

**LINEE GUIDA PER LA LIMITAZIONE DELL'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
VARIABILI NEL TEMPO (1 Hz – 100 kHz)**

Commissione Internazionale sulla Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti**

Traduzione italiana di:

Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)
Health Physics 99(6):818-836 (2010)

INTRODUZIONE

In questo documento si definiscono linee guida per la protezione di soggetti esposti a campi elettrici e magnetici nell'intervallo spettrale delle basse frequenze. I principi generali per lo sviluppo delle linee guida dell'ICNIRP sono stati pubblicati altrove (ICNIRP 2002). Ai fini di questo documento, l'intervallo delle basse frequenze si estende da 1 Hz a 100 kHz. Al di sopra di 100 kHz diventano dominanti effetti specifici dei campi a radiofrequenza, che sono coperti da altre linee guida dell'ICNIRP. Tuttavia, nell'intervallo di frequenze tra 100 kHz e circa 10 MHz si deve considerare la protezione da effetti specifici tanto delle basse quanto delle alte frequenze, secondo le condizioni di esposizione. Quindi, alcune raccomandazioni fornite in questo documento si estendono fino a 10 MHz per coprire, in questo intervallo di frequenze, gli effetti specifici delle basse frequenze. Le linee guida per i campi magnetici statici sono state fornite in un documento a parte (ICNIRP 2009). Linee guida applicabili ai campi elettrici indotti dal movimento o da campi magnetici variabili nel tempo con frequenze fino a 1 Hz saranno pubblicate separatamente.

Questa pubblicazione sostituisce la parte relativa alle basse frequenze delle linee guida del 1998 (ICNIRP 1998). L'ICNIRP sta attualmente rivedendo le linee guida per la porzione di spettro corrispondente alle alte frequenze (al di sopra di 100 kHz).

SCOPO E CAMPO D'APPLICAZIONE

Il principale obiettivo di questa pubblicazione è di stabilire linee guida per la limitazione dell'esposizione a campi elettrici e magnetici, che forniscano protezione contro tutti gli effetti nocivi accertati.

Si sono valutati gli studi su effetti sia diretti sia indiretti; i primi sono dovuti a interazioni dirette dei campi con il corpo, mentre i secondi comportano interazioni con un oggetto conduttore quando il potenziale elettrico di quest'ultimo è diverso da quello del corpo. Vengono qui discussi i risultati degli studi di laboratorio ed epidemiologici, i criteri fondamentali per la valutazione dell'esposizione ed i livelli di riferimento per una stima pratica del rischio; le linee guida qui presentate sono applicabili sia alle esposizioni professionali sia a quelle del pubblico.

Le restrizioni fornite in queste linee guida sono basate su evidenze accertate di effetti acuti; le conoscenze attualmente disponibili indicano che il rispetto di queste restrizioni protegge i lavoratori ed il pubblico dagli effetti nocivi di esposizioni a campi elettromagnetici a bassa frequenza. Un'attenta analisi dei dati epidemiologici e biologici relativi a malattie croniche ha portato a concludere che non vi è nessuna solida evidenza che queste patologie siano causalmente legate all'esposizione a campi elettromagnetici a bassa frequenza.

Queste linee guida non trattano standard di prodotto, il cui scopo è di limitare le emissioni di specifici apparecchi in specifiche condizioni di prova, né trattano le tecniche di misura delle grandezze fisiche che caratterizzano i campi

** ICNIRP, c/o BfS – G. Ziegelberger, Ingolstaedter Landstr. 1, 85764 Oberschleissheim, Germania.

Per corrispondenza o ristampe, contattare G. Ziegelberger all'indirizzo sopra riportato, o tramite e-mail a info@icnirp.org.

elettrici, magnetici ed elettromagnetici. Esaurienti descrizioni della strumentazione e delle tecniche di misura per un'accurata determinazione di queste grandezze fisiche si possono reperire altrove (IEC 2004, IEC 2005, IEEE 1994, IEEE 2008).

Il rispetto di queste linee guida non preclude necessariamente effetti d'interferenza o di altro genere su dispositivi medici, come protesi metalliche, stimolatori cardiaci (pacemaker), defibrillatori impiantati e apparecchi acustici cocleari. Interferenze con i pacemaker possono verificarsi a livelli inferiori a quelli di riferimento raccomandati. Consigli per evitare questi problemi esulano da questo documento, ma possono essere trovati altrove (IEC 2005).

Queste linee guida saranno periodicamente riesaminate e aggiornate con l'avanzamento delle conoscenze scientifiche su qualunque aspetto che sia rilevante per la limitazione dell'esposizione a campi elettrici e magnetici variabili a bassa frequenza.

GRANDEZZE FISICHE E LORO UNITÀ DI MISURA

Mentre i campi elettrici sono associati solo alla presenza di cariche elettriche, i campi magnetici sono prodotti dal movimento fisico delle cariche elettriche (corrente elettrica). Un campo elettrico, **E**, espresso in volt al metro (V/m), esercita una forza su una carica elettrica. In modo analogo, i campi magnetici possono esercitare forze sulle cariche elettriche, se queste ultime sono in moto e/o se il campo magnetico varia nel tempo. I campi elettrici e magnetici hanno un'ampiezza e una direzione (cioè, sono vettori). Un campo magnetico può essere specificato in due modi: attraverso l'induzione magnetica, **B**, espressa in tesla (T), o attraverso l'intensità di campo magnetico, **H**, espressa in ampere al metro (A/m). Le due grandezze sono legate dall'espressione:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

dove la costante di proporzionalità μ è la permeabilità magnetica; nel vuoto e in aria, come anche nei materiali non magnetici (compresi quelli biologici), μ ha il valore di $4\pi \times 10^{-7}$ se espressa in henry al metro (H/m). Quindi, per descrivere un campo magnetico a fini protezionistici, occorre specificare una sola delle due grandezze, **B** o **H**.

L'esposizione a campi elettromagnetici variabili nel tempo dà luogo a campi elettrici interni, correnti interne ed assorbimenti di energia nei tessuti, che dipendono dai meccanismi di accoppiamento e dalle frequenze in gioco. Il campo elettrico interno **E_i** e la densità di corrente **J** sono legati dalla legge di Ohm:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}_i \quad (2)$$

dove σ è la conducibilità elettrica del mezzo. Le grandezze dosimetriche usate in queste linee guida sono le seguenti:

- campo elettrico E_i ;
- corrente I ;

Le caratteristiche dei campi elettromagnetici, assieme alle grandezze dosimetriche e alle relative unità di misura sono riassunte nella Tabella 1.

