diagnostica per immagini, fino a 7 T nelle RM sperimentali ad alto campo)



Campi magnetici statici artificiali



Campi magnetici statici artificiali sono generati laddove si utilizzi una corrente continua (CC) – ad esempio:

- **linee elettriche in CC** (50-100 μT a 1 m da linea interrata a 500 kV, 2 kA)
- **colonnine di ricarica rapida veicoli elettrici** (fino a 500 μT a 1 cm dal cavo di alimentazione in CC)
- **magneti superconduttori** (fino a 1,5 – 3 T nella diagnostica per immagini, fino a 7 T nelle risonanze sperimentali ad alto campo)



Limite popolazione: 40 mT



Interferenza con DMIA: 500 μT

Rischio propulsivo per sorgenti > 100 mT



Effetti diretti dei campi magnetici statici



Le conoscenze attuali non indicano alcun effetto sanitario rilevante a seguito di un'esposizione a valori di campo magnetico statico (CMS) fino a 8 T per gli individui non in movimento (ICNIRP 2009)

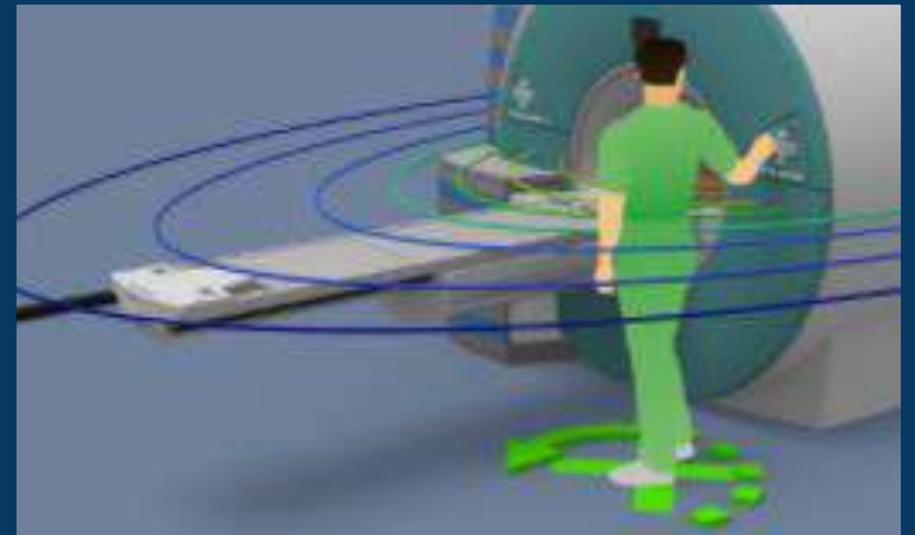
- ❖ E' stato osservato un aumento limitato della pressione sistolica del sangue per esposizioni a CMS maggiori di 8 T
- ❖ In base a modelli, si prevede una riduzione significativa del flusso sanguigno a livelli di campo superiori a 15 T

Il movimento in un gradiente spaziale di CMS può indurre all'interno del corpo un campo elettrico e quindi correnti elettriche variabili nel tempo con frequenze fino ad alcuni Hz

- ❖ I campi elettrici indotti dal **movimento in un CMS > 2 T** possono raggiungere valori significativi, tali da determinare **effetti sensoriali** causati dalla **stimolazione del sistema vestibolare (nausea e vertigini)** e del **sistema nervoso centrale (SNC)** con **possibile manifestazione di fosfeni** (sensazioni visive simili a lampi di luce, causate dai campi elettrici e correnti indotti nella retina)
- ❖ Sebbene transitori, gli **effetti sensoriali possono influire sul coordinamento dei movimenti** e quindi possono determinare un **impatto negativo sulla sicurezza** di lavoratori impegnati in procedure delicate
- ❖ Il movimento in un CMS di intensità molto elevata ($dB/dt > 2,7 \text{ T/s}$) può altresì indurre **effetti sanitari** quali la **stimolazione del sistema nervoso periferico (SNP)** con possibile **eccitazione muscolare** (ICNIRP 2014)

Misure di protezione dagli effetti sensoriali indotti dai campi magnetici statici

- Il D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. fissa un VLE di 2 T per la protezione dagli effetti sensoriali indotti dal movimento nel campo magnetico statico (CMS) in *condizioni di lavoro normali*
- Nel caso in cui siano verificate le condizioni di cui all'art. 208, comma 5, lett. a) del D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. per il superamento dei VLE sensoriali (*superamento temporaneo giustificato dalla pratica o dal processo produttivo, rispetto dei VLE sanitari e assenza di rischi per la sicurezza*) devono essere adottate **misure di protezione specifiche dagli effetti transitori di vertigini e nausea indotti dal movimento nel CMS quali il controllo dei movimenti** (art. 210, comma 6)



Effetti indiretti dei campi magnetici statici



- Valori di campo magnetico statico di intensità superiore a **0,5 mT** possono causare **interferenze con dispositivi medici attivi impiantati o portati sul corpo** (ad es. stimolatori cardiaci, defibrillatori, pompe per infusione di farmaci, ecc.)
- I **dispositivi medici passivi** (ad es, protesi o impianti) e gli **inclusi metallici ferromagnetici** (ad es. schegge, piercing, ecc.) possono subire azioni di torsione o dislocazione per esposizioni a campi magnetici statici di intensità superiore a **3 mT** nel campo periferico di sorgenti > 100 mT
- Considerazioni analoghe al caso precedente valgono per gli **oggetti ferromagnetici portati sul corpo** (ad es. orologi, chiavi, occhiali) o **presenti nell'ambiente** (ad es. sedie, tavoli, cacciaviti, ecc.)