Tabella 1. Campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, grandezze dosimetriche e corrispondenti unità SI

Grandezza fisica	Simbolo	Unità di misura
Conducibilità	σ	siemens al metro (S/m)
Corrente	I	ampere (A)
Densità di corrente	J	ampere al metro quadro (A/m ²)
Frequenza	f	hertz (Hz)
Intensità del campo elettrico	E	volt al metro (V/m)
Intensità del campo magnetico	H	ampere al metro (A/m)
Induzione magnetica	B	tesla (T)
Permeabilità magnetica	μ	henry al metro (H/m)
Permittività	ϵ	farad al metro (F/m)

BASI SCIENTIFICHE PER LA LIMITAZIONE DELL'ESPOSIZIONE

Queste linee guida per la limitazione dell'esposizione sono state sviluppate dopo un'accurata revisione della letteratura scientifica pubblicata. Si sono usati criteri consolidati per giudicare la validità scientifica della metodologia, i risultati e le relative conclusioni. Soltanto effetti per i quali esistano evidenze scientifiche affidabili sono stati usati come base per le restrizioni all'esposizione.

Rassegne degli effetti biologici dell'esposizione ai campi elettromagnetici a bassa frequenza sono state condotte dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC), dall'ICNIRP e dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) (IARC 2002, ICNIRP 2003a, WHO 2007a). Queste pubblicazioni hanno fornito la base scientifica per le presenti linee guida.

Come spiegato in dettaglio nel seguito, la base delle linee guida è duplice: l'esposizione a campi elettrici a bassa frequenza può causare risposte biologiche ben definite, che sono dovute a effetti di cariche elettriche superficiali e che vanno dalla percezione al fastidio. Dall'altro canto, i soli effetti che sono stati accertati esponendo dei volontari a campi magnetici a bassa frequenza sono la stimolazione dei tessuti nervosi centrali e periferici e l'induzione nella retina di fosfeni, cioè la percezione di leggeri lampi luminosi alla periferia del campo visivo. La retina fa parte del sistema nervoso ed è considerata un modello appropriato, anche se conservativo, per gli effetti generalmente indotti da un campo elettrico sui circuiti neuronali del sistema nervoso centrale.

Tenendo conto delle incertezze intrinseche ai dati scientifici, nel definire le linee guida per l'esposizione si sono introdotti dei fattori di riduzione. Per i dettagli si veda ICNIRP 2002.

Meccanismi di accoppiamento tra i campi ed il corpo

I corpi di esseri umani e di animali perturbano significativamente la distribuzione di un campo elettrico a bassa frequenza. Alle basse frequenze, il corpo è un buon conduttore e al suo esterno le linee del campo perturbato sono quasi perpendicolari alla superficie del corpo stesso. Sulla superficie del corpo esposto si producono delle cariche oscillanti e queste generano correnti all'interno. Gli aspetti dosimetrici fondamentali dell'esposizione di esseri umani a campi elettrici a bassa frequenza sono:

- il campo elettrico indotto all'interno del corpo è molto minore del campo elettrico esterno, ad esempio da cinque a sei ordini di grandezza a 50-60 Hz;
- per un dato campo elettrico esterno, i campi più intensi sono indotti quando il corpo umano è in perfetto contatto con il suolo attraverso i piedi (elettricamente a terra), mentre i campi indotti più deboli corrispondono al corpo isolato dal suolo (nello "spazio libero");
- la corrente totale che fluisce attraverso un corpo in contatto perfetto con il suolo è determinata dalle dimensioni e dalla forma del corpo (compresa la sua postura), piuttosto che dalla conducibilità dei tessuti;
- la distribuzione delle correnti indotte tra i vari organi e tessuti è determinata dalla conducibilità dei tessuti stessi;
- esiste anche un effetto indiretto, quando la corrente nel corpo è prodotta dal contatto con un oggetto conduttore situato in un campo elettrico.

Per i campi magnetici, la permeabilità dei tessuti è la stessa dell'aria e quindi il campo nei tessuti è uguale al campo esterno. I corpi di esseri umani o di animali non perturbano significativamente il campo. La principale interazione dei campi magnetici è l'induzione, secondo la legge di Faraday, di campi elettrici e di associate correnti elettriche nei tessuti. Campi elettrici possono anche essere indotti dal movimento in un campo magnetico statico. Gli aspetti dosimetrici fondamentali dell'esposizione di esseri umani a campi magnetici a bassa frequenza sono i seguenti:

- per una data intensità e per un dato orientamento del campo magnetico, i campi elettrici più alti vengono indotti nei corpi umani più grandi, perché le possibili spire di conduzione sono più larghe;
- il campo elettrico indotto e la corrente indotta dipendono dall'orientamento del campo magnetico esterno rispetto al corpo. Generalmente, i campi indotti nel corpo sono massimi quando il campo è allineato lungo la direzione che va dalla superficie anteriore a quella posteriore del corpo, ma per alcuni organi i valori più alti corrispondono ad allineamenti diversi;
- i campi elettrici più deboli vengono indotti da un campo magnetico orientato lungo l'asse principale del corpo;
- la distribuzione del campo elettrico indotto è influenzata dalla conducibilità dei vari organi e tessuti.

Conclusioni tratte dalla letteratura scientifica attuale

Neurocomportamento

L'esposizione a campi elettrici a bassa frequenza causa, attraverso effetti di carica elettrica superficiale, risposte biologiche ben definite, che vanno dalla percezione al fastidio (Reilly 1998, 1999). In una popolazione di volontari, le soglie di percezione elettrica da parte della frazione del 10% di soggetti più sensibili variavano, a 50-60 Hz, tra 2 e 5 kV/m, mentre il 5% dei soggetti trovava fastidiosi campi a 15-20 kV/m. Si è trovato che le correnti di scarica da un corpo umano verso il suolo erano dolorose per il 7% di volontari esposti in un campo di 5 kV/m, mentre in un campo di 10 kV/m risulterebbero dolorose per il 50%. Le soglie per le correnti di scarica da un oggetto carico verso una persona in contatto con il suolo dipendono dalle dimensioni dell'oggetto e richiedono quindi una valutazione individuale.

La reattività di tessuti nervosi e muscolari elettricamente eccitabili nei confronti di stimoli elettrici, compresi quelli indotti dall'esposizione a campi elettromagnetici a bassa frequenza, è stata ben determinata da molti anni (es. Reilly 2002; Saunders e Jefferys 2007). Si è stimato che le fibre nervose mielinizzate del sistema nervoso periferico umano presentino un valore di soglia di circa 6 V/m (Reilly 1998, 2002), sulla base di calcoli teorici che usavano un modello del nervo. La stimolazione dei nervi periferici indotta durante l'esposizione di volontari ai campi di gradiente intermittenti prodotti nella risonanza magnetica ha però suggerito, in base a calcoli che impiegavano un modello di fantoccio umano omogeneo, che le soglie per la percezione possano arrivare fino a circa 2 V/m (Nyenhuis et al 2001). Un calcolo più accurato dei campi elettrici indotti nei tessuti di un modello umano eterogeneo, sulla base dei dati dello studio di risonanza magnetica già citato, è stato effettuato da So et al (2004). Questi autori hanno stimato la soglia minima per la stimolazione dei nervi periferici tra circa 4 e 6 V/m, assumendo che la stimolazione avesse luogo nella pelle o nel grasso sottocutaneo. Con stimoli più forti, sopraggiunge il fastidio e poi il dolore; il percentile più basso per una stimolazione intollerabile è di circa il 20% superiore alla soglia mediana di percezione (v. ICNIRP 2004). Le fibre mielinizzate del sistema nervoso centrale possono essere stimulate dai campi elettrici indotti durante la stimolazione magnetica transcraniale; i campi impulsivi indotti nel tessuto corticale durante questa stimolazione sono molto alti (oltre 100 V/m come valore di picco), anche se calcoli teorici suggeriscono che i valori minimi della soglia di stimolazione possano arrivare fino a circa 10 V/m di picco (Reilly 1998, 2002). Per entrambi i gruppi di nervi, le soglie aumentano al di sopra di circa 1-3 kHz, perché diventa progressivamente più breve il tempo disponibile per l'accumulazione delle cariche elettriche sulla membrana dei nervi, ed aumentano al di sotto di circa 10 Hz per l'adattamento di un nervo a uno stimolo di lenta depolarizzazione¹.