Programma

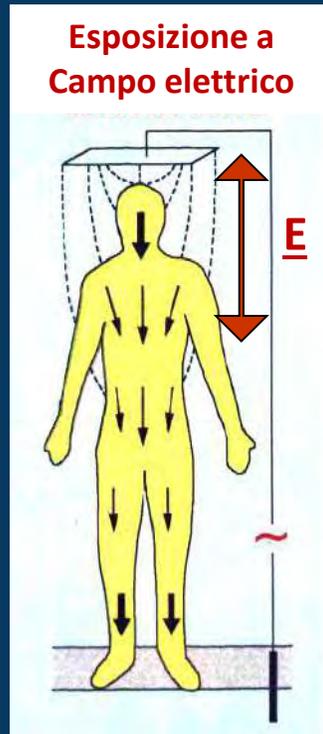
1° Parte

- ❖ Effetti biologici dei campi elettromagnetici
 - Effetti sanitari
 - Effetti sensoriali
 - Effetti indiretti
- ❖ Effetti dei CEM in funzione della frequenza
 - Campi statici
 - Campi in bassa frequenza
 - Campi in alta frequenza
- ❖ Le basi scientifiche dei limiti di esposizione
 - Linee Guida ICNIRP
 - Grandezze di base e di riferimento
 - Esposizione dei lavoratori e della popolazione

2° Parte

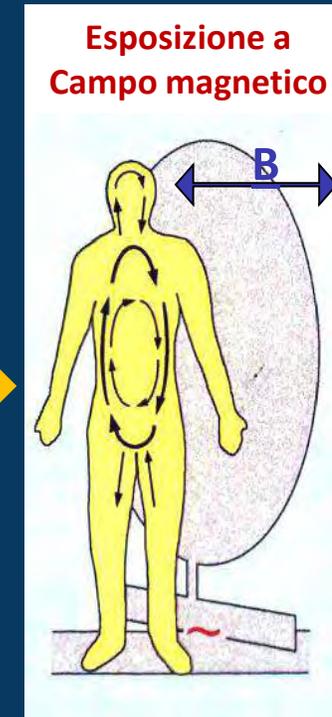
- ❖ Quadro normativo comunitario
 - Raccomandazione 1999/519/CE
 - Direttiva 2013/35/UE
- ❖ Quadro normativo nazionale
 - Legge 36/2001 e decreti attuativi
 - D.Lgs. 81/2008 come modificato dal D.Lgs. 159/2016
- ❖ Norme tecniche e banche dati
 - Norme tecniche CENELEC e CEI
 - Portale Agenti Fisici (PAF)
 - Guida Pratica Non Vincolante (NBG)

Interazioni dei campi in bassa frequenza (1 Hz – 100 kHz)



Fino a circa 100 kHz i tessuti biologici possono essere considerati buoni conduttori elettrici

L'induzione di correnti è il meccanismo macroscopico di interazione tra i campi in bassa frequenza e il corpo umano

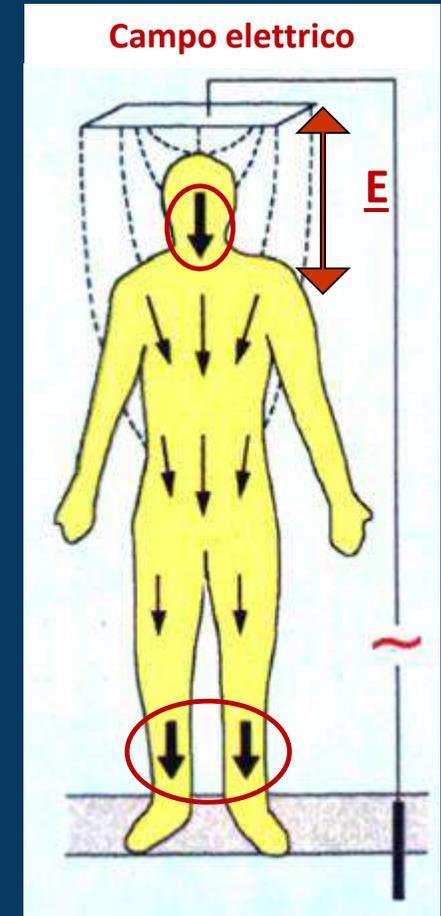


Le linee di forza del **campo elettrico** sono quasi perpendicolari alla superficie corporea esposta su cui sono indotte cariche elettriche oscillanti che producono un flusso di corrente attraverso il corpo diretto verso terra