Le cellule muscolari sono in generale meno sensibili dei tessuti nervosi alla stimolazione diretta (Reilly 1998). Il tessuto del muscolo cardiaco merita particolare attenzione perché un suo funzionamento anormale è una potenziale minaccia per la vita; le soglie per la fibrillazione ventricolare sono però superiori a quelle per la stimolazione del muscolo cardiaco di un fattore 50 o più (Reilly 2002), anche se scendono notevolmente se il cuore è eccitato ripetutamente durante il periodo vulnerabile del ciclo cardiaco. Le soglie salgono al di sopra di 120 Hz a causa della costante di tempo molto più lunga delle fibre muscolari rispetto ai nervi mielinizzati.

L'effetto più saldamente stabilito dei campi elettrici, al di sotto della soglia per l'eccitazione diretta di nervi o muscoli, è l'induzione di magnetofosfene, cioè la percezione di leggeri lampi luminosi alla periferia del campo visivo, nella retina di volontari esposti a campi magnetici a bassa frequenza. La soglia minima in termini d'induzione magnetica è di circa 5 mT a 20 Hz, e sale a frequenze più alte e più basse. In questi studi, si ritiene che i fosfene derivino dall'interazione del campo elettrico indotto con le cellule elettricamente eccitabili della retina. Questa costituisce una protrusione della parte anteriore del cervello e può considerarsi come un buon modello, anche se conservativo, dei processi che hanno luogo nel sistema nervoso centrale in generale (Attwell 2003). Si è stimato che la soglia, in termini d'intensità del campo elettrico indotto nella retina, si collochi tra circa 50 e 100 mV/m a 20 Hz e che salga a frequenze più alte e più basse (Saunders e Jefferys 2002), anche se questi valori sono affetti da grandi incertezze.

Le proprietà d'integrazione dei tessuti del sistema nervoso centrale può rendere quest'ultimo, e quindi funzioni tipiche dei processi cognitivi come la memoria, sensibile agli effetti di questi campi elettrici fisiologicamente deboli. Saunders

¹ L'adattamento non si verifica, ad esempio, in risposta alla componente a bassa frequenza di impulsi trapezoidali o rettangolari con tempi di salita rapidi ma con frequenze di ripetizione basse, come quelli che si incontrano nei campi di gradiente dei sistemi di risonanza magnetica.

e Jefferys (2002) hanno suggerito che la polarizzazione dei neuroni del sistema nervoso centrale, prodotta da questi deboli campi elettrici, possa accentuare la sincronizzazione di gruppi attivi di neuroni e coinvolgere neuroni non attivi adiacenti, influenzando così complessivamente l'eccitabilità e l'attività della cellula nervosa. I dati *in vivo* forniti da studi su sezioni del cervello suggeriscono che le soglie minime per questi effetti si trovino a frequenze inferiori a circa 100 Hz e possano scendere fino a 100 mV/m (Saunders e Jefferys 2007).

Due gruppi di ricerca hanno studiato gli effetti di deboli campi elettrici, applicati direttamente alla testa mediante elettrodi, sull'attività elettrica del cervello umano e sulle sue funzioni.² Un gruppo (Kanai et al 2008) ha riportato che la stimolazione della corteccia cerebrale induceva la percezione di fosfeni corticali (simili nel loro aspetto ai fosfeni indotti nella retina) quando la frequenza dello stimolo era quella caratteristica dell'attività visiva della corteccia, sia in condizioni di buio (attorno a 10 Hz), sia in condizioni di luce (attorno a 20 Hz), ma non a frequenze superiori o inferiori. L'altro gruppo (Pogosyan et al 2009) ha applicato un segnale a 20 Hz alla corteccia motoria di volontari durante prove di compiti visivo-motori, trovando un rallentamento piccolo ma statisticamente significativo del movimento della mano durante le prove, coerente con un aumento della sincronizzazione dell'attività della corteccia motoria a 20 Hz. Nessun effetto era osservato a frequenze di stimolazione inferiori. In sintesi, entrambi i gruppi di autori hanno trovato che campi elettrici a 10-20 Hz, superiori alla soglia per i fosfeni della retina, possono interagire con l'attività elettrica ritmica delle cortecce visiva e motoria ed influenzare leggermente l'elaborazione visiva e il coordinamento motorio; ciò implica che campi elettrici indotti da campi elettromagnetici esterni a 10-20 Hz di sufficiente ampiezza possano produrre effetti simili.

L'evidenza di altri effetti neurocomportamentali sull'attività elettrica del cervello, sulla cognizione, sul sonno e sull'umore di volontari esposti a campi elettromagnetici a bassa frequenza è però molto meno chiara (Cook 2002, 2006; Crasson 2003; ICNIRP 2003a; Barth et al. 2009). Generalmente, studi di questo genere sono stati condotti a livelli di circa 1-2 mT o meno, cioè al di sotto di quelli richiesti per indurre gli effetti descritti sopra, ed hanno fornito, al massimo, evidenza di effetti sottili e transitori. Le condizioni necessarie per eccitare queste risposte non sono al momento ben definite.

Alcune persone sostengono di essere ipersensibili ai campi elettromagnetici in generale. I dati di studi di provocazione in doppio cieco suggeriscono però che i sintomi dichiarati non siano correlati all'esposizione a campi elettromagnetici (Rubin et al 2005; WHO 2007a).

Ci sono solo indicazioni incoerenti e non conclusive che l'esposizione a campi elettrici e magnetici a bassa frequenza sia causa di sintomi depressivi e suicidio (WHO 2007a).

Negli animali, la possibilità che l'esposizione a campi a bassa frequenza possa influenzare le funzioni neurocomportamentali è stata esplorata da diversi punti di vista ed in varie condizioni di esposizione. Pochi effetti sono stati accertati. Vi sono evidenze convincenti che i campi elettrici a bassa frequenza possono essere rivelati da animali, molto probabilmente in conseguenza di fenomeni di carica superficiale, e che possono dar luogo ad effetti transitori d'irritazione e leggero stress. Altre possibili alterazioni dipendenti dai campi sono meno ben definite (WHO 2007a).