Il **campo magnetico** induce la circolazione di correnti all'interno del corpo con intensità dipendente dalla intensità dello stesso campo magnetico e dalla dimensione della sezione corporea esposta

Interazioni dei campi elettrici in bassa frequenza (1 Hz – 100 kHz)

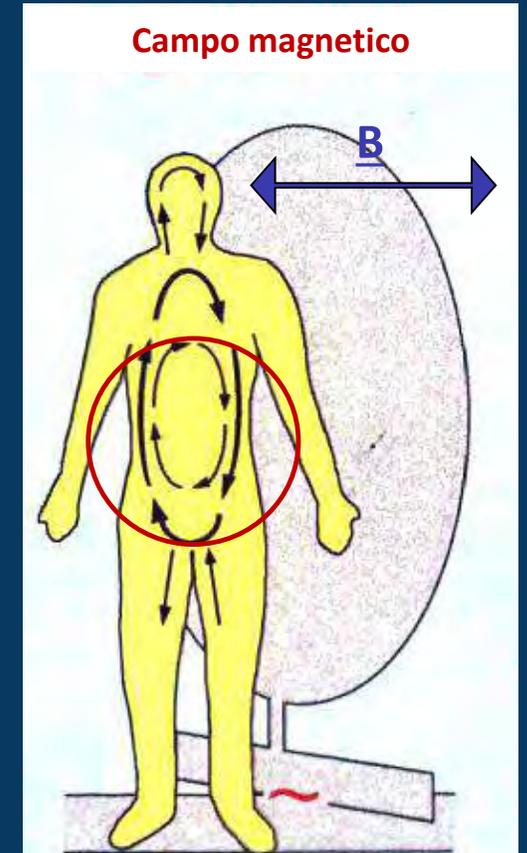
- Il campo elettrico indotto all'interno del corpo è inferiore di 5–6 ordini di grandezza rispetto al campo esterno ed è orientato prevalentemente nella direzione verticale (come il campo esterno)
- I campi elettrici interni più elevati si hanno quando il corpo è in contatto elettrico con il terreno mentre i campi più deboli si hanno quando il corpo è isolato dal terreno
- La corrente che fluisce attraverso un corpo a contatto con il terreno è determinata dalle dimensioni e dalla forma del corpo (postura inclusa)
- La distribuzione delle correnti indotte negli organi e nei tessuti dipende dalle rispettive conducibilità elettriche



*Un campo elettrico incidente di **100 kV/m @ 50 Hz** determina un campo all'interno del corpo di circa **4 mV/m**
(Limiti di base ICNIRP 2010 per la popolazione: 20 mV/m nel SNC, 400 mV/m negli altri tessuti)*

Interazioni dei campi magnetici in bassa frequenza (1 Hz – 100 kHz)

- Alle basse frequenze la permeabilità magnetica dei tessuti è identica a quella dell'aria, pertanto **il campo magnetico all'interno del corpo è praticamente uguale a quello esterno**
- **La principale interazione dei campi magnetici consiste nell'induzione di campi elettrici interni al corpo** e quindi nella **circolazione di correnti all'interno del corpo** con intensità dipendente dalla intensità del campo magnetico e dalla dimensione della sezione considerata
- **I campi elettrici interni (e le relative correnti indotte) sono massimi quando il campo magnetico esterno è orientato perpendicolarmente rispetto al corpo, cioè quando è massima la sezione corporea esposta**, mentre i campi elettrici interni più deboli si hanno quando il campo magnetico esterno è orientato lungo l'asse verticale del corpo



*Un campo magnetico incidente di **100 μ T @ 50 Hz** determina un campo elettrico interno nella testa di circa **10 mV/m** (Limite di base ICNIRP 2010 per la popolazione nel SNC: 20 mV/m)*

Effetti diretti dei campi in bassa frequenza

Per esposizioni al di sopra di determinati **valori di soglia**, il campo elettrico indotto all'interno del corpo e le correnti circolanti sono in grado di causare la **stimolazione di tessuti elettricamente eccitabili (nervi e muscoli)** determinando **effetti non termici di tipo sensoriale o sanitario a seconda del livello di esposizione**

- ❖ Gli **effetti sensoriali** di stimolazione sono effetti transitori che influenzano le funzioni neuromuscolari determinando sensazioni fastidiose, ad esempio:
 - magnetofosfeni (lampi di luce)
 - formicolio, lievi contrazioni muscolari
- ❖ Gli **effetti sanitari** di stimolazione alterano in modo significativo le funzioni neuromuscolari con esiti che possono arrecare un danno anche fatale alla salute, ad esempio:
 - contrazioni muscolari, tetanizzazione, arresto respiratorio
 - alterazione del ritmo cardiaco (aritmie, extrasistole, fibrillazioni ventricolari)