In conclusione, la percezione di cariche elettriche superficiali, la stimolazione dei tessuti nervosi e muscolari e l'induzione di fosfeni nella retina sono ben accertate e possono servire come base per le raccomandazioni. Inoltre, vi sono evidenze scientifiche indirette che funzioni cerebrali come i processi visivi e la coordinazione motoria possono essere transitoriamente influenzate da campi elettrici indotti. Però, i dati di altre ricerche su volontari esposti a campi elettrici e magnetici a bassa frequenza e relative ad effetti neurocomportamentali non sono abbastanza attendibili da costituire una base per limiti di esposizione.

Sistema neuroendocrino

I risultati di studi su volontari e di studi epidemiologici in ambito residenziale e lavorativo suggeriscono che il sistema neuroendocrino non sia negativamente influenzato dall'esposizione a campi elettrici o magnetici a 50-60 Hz. Ciò vale in particolare per i livelli di specifici ormoni in circolo, tra cui la melatonina rilasciata dalla ghiandola pineale, e di diversi ormoni coinvolti nel controllo del metabolismo corporeo e fisiologicamente rilasciati dalla ghiandola pituitaria. La maggior parte degli studi di laboratorio sugli effetti dell'esposizione a campi a 50-60 Hz sui livelli notturni di

² La stimolazione transcranica in corrente alternata si effettua a livelli inferiori alla soglia di percezione della pelle.

melatonina in volontari non ha trovato effetti quando si teneva conto di possibili effetti di confondimento (WHO 2007a).

Tra i molti studi su animali che hanno indagato gli effetti di campi elettrici e magnetici a 50-60 Hz sulla ghiandola pineale e sui livelli di melatonina nel siero di ratti, alcuni hanno riportato che l'esposizione dava luogo a una soppressione della melatonina durante la notte, mentre altri no. In animali a riproduzione stagionale, l'evidenza di un effetto dell'esposizione a campi a 50-60 Hz sui livelli di melatonina e sull'attività riproduttiva in dipendenza dalla melatonina è prevalentemente negativa. Non è stato osservato nessun effetto convincente sui livelli di melatonina in uno studio di primati non umani esposti a campi a 50-60 Hz.

In diverse specie di mammiferi non è stato osservato nessun effetto coerente sugli ormoni dell'asse pituitario-adrenalinico legati allo stress, con la possibile eccezione di stress di breve durata dopo l'inizio di un'esposizione a campi elettrici di bassa frequenza a livelli abbastanza alti da essere percepiti (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). Analogamente, anche se gli studi condotti sono pochi, risultano per lo più negative o assenti le osservazioni di effetti sui livelli degli ormoni della crescita e di ormoni che sono coinvolti nel controllo dell'attività metabolica o associati al controllo della riproduzione e dello sviluppo sessuale.

Nel complesso, questi dati non indicano che i campi elettrici e/o magnetici a bassa frequenza influenzino il sistema neuroendocrino in modo tale da avere un impatto negativo sulla salute umana.

Malattie neurodegenerative

Si è ipotizzato che l'esposizione a campi a bassa frequenza sia associata a diverse malattie neurodegenerative. Per il morbo di Parkinson e la sclerosi multipla il numero di studi è piccolo e non c'è evidenza di un'associazione tra l'esposizione a campi a bassa frequenza e queste patologie. Per il morbo di Alzheimer e per la sclerosi laterale amiotrofica gli studi pubblicati sono maggiori. Alcuni suggeriscono che le persone addette a lavori elettrici possano avere un maggior rischio di sclerosi laterale amiotrofica (Kheifets et al 2009). Finora, non si è accertato nessun meccanismo biologico che possa spiegare tale associazione, anche se questa potrebbe derivare da fattori di confondimento connessi all'attività lavorativa, come scosse elettriche. Inoltre, studi che impiegavano metodi più sofisticati di valutazione dell'esposizione, come matrici occupazione-esposizione, non hanno in genere osservato aumenti di rischio (Kheifets et al 2009). Per il morbo di Alzheimer, i risultati sono incoerenti. Le associazioni più forti sono state trovate in studi su base ospedaliera con grandi possibilità di distorsioni di selezione, ma si sono osservati aumenti di rischio anche in alcuni studi su base di popolazione, sebbene non in tutti. Le analisi di sottogruppi all'interno degli studi rafforzano l'impressione di dati incoerenti (Kheifets et al 2009). L'eterogeneità statistica tra i risultati degli studi scoraggia un'aggregazione dei risultati disponibili, nonostante alcuni tentativi in questo senso siano stati fatti (Garcia et al 2008). Inoltre, c'è qualche evidenza di distorsione di pubblicazione. Un controllo del potenziale confondimento dovuto ad altre esposizioni professionali non è stato generalmente effettuato. Finora, è disponibile un solo studio residenziale, che indica un aumento del rischio di morbo di Alzheimer a seguito di esposizioni di lungo periodo, ma sulla base di un numero piccolissimo di casi (Huss et al 2009).

Gli studi sull'associazione tra esposizione a campi a bassa frequenza e morbo di Alzheimer sono incoerenti. Nel complesso, le evidenze di un'associazione tra esposizione a campi a bassa frequenza e morbo di Alzheimer o sclerosi laterale amiotrofica sono non conclusive.

Malattie cardiovascolari

Gli studi sperimentali relativi a esposizioni sia di breve sia di lunga durata indicano che, mentre la scossa elettrica costituisce un ovvio rischio per la salute, non sono verosimili altri effetti nocivi per il sistema cardiovascolare, ai livelli di esposizione normalmente incontrati negli ambienti di vita o di lavoro (WHO 2007a). Anche se in letteratura sono riportate varie modificazioni nei parametri cardiovascolari, gli effetti sono per la maggior parte piccoli e i risultati non sono coerenti né tra uno studio e l'altro né all'interno dei singoli studi (McNamee et al 2009). La maggior parte degli studi di morbilità e mortalità per malattie cardiovascolari non ha mostrato alcuna associazione con l'esposizione (Kheifets et al 2007). Resta oggetto di speculazione se esista una specifica associazione tra l'esposizione e un alterato controllo autonomo del cuore. Nel complesso, i dati non suggeriscono un'associazione tra esposizione a campi a bassa frequenza e malattie cardiovascolari.

Riproduzione e sviluppo

Nel complesso, gli studi epidemiologici non hanno mostrato nell'uomo un'associazione tra effetti nocivi sulla riproduzione ed esposizione della madre o del padre a campi a bassa frequenza. Vi sono limitate evidenze di un aumento del rischio di aborti associato all'esposizione della madre a campi magnetici, ma quest'associazione non è stata trovata in altri studi e la sua evidenza è, nel complesso, scarsa.

Gli effetti di esposizioni a campi elettrici a bassa frequenza d'intensità fino a 150 kV/m sono stati esaminati in diverse specie di mammiferi; alcuni degli studi comprendevano gruppi di grandi dimensioni ed esposizioni che si estendevano su diverse generazioni. I risultati sono coerenti nel non mostrare alcun effetto nocivo sullo sviluppo (ICNIRP 2003a; WHO 2007a).

L'esposizione di mammiferi a campi magnetici a bassa frequenza non dà luogo a grosse malformazioni esterne, viscerali o scheletriche quando si impiegano campi fino a 20 mT (Juutilainen 2003, 2005; WHO 2007a). Nel complesso, le evidenze di un'associazione tra campi a bassa frequenza ed effetti sulla riproduzione è molto debole.

Cancro

Un numero considerevole di studi epidemiologici, condotti soprattutto negli anni '80 e '90, ha indicato che l'esposizione di lungo periodo a campi magnetici a 50 Hz, di intensità inferiori per ordini di grandezza ai limiti raccomandati dall'ICNIRP nel 1998, potrebbe essere associata al cancro. Mentre i primi studi esaminavano, in relazione ai campi magnetici, i casi di cancro infantile, ricerche successive hanno analizzato anche i tumori degli adulti. In generale, le associazioni inizialmente osservate tra campi magnetici a 50-60 Hz e vari tipi di cancro non sono state confermate in studi progettati appositamente per vedere se i risultati iniziali potevano essere replicati. La situazione è però diversa per la leucemia infantile. Le ricerche seguite al primo studio hanno suggerito che possa esistere una debole associazione tra i livelli più alti di esposizione a campi magnetici a 50-60 Hz in ambiente residenziale e il rischio di leucemia infantile, sebbene non sia chiaro se tale associazione sia causale; una combinazione di distorsioni di selezione, di un certo grado di confondimento e di casualità potrebbe spiegare i risultati (WHO 2007a). Due analisi di dati aggregati (Ahlbom et al 2000; Greenland et al 2000) indicano che potrebbe esistere un eccesso di rischio per esposizioni medie al di sopra di 0,3-0,4 μ T, anche se gli autori di queste analisi rimarcano con forza che i loro risultati non possono interpretarsi come l'indicazione di una relazione di causa ed effetto tra campi magnetici e leucemia infantile.

Allo stesso tempo, non si è identificato nessun meccanismo biofisico e gli studi sperimentali su animali e cellule non sostengono l'idea che l'esposizione a campi magnetici a 50-60 Hz sia una causa di leucemia infantile.

Si deve notare che non esiste a tutt'oggi nessun modello animale adeguato per la forma più comune di leucemia infantile, cioè la leucemia linfoblastica acuta. La maggior parte degli studi non riporta effetti dei campi magnetici a 50-60 Hz su leucemia e linfomi in modelli di roditori (ICNIR 2003a; WHO 2007a). Diversi studi su roditori, a lungo termine e su larga scala, non hanno mostrato alcun aumento coerente di nessun tipo di cancro, compresi i tumori del sistema ematopoietico, del seno, del cervello e della pelle.

Un buon numero di studi ha esaminato gli effetti dei campi magnetici a 50-60 Hz su tumori mammari indotti chimicamente nei ratti (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). Questi studi hanno fornito risultati incoerenti che possono essere dovuti, del tutto o in parte, a differenze nei protocolli sperimentali, come l'impiego di specifiche sottolinee di animali. La maggior parte degli studi relativi ad effetti di un'esposizione a campi magnetici a 50-60 Hz su leucemie e linfomi indotti, chimicamente o con radiazioni, sono risultati negativi. Gli studi su lesioni pre-neoplastiche del fegato, su tumori della pelle indotti chimicamente e su tumori cerebrali hanno fornito, in misura preponderante, risultati negativi.

In generale, gli studi sugli effetti dell'esposizione a campi a bassa frequenza su sistemi cellulari non hanno mostrato nessuna induzione di genotossicità per intensità inferiori a 50 mT (Crumpton and Collins 2004; WHO 2007a). Nel complesso, ed in contrasto con le evidenze epidemiologiche di un'associazione tra leucemia infantile ed esposizione prolungata a campi magnetici a bassa frequenza, i dati di cancerogenesi animale, soprattutto quelli forniti da studi su larga scala e per l'intera durata della vita, sono quasi totalmente negativi. I dati degli studi su sistemi cellulari confortano generalmente quelli degli studi su animali, anche se sono più equivoci.

Basi razionali delle linee guida per i campi a bassa frequenza

In queste linee guida l'ICNIRP considera gli effetti sanitari acuti e cronici e tiene conto dei recenti progressi nella dosimetria.

Effetti acuti

Vi sono alcuni effetti acuti ben accertati dell'esposizione a campi elettromagnetici a bassa frequenza sul sistema nervoso: la stimolazione diretta dei tessuti nervosi e muscolari e l'induzione di fosfeni nella retina. Vi sono anche evidenze scientifiche indirette che funzioni cerebrali come i processi visivi e la coordinazione motoria possono essere transitoriamente influenzati dai campi elettrici indotti. Tutti questi effetti presentano delle soglie, al di sotto delle quali non si verificano, e possono essere evitati rispettando idonee restrizioni di base sui campi elettrici indotti nel corpo.

In linea con le raccomandazioni già espresse nelle linee guida sui limiti di esposizione a campi statici (ICNIRP, 2009), l'ICNIRP considera che esistano in ambito lavorativo situazioni in cui, con un'adeguata informazione e addestramento, sia ragionevole per i lavoratori sperimentare, volontariamente e consapevolmente, effetti transitori come fosfeni della retina ed eventuali variazioni di poco conto in alcune funzioni cerebrali, in quanto si ritiene che tali risposte non diano luogo a effetti a lungo termine o patologici. In simili circostanze, l'esposizione di tutte le parti del corpo dovrebbe essere limitata per evitare la stimolazione dei nervi mielinizzati dei sistemi nervosi periferico e centrale. L'ICNIRP nota che esiste un margine relativamente stretto tra percezione dei nervi periferici e soglie del dolore (v. sopra). Per entrambi i tipi di nervi, le soglie salgono per frequenze al di sopra di circa 1-3 kHz, per le brevissime costanti di tempo della membrana nella mielinizzazione, e al di sotto di circa 10 Hz per l'adattamento a uno stimolo di lenta depolarizzazione.

Evitando i fosfeni della retina si dovrebbe proteggere da ogni possibile effetto sulle funzioni cerebrali. Le soglie per i fosfeni presentano un minimo attorno a 20 Hz e salgono rapidamente a frequenze inferiori e superiori, intersecando le soglie per la stimolazione dei nervi dei sistemi periferico e centrale in un punto, oltre il quale si debbono applicare i limiti per la stimolazione dei nervi periferici. Per lavoratori non addestrati e che possono non conoscere o non controllare la loro condizione di esposizione, la restrizione di base è fissata in corrispondenza della soglia per i fosfeni, al fine di evitare questi effetti, transitori ma potenzialmente fastidiosi dell'esposizione. Per i membri del pubblico, si applica un fattore di riduzione di 5 alla soglia per i fosfeni.

L'esposizione a campi elettrici a bassa frequenza provoca risposte biologiche ben definite, attraverso effetti di carica elettrica superficiale. Una prevenzione di effetti di percezione e di dolore dovuti a cariche elettriche superficiali indotte da queste esposizioni è fornita dai livelli di riferimento

Effetti cronici

La letteratura relativa agli effetti cronici dei campi a bassa frequenza è stata esaminata in dettaglio da singoli ricercatori e da gruppi di esperti. L'istituto dell'OMS per la ricerca sul cancro, la IARC (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro) ha esaminato i campi magnetici a bassa frequenza nel 2002, classificandoli nella categoria 2B, che corrisponde a "possibilmente cancerogeni per l'uomo". Questa classificazione si basa sui risultati epidemiologici relativi alla leucemia infantile.