Valori di soglia per gli effetti di stimolazione (10 – 400 Hz)

| Effetti acuti di tipo diretto (elenco non esaustivo) | Densità di corrente J [mA/m ²] | Induzione magnetica B [mT] |
|---|---|-------------------------------|
| Assenza di effetti apprezzabili | < 1 | < 0,5 |
| Effetti biologici minori | 1-10 | 0,5-5 |
| Magnetofosfeni e possibili effetti transitori sul sistema nervoso | 10-100 | 5 – 50 |
| Contrazioni muscolari involontarie (convulsioni) con possibili effetti sanitari | 100-1000 | 50-500 |
| Extrasistole e fibrillazione ventricolare, blocco della respirazione | > 1000 | > 500 |

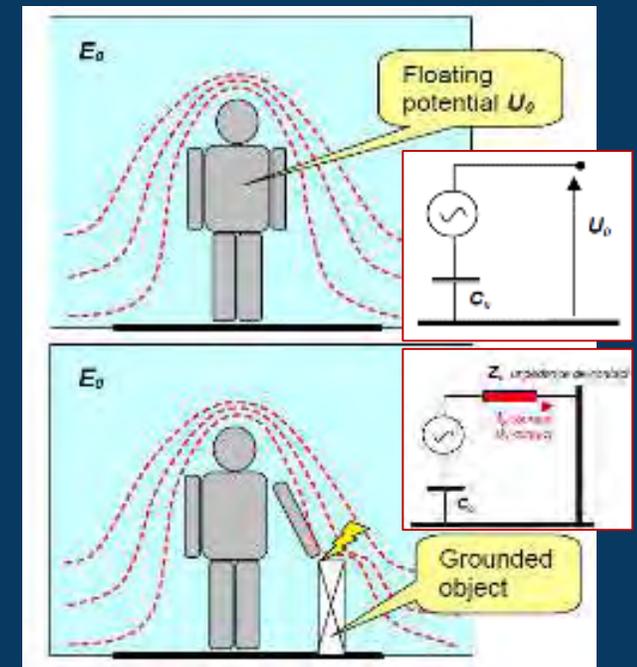
AIRM 2012

Effetti indiretti dei campi (1 Hz – 110 MHz)

Scariche elettriche e Correnti di contatto



- Le **cariche superficiali indotte dai campi elettrici** possono essere percepite e provocare **scariche elettriche** anche dolorose quando si entra in contatto con un **oggetto conduttore ad un potenziale elettrico diverso da quello del corpo**
- Una **corrente di contatto** può manifestarsi quando in un campo elettrico il corpo entra in contatto con un **oggetto conduttore** (ad es. una struttura metallica) anche non direttamente sotto tensione che si trova **a un potenziale elettrico diverso da quello del corpo**
- La **scarica elettrica e la corrente transitoria a seguito del contatto** sono assimilabili alla scarica di un condensatore costituito da una persona e/o un oggetto caricato elettricamente o a potenziale flottante



Effetti delle scariche elettriche (1)



In base agli studi pubblicati, il potenziale elettrico a livello del suolo (U_0) di un individuo isolato da terra ed esposto a un campo elettrico ambientale E_0 è pari a:

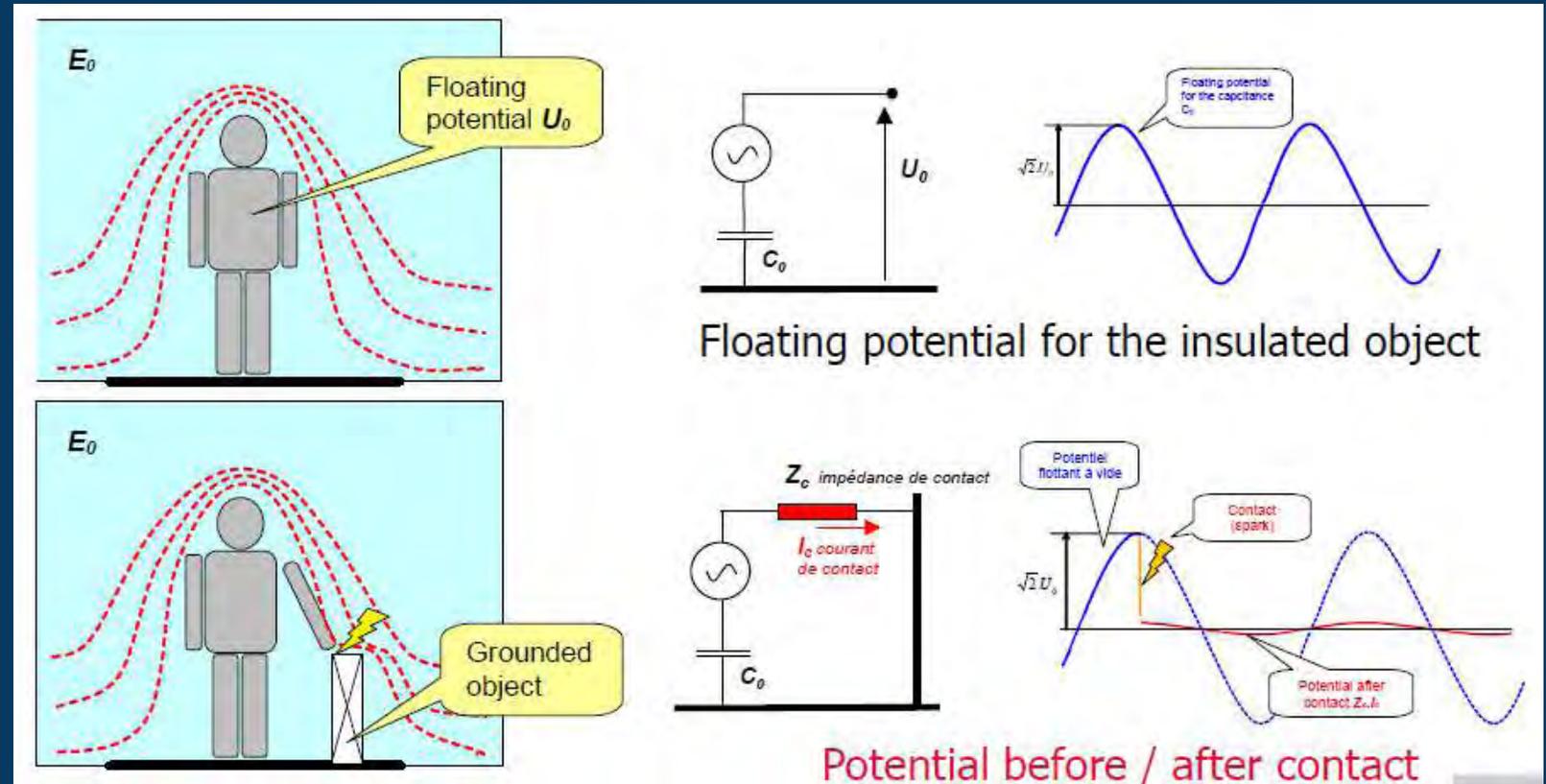
$$U_0 \approx 0,3 \cdot E_0$$

Con $E_0 = 10 \text{ kV/m}$ (valore efficace) si ha quindi:

$$U_0 \approx 3,3 \text{ kV (valore efficace)}$$

$$\text{ossia } U_0 \approx 4,7 \text{ kV (valore di picco)}$$

Sotto tali tensioni, le scariche elettriche possono essere dolorose!



Effetti delle scariche elettriche (2)



In base agli studi pubblicati, il potenziale elettrico a livello del suolo (U_0) di un individuo isolato da terra ed esposto a un campo elettrico ambientale E_0 è pari a:

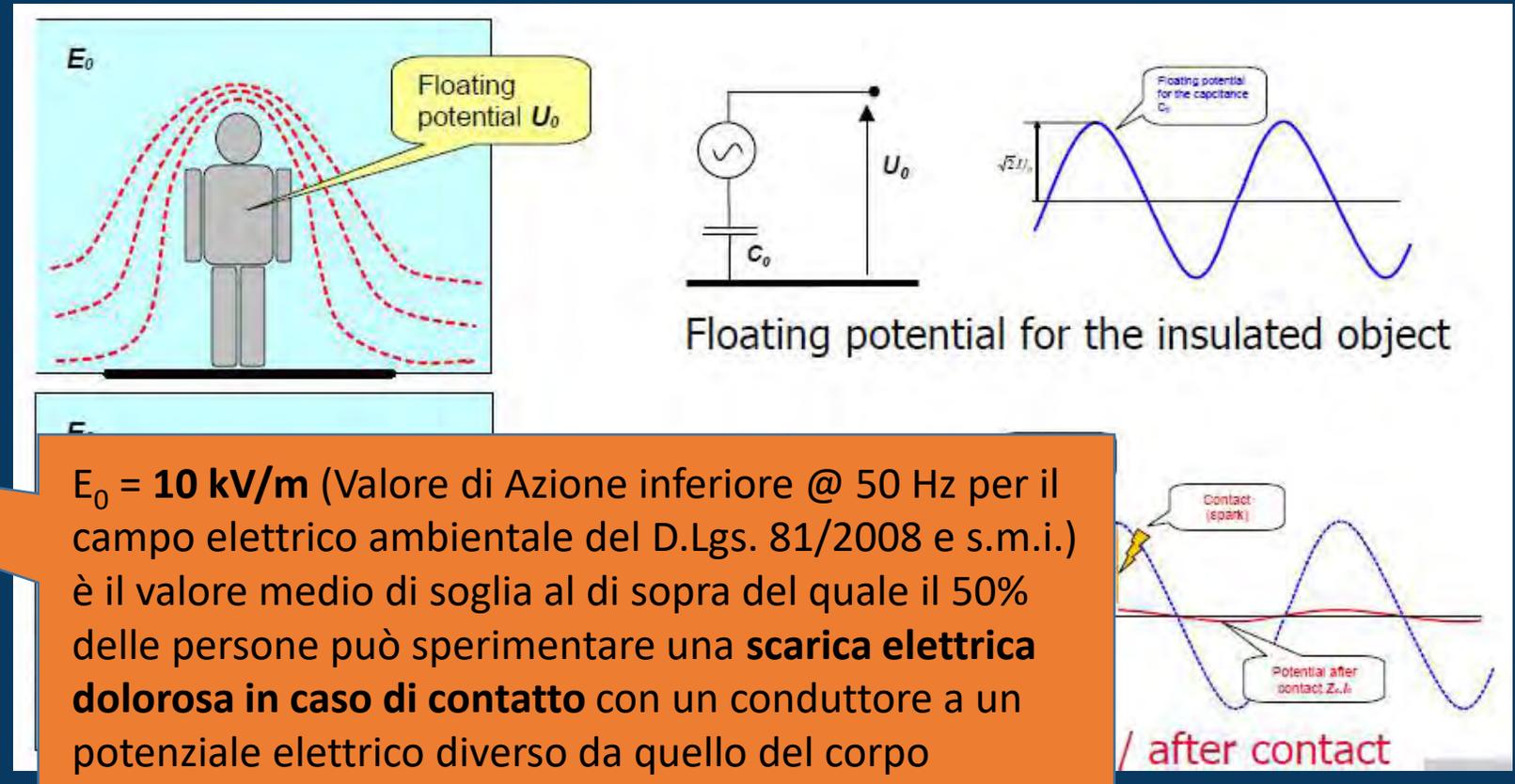
$$U_0 \approx 0,3 \cdot E_0$$

Con $E_0 = 10 \text{ kV/m}$ (valore efficace) si ha quindi:

$$U_0 \approx 3,3 \text{ kV (valore efficace)}$$

$$\text{ossia } U_0 \approx 4,7 \text{ kV (valore di picco)}$$

Sotto tali tensioni, le scariche elettriche possono essere dolorose!



Misure di protezione dalle scariche elettriche



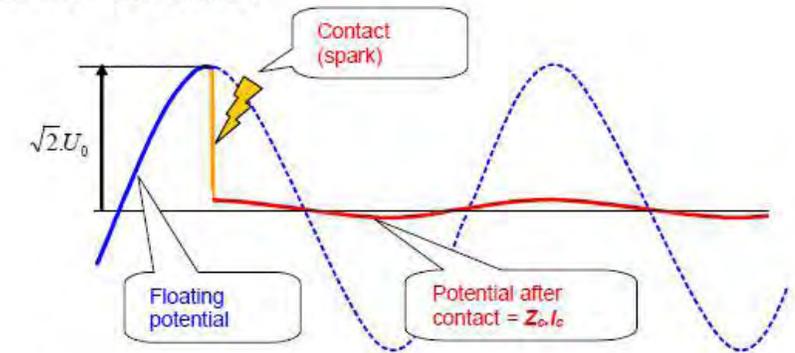
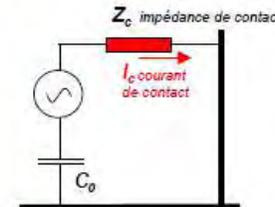
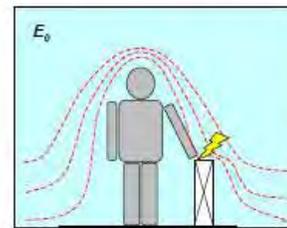
- ❖ Nelle sottostazioni elettriche sussiste la possibilità di superare il VA $(E)_{inf}$ di 10 kV/m a 50 Hz qualora si lavori al di sotto di conduttori elettrici con livelli di tensione superiore a 200 kV
- ❖ In tali circostanze i lavoratori addetti devono essere informati della possibilità di sperimentare scariche elettriche fastidiose e devono ricevere una formazione specifica sui rischi e un addestramento sui metodi di lavoro e gli strumenti per proteggersi dalle scariche
- ❖ Possibili metodi per ridurre i rischi e mitigare le scariche (da valutare caso per caso):
 - Ridurre l'esposizione al campo elettrico mediante uso di tute conduttive o schermature metalliche
 - Collegare a terra il lavoratore mediante scarpe o ghette conduttive
 - Aumentare l'isolamento elettrico mediante uso di guanti isolanti (in genere non raccomandato)
 - Adottare gesti appropriati (ad es. contatti brevi e rapidi, aumento della superficie di contatto,...)

Effetti delle correnti di contatto (1)

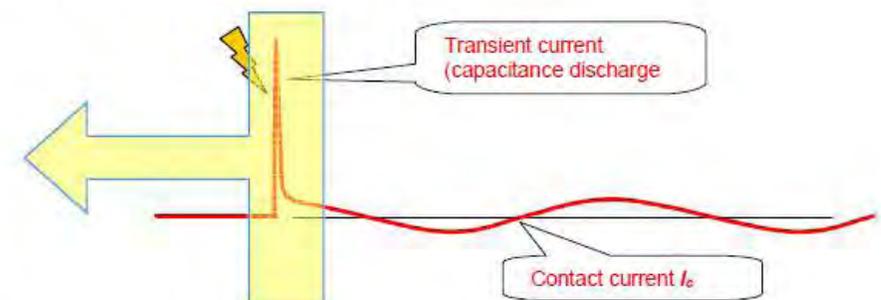
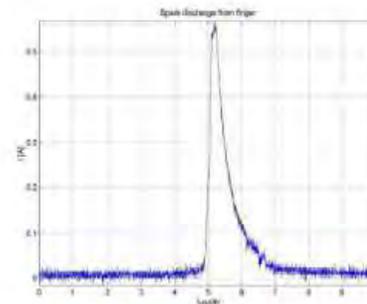