È opinione dell'ICNIRP che le attuali evidenze scientifiche di una relazione causale tra esposizione prolungata a campi magnetici a bassa frequenza ed un aumento del rischio di leucemia infantile siano troppo deboli per costituire la base di linee guida di esposizione. In particolare, se la relazione non è causale, una riduzione dell'esposizione non apporta nessun beneficio alla salute.

Dosimetria

Storicamente, i modelli per il campo magnetico assumevano che il corpo avesse una conducibilità omogenea e isotropica e per stimare le correnti indotte nei diversi organi e nelle diverse regioni del corpo si applicavano modelli consistenti in semplici spire conduttrici circolari. I campi elettrici interni indotti da campi variabili nel tempo venivano calcolati utilizzando semplici modelli di ellissoidi prolati omogenei. Negli ultimi anni, calcoli più realistici, basati su modelli eterogenei raffinati dal punto di vista anatomico e da quello elettrico, hanno permesso una conoscenza molto migliore dei campi elettrici indotti nel corpo dall'esposizione a campi elettrici e magnetici.

I risultati dosimetrici più utili per queste linee guida sono stati ottenuti da calcoli ad alta risoluzione dei campi elettrici indotti, con volumi elementari (voxel) di dimensioni inferiori a 4 mm (Dimbylow 2005; Bahr et al. 2007; Hirata et al. 2009, Nagaoka et al. 2004). Il massimo campo elettrico viene prodotto nel corpo quando i campi esterni sono omogenei e paralleli (polarizzazione E) o perpendicolari (polarizzazione H) all'asse del corpo. Secondo questi calcoli, il massimo valore di picco del campo elettrico locale indotto nel cervello da un campo magnetico a 50 Hz è compreso tra circa 23 e 33 mV/m per millitesla, secondo l'orientamento del campo e il modello del corpo. Al momento, non è disponibile nessun fattore di conversione per i tessuti nervosi periferici. Quindi, assumendo le condizioni del caso peggiore, è stata scelta come tessuto di riferimento la pelle, che contiene terminazioni dei nervi periferici. Il campo elettrico indotto dal campo magnetico nella pelle è compreso all'incirca tra 20 e 60 mV/m per millitesla. Il massimo campo elettrico locale indotto nel cervello da un campo elettrico esterno a 50 Hz è compreso tra circa 1,7 e 2,6 mV/m per kilovolt al metro, mentre nella pelle è compreso all'incirca tra 12 e 33 mV/m per kilovolt al metro.

Considerate le incertezze nell'attuale dosimetria e l'influenza dei parametri corporei nella derivazione dei livelli di riferimento, l'ICNIRP adotta un approccio conservativo per dedurre tali livelli dalle restrizioni di base.

LINEE GUIDA PER LA LIMITAZIONE DELL'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI

Vengono fornite raccomandazioni separate per l'esposizione professionale e quella del pubblico generico. In queste linee guida, l'esposizione professionale si riferisce ad adulti esposti sul posto di lavoro, per attività professionali svolte con regolarità o a seguito di un incarico, a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo con frequenze comprese tra 1 Hz e 10 MHz, generalmente in condizioni note. Il termine popolazione generale si riferisce invece a soggetti di tutte le età ed in diverse condizioni di salute, che potrebbero rendere ancora più ampio il campo della suscettibilità individuale. In molti casi, i membri del pubblico non sono consapevoli della loro esposizione ai campi elettromagnetici. Queste considerazioni sono alla base dell'adozione di restrizioni più stringenti per l'esposizione del pubblico, rispetto a quella dei lavoratori esposti durante le loro attività professionali.

Considerazione dell'incertezza scientifica

Tutti i dati scientifici, e la loro interpretazione, sono soggetti a un certo grado d'incertezza. Ne sono esempi le differenze metodologiche e la variabilità tra individui, tra specie e tra linee cellulari. Queste incertezze nelle conoscenze sono compensate da opportuni fattori di riduzione.

Non vi sono però per tutte le fonti d'incertezza informazioni sufficienti a fornire una base rigorosa per la definizione di fattori di riduzione per tutta la gamma di frequenze e per tutti i profili di modulazione. Quindi, il grado di cautela adottato nell'interpretazione dei dati disponibili e nella definizione dei fattori di riduzione è in larga misura frutto del giudizio degli esperti.

Restrizioni di base e livelli di riferimento

Le limitazioni di esposizione basate sulla grandezza (o sulle grandezze) fisica direttamente collegata agli effetti sanitari si chiamano restrizioni di base. In queste linee guida, la grandezza fisica usata per specificare le restrizioni di base all'esposizione a campi elettromagnetici è l'intensità del campo elettrico interno E_i , in quanto è il campo elettrico ad agire sulle cellule nervose e su altre cellule elettricamente sensibili.

L'intensità del campo elettrico interno è difficile da determinare. Quindi, per la misura pratica dell'esposizione vengono forniti dei livelli di riferimento. La maggior parte dei livelli di riferimento sono derivati dalle pertinenti restrizioni di base usando tecniche di misura e/o di calcolo, ma per alcuni si prendono in considerazione la percezione (campo elettrico) ed effetti nocivi indiretti. Le grandezze derivate sono l'intensità del campo elettrico (E), l'intensità del campo magnetico (H), l'induzione magnetica (B) e la corrente che fluisce attraverso gli arti (I_L). Il rispetto dei livelli di riferimento assicura il rispetto delle corrispondenti restrizioni di base. Se il valore misurato o calcolato supera il livello di riferimento, non ne consegue necessariamente che sia superata la restrizione di base. Quando si supera un livello di riferimento è però necessario verificare se la corrispondente restrizione di base è rispettata e stabilire se siano necessarie misure protettive ulteriori.

RESTRIZIONI DI BASE

L'obiettivo principale di questa pubblicazione è stabilire delle linee guida per la limitazione dell'esposizione a campi elettromagnetici, che forniscano protezione contro gli effetti nocivi per la salute. Come già notato, i rischi derivano da risposte transitorie del sistema nervoso, tra cui la stimolazione dei nervi centrali e periferici, l'induzione di fosfeni nella retina e possibili effetti su alcuni aspetti delle funzioni cerebrali.

Sulla base delle considerazioni espresse in precedenza, per frequenze comprese nell'intervallo tra 10 e 25 Hz, l'esposizione professionale dovrebbe essere limitata a campi che inducano nei tessuti del sistema nervoso centrale della testa (cioè nel cervello e nella retina) campi elettrici di intensità inferiore a 50 mV/m, per evitare l'induzione di fosfeni nella retina. Questa restrizione dovrebbe anche prevenire tutti i possibili effetti transitori sulle funzioni cerebrali. Questi non sono considerati effetti nocivi per la salute; tuttavia l'ICNIRP riconosce che possono costituire un disturbo in alcune situazioni lavorative e dovrebbero quindi essere evitati, ma per essi non si applica nessun fattore di riduzione aggiuntivo. Le soglie per i fosfeni crescono rapidamente a frequenze più alte e più basse, intersecando a 400 Hz le soglie per la stimolazione dei nervi mielinizzati dei sistemi nervosi periferico e centrale. A frequenze superiori a 400 Hz, in tutte le parti del corpo si applicano i limiti per la stimolazione nervosa.

In ambienti controllati, dove i lavoratori sono informati dei possibili effetti transitori dell'esposizione, quest'ultima dovrebbe essere limitata a campi esterni che inducano nella testa e nel corpo campi elettrici di intensità inferiore a 800 mV/m, al fine di evitare la stimolazione dei nervi mielinizzati dei sistemi nervosi centrale e periferico. Alla soglia di stimolazione di 4 V/m è stato applicato un fattore di riduzione pari a 5, per tener conto delle incertezze descritte in precedenza. Il valore di questa restrizione aumenta al di sopra di 3 kHz.

Nel caso del pubblico generico, per i tessuti del sistema nervoso centrale nella testa si applica un fattore di riduzione pari a 5, che porta ad una restrizione di base pari a 10 mV/m tra 10 e 25 Hz. Al di sopra e al di sotto di queste frequenze, il valore della restrizione di base aumenta. A 1000 Hz interseca le restrizioni di base che proteggono dalla stimolazione dei nervi mielinizzati dei sistemi centrale e periferico. Qui, il fattore di riduzione pari a 10 porta ad una restrizione di base di 400 mV/m, che dovrebbe essere applicata ai tessuti di tutte le parti del corpo.

Le restrizioni di base sono presentate nella Tabella 2 e nella Figura 1.

Media temporale

L'ICNIRP raccomanda che le restrizioni sui campi elettrici indotti da campi elettrici e magnetici, compresi campi transitori o con picchi molto brevi, siano considerate come valori istantanei, che non dovrebbero essere mediati nel tempo (si veda anche il capitolo sull'esposizione a campi non sinusoidali).

Media spaziale del campo elettrico indotto

Per proteggere dagli effetti nocivi dei campi elettrici indotti su cellule e reti nervose, è importante definire la distanza o il volume su cui il campo elettrico locale deve essere mediato. Come compromesso pratico tra la necessità di una solida base biologica e le limitazioni di calcolo, l'ICNIRP raccomanda di determinare il campo elettrico indotto come media vettoriale su un piccolo volume contiguo di tessuto, pari a $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$. Per uno specifico tessuto, il valore da confrontare con la restrizione di base è quello del 99^{mo} percentile del campo elettrico.

Fondamentalmente, gli effetti del campo elettrico sui neuroni e sulle altre cellule eccitabili sono effetti locali, ma ci sono fattori elettrofisiologici e aspetti pratici di dosimetria che condizionano il volume minimo o la distanza minima. Il principale fattore fisico che perturba il funzionamento dei neuroni e delle reti neuronali è la differenza di potenziale prodotta dal campo elettrico indotto sulla membrana della cellula. Per fibre nervose isolate allineate lungo la direzione del campo elettrico (massimo accoppiamento) questa tensione è integrata dal campo elettrico sulla distanza elettrotonica che varia da 2 a 7 mm per i nervi di invertebrati (Reilly 1998; Reilly e Diamant 2003). Per le cellule dei nervi mielinizzati, una buona assunzione per la distanza d'integrazione è circa 2 mm, che rappresenta la massima distanza inter-nodale tra nodi di Ranvier. Queste distanze sono importanti quando si considerano le soglie di stimolazione per cellule nervose isolate. Nel caso di deboli effetti sub-soglia del campo elettrico, come i fosfeni della retina, si deve tenere in considerazione l'effetto "rete" collettivo di numerose cellule nervose interagenti. La soglia dell'effetto è notevolmente inferiore a quella per la stimolazione di cellule nervose isolate e risulta dalla somma e dall'integrazione di piccole differenze di potenziale indotte nelle sinapsi. È stato suggerito che il volume su cui mediare il campo elettrico indotto debba essere basato su un minimo di 1000 cellule interagenti, corrispondente a circa 1 mm^3 nella maggior parte

dei tessuti nervosi (Jefferys 1994). Quindi, una distanza biologicamente ragionevole per la media potrebbe variare da 1 a 7 mm. Da un punto di vista pratico, è difficile raggiungere, in calcoli a risoluzione millimetrica del campo magnetico indotto, un'accuratezza soddisfacente, e ancora più difficile misurarla. I valori massimi in un voxel di tessuto specifico sono suscettibili, per la discretizzazione, di ampi errori legati agli spigoli netti dei voxel cubici. Una soluzione per ottenere approssimazioni più stabili si basa sulla scelta, come valore di picco, del valore che rappresenta il 99^{mo} percentile dell'intensità del campo indotto in uno specifico tessuto. Dal punto di vista biologico, però, questa è una scelta piuttosto arbitraria perché il valore di picco dipende dalla risoluzione. Un'altra opzione per la media spaziale consiste nel definire il campo elettrico locale come una media su un piccolo volume o lungo un segmento lineare (Reilly e Diamant 2003).

Come regola generale, il volume di media non dovrebbe estendersi oltre il limite del tessuto, eccetto per tessuti come la retina e la pelle che sono troppo sottili per coprire l'intero volume di media. Per la pelle si può assumere lo stesso volume di media di 2x2x2 mm³ e questo può estendersi al tessuto sottocutaneo. Per la retina il volume di media può estendersi ai tessuti davanti o dietro ad essa.

Tabella 2. Restrizioni di base per l'esposizione a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo

Caratteristiche dell'esposizione	Intervallo di frequenza	Campo elettrico interno (V/m)
<i>Esposizione professionale</i>		
Effetti sul sistema nervoso centrale	1 – 10 Hz	0.5 / f
	10 Hz – 25 Hz	0.05
	25 Hz – 400 Hz	$2 \times 10^{-3} \times f$
	800 Hz – 3 kHz	0.8
	3 kHz – 10 MHz	$2.7 \times 10^{-4} \times f$
Effetti sul sistema nervoso periferico	1 Hz – 3 kHz	0.8
	3 kHz – 10 MHz	$2.7 \times 10^{-4} \times f$
<i>Esposizione del pubblico</i>		
Effetti sul sistema nervoso centrale	1 – 10 Hz	0.1 / f
	10 Hz – 25 Hz	0.01
	25 Hz – 1000 Hz	$4 \times 10^{-4} \times f$
	1000 Hz – 3 kHz	0.4
	3 kHz – 10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} \times f$
Effetti sul sistema nervoso periferico	1 Hz – 3 kHz	0.4
	3 kHz -10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} \times f$

Note:

- f è la frequenza in hertz.
- Tutti i valori sono valori quadratici medi..
- Nell'intervallo di frequenze oltre i 100 kHz, si devono anche considerare le restrizioni di base specifiche per i campi a radiofrequenza.