- L'intensità della corrente di contatto è proporzionale all'intensità del campo e alla frequenza
- Può inoltre dipendere dalle dimensioni dell'oggetto conduttore, dalla corporatura della persona, dall'area di contatto e dalle modalità con cui entrambi sono collegati o accoppiati a terra

Floating potential / potential after contact



Transient current / contact current

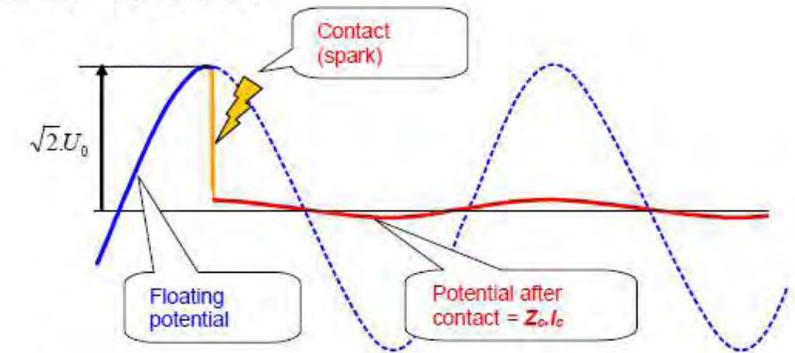
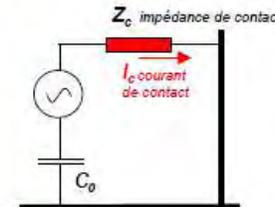
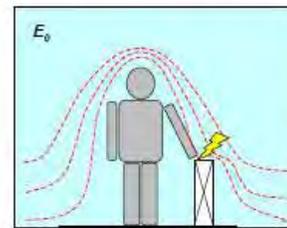


Effetti delle correnti di contatto (2)

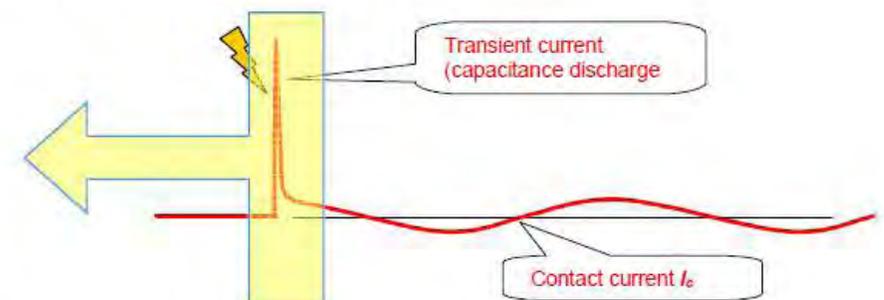
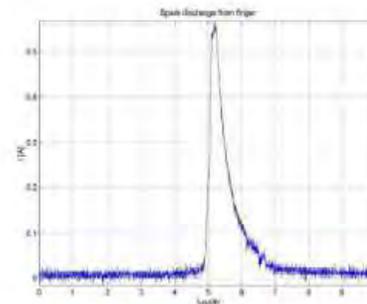


- $I_c = 1 \text{ mA}$ (Valore di Azione @ 50 Hz D.Lgs. 81/2008) è la **soglia di sensibilità media** delle persone per un **effetto sensoriale doloroso** in caso di contatto con la punta di un dito
- La soglia per uno **shock doloroso** in caso di un contatto veloce è un ordine di grandezza maggiore (circa **10 mA @ 50 Hz**)

Floating potential / potential after contact



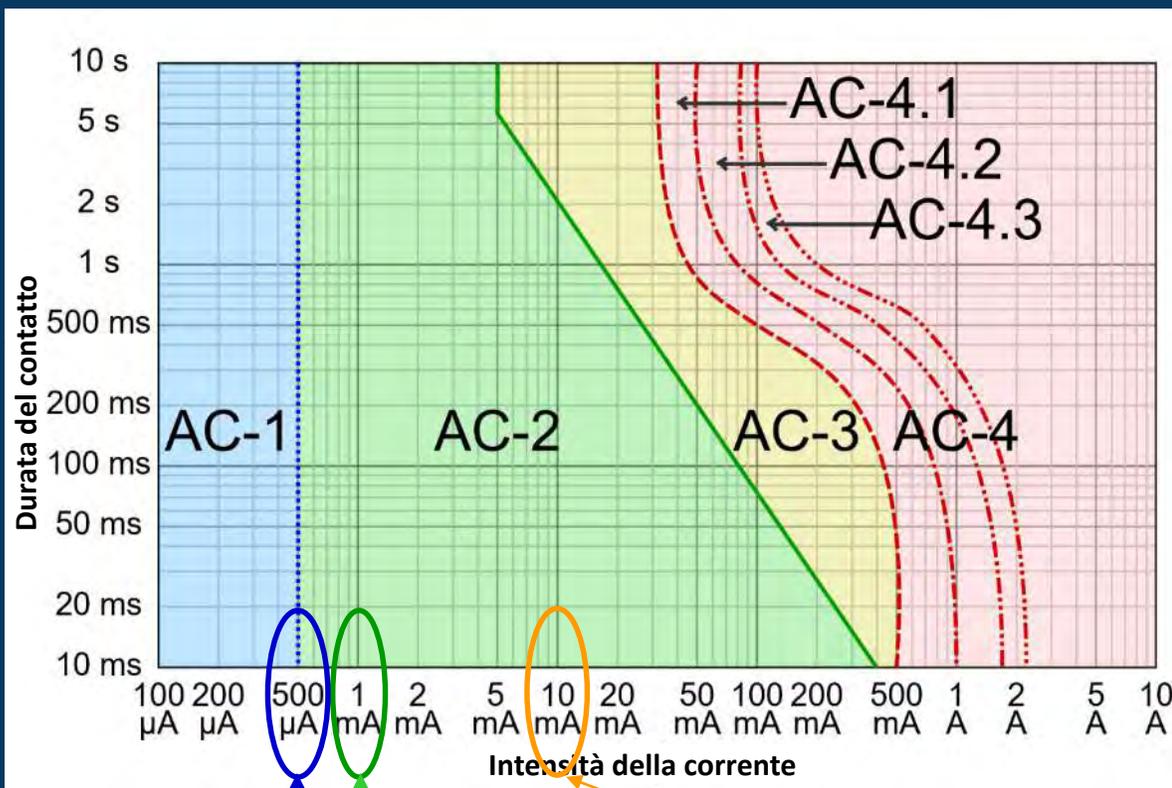
Transient current / contact current



Effetti delle correnti di contatto (3)



CEI IEC 60479-1:2020



LR popolazione
(Racc. 1999/519/CE)

VA esposiz. profes.
(D.Lgs. 81/2008)

Soglia shock
doloroso

5.8 Description of time/current zones (see Figure 20)

Table 11 – Time/current zones for a.c. 15 Hz to 100 Hz for hand to feet pathway – Summary of zones of Figure 20

| Zones | Boundaries | Physiological effects |
|--------------------|---|---|
| AC-1 | Up to 0,5 mA curve a | Perception possible but usually no 'startled' reaction |
| AC-2 | 0,5 mA up to curve b | Perception and involuntary muscular contractions likely but usually no harmful electrical physiological effects |
| AC-3 | Curve b and above | Strong involuntary muscular contractions. Difficulty in breathing. Reversible disturbances of heart function. Immobilization may occur. Effects increasing with current magnitude. Usually no organic damage to be expected |
| AC-4 ¹⁾ | Above curve c_1 c_1-c_2 c_2-c_3 Beyond curve c_3 | Patho-physiological effects may occur such as cardiac arrest, breathing arrest, and burns or other cellular damage. Probability of ventricular fibrillation increasing with current magnitude and time AC-4.1 Probability of ventricular fibrillation increasing up to about 5 % AC-4.2 Probability of ventricular fibrillation up to about 50 % AC-4.3 Probability of ventricular fibrillation above 50 % |

¹⁾ For durations of current flow below 200 ms, ventricular fibrillation is only initiated within the vulnerable period if the relevant thresholds are surpassed. As regards ventricular fibrillation, this figure relates to the effects of current which flows in the path left hand to feet. For other current paths, the heart current factor has to be considered.

Misure di protezione dalle correnti di contatto

- In generale non vi sono rischi di superare il **VA (Ic) di 1 mA a 50 Hz** (soglia per gli effetti sensoriali dolorosi) durante i lavori nelle **sottostazioni elettriche** per i lavoratori che toccano strutture od oggetti metallici collegati a terra
- Il rischio di superare il VA (Ic) di 1 mA sussiste qualora il lavoratore entri in contatto con **grandi strutture od oggetti conduttori non collegati a terra** (ad es. autoveicoli)
- In questo caso una possibile soluzione è quella di **collegare a terra gli oggetti conduttori flottanti durante i lavori nelle sottostazioni**



Campi elettrici e magnetici in bassa frequenza

Esposizioni residenziali

Esposizioni residenziali (popolazione) a campi elettrici e magnetici in bassa frequenza sono determinate, ad esempio, dagli **elettrodomestici** e dalle **linee elettriche** in corrente alternata (50/60 Hz)



Campi elettrici e magnetici in bassa frequenza

Esposizioni professionali

Esposizioni professionali a campi elettrici e magnetici in bassa frequenza sono determinate, ad esempio, da linee elettriche in alta tensione, cabine di trasformazione, apparecchiature industriali in corrente alternata (50/60 Hz), ecc.



VA_{inf} @ 50 Hz (D.Lgs. 81/2008)
10 kV/m / 1 mT



Picco ponderato