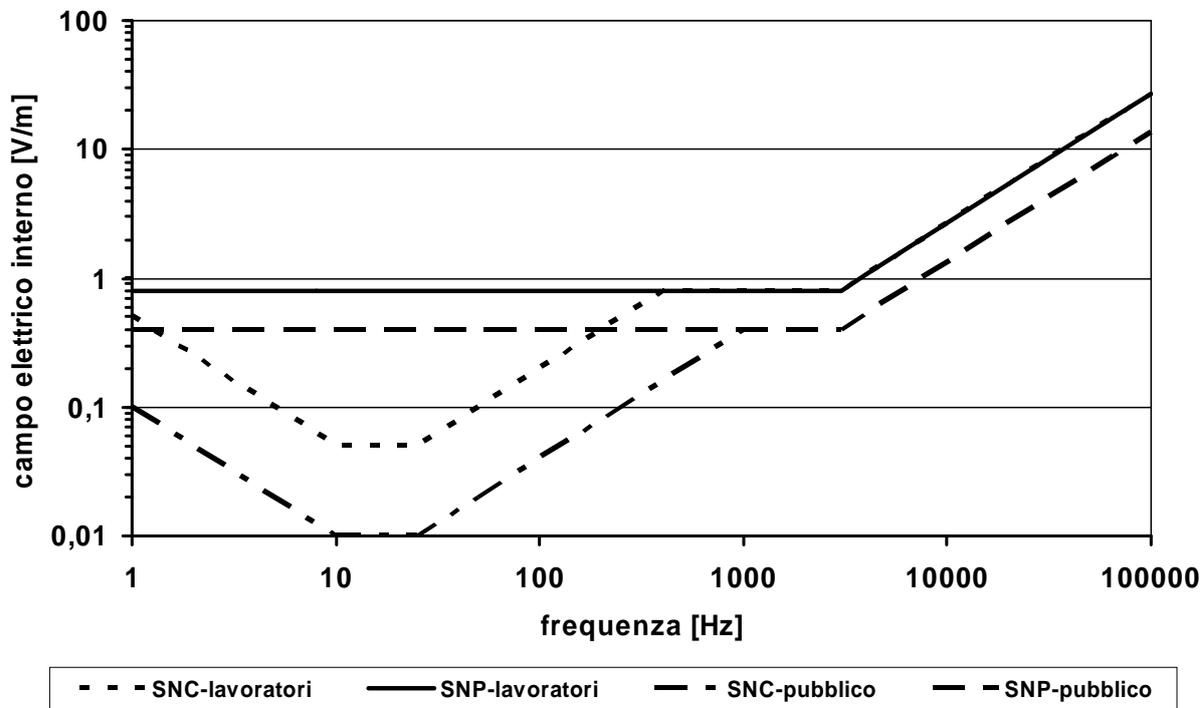


Figura 1. Restrizioni di base per l'esposizione del pubblico e per l'esposizione professionale in termini d'intensità del campo elettrico interno, per quanto riguarda effetti sui sistemi nervosi centrale (SNC) e periferico (SNP)

LIVELLI DI RIFERIMENTO

I livelli di riferimento si ricavano dalle restrizioni di base mediante modelli matematici che utilizzano dati pubblicati (Dimbylow 2005 e 2006). Sono calcolati per le condizioni di massimo accoppiamento del campo con l'individuo esposto e forniscono in tal modo la massima protezione. Sono state prese in considerazione tanto la dipendenza dalla frequenza quanto le incertezze nella dosimetria. I livelli di riferimento qui presentati considerano due effetti distinti e approssimano una combinazione dei campi elettrici indotti nel cervello, significativi per gli effetti sul sistema nervoso centrale, e di quelli indotti in tessuti estranei al sistema nervoso centrale in qualunque altra parte del corpo, rilevanti per gli effetti sul sistema nervoso periferico (cioè, a 50 Hz, i fattori di conversione utilizzati per l'esposizione a campi magnetici sono 33 V/m per tesla per effetti sul sistema nervoso centrale e 60 V/m per tesla per effetti sul sistema nervoso periferico. A questi valori calcolati è stato applicato un ulteriore fattore di riduzione pari a 3, per tener conto delle incertezze nella dosimetria).

Il livello di riferimento per l'esposizione professionale al campo elettrico fino a 25 Hz include inoltre un margine sufficiente a prevenire effetti di stimolazione dovuti a correnti di contatto, nella maggior parte delle condizioni che si verificano in pratica. Tra 25 Hz e 10 MHz i livelli di riferimento sono fondati solo sulla restrizione di base per il campo elettrico indotto e potrebbero quindi non fornire un margine sufficiente a prevenire effetti di stimolazione dovuti a correnti di contatto per tutte le possibili condizioni di esposizione entro questo intervallo di frequenze.

I livelli di riferimento per l'esposizione del pubblico a campi elettrici fino a 10 MHz prevengono effetti nocivi indiretti (scosse e ustioni) per oltre il 90% degli individui esposti. Inoltre, i livelli di riferimento per l'esposizione del pubblico al campo elettrico fino a 50 Hz includono un margine sufficiente a prevenire, nella maggior parte delle persone, effetti di carica elettrica superficiale, come la percezione.

Le tabelle 3 e 4 riassumono i livelli di riferimento per l'esposizione professionale e per quella del pubblico; gli stessi livelli sono rappresentati nelle figure 2 e 3. I livelli di riferimento assumono un'esposizione a un campo uniforme (omogeneo) entro un volume pari a quello del corpo umano.

Tabella3. Livelli di riferimento per l'esposizione professionale a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo (valori quadratici medi del campo imperturbato)

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico E (kV/m)	Intensità del campo magnetico H (A/m)	Induzione magnetica B(T)
1 Hz – 8 Hz	20	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$0.2 / f^2$
8 Hz – 25 Hz	20	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^{-2} / f$
25 Hz – 300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2.4 \times 10^5 / f$	$0.3 / f$
3 Hz – 10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

Note:

- f in Hz
- Per una guida sulle esposizioni a campi non sinusoidali e a frequenze multiple si vedano più avanti le sezioni a parte
- Per prevenire effetti indiretti, specialmente in campi elettrici elevati, si veda la sezione "Misure protettive"
- Nell'intervallo di frequenze oltre i 100 kHz, si devono anche considerare i livelli di riferimento specifici per i campi a radiofrequenza.

Tabella4. Livelli di riferimento per l'esposizione del pubblico a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo (valori quadratici medi del campo imperturbato)

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico E (kV/m)	Intensità del campo magnetico H (A/m)	Induzione magnetica B (T)
1 Hz – 8 Hz	5	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8 Hz – 25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25 Hz – 50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz – 400 Hz	$2.5 \times 10^2 / f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz – 3 kHz	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 Hz – 10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

Note:

- f in Hz
- Si vedano più avanti le sezioni a parte per una guida sulle esposizioni a campi non sinusoidali e a frequenze multiple
- Nell'intervallo di frequenze oltre i 100 kHz, si devono anche considerare i livelli di riferimento specifici per i campi a radiofrequenza.

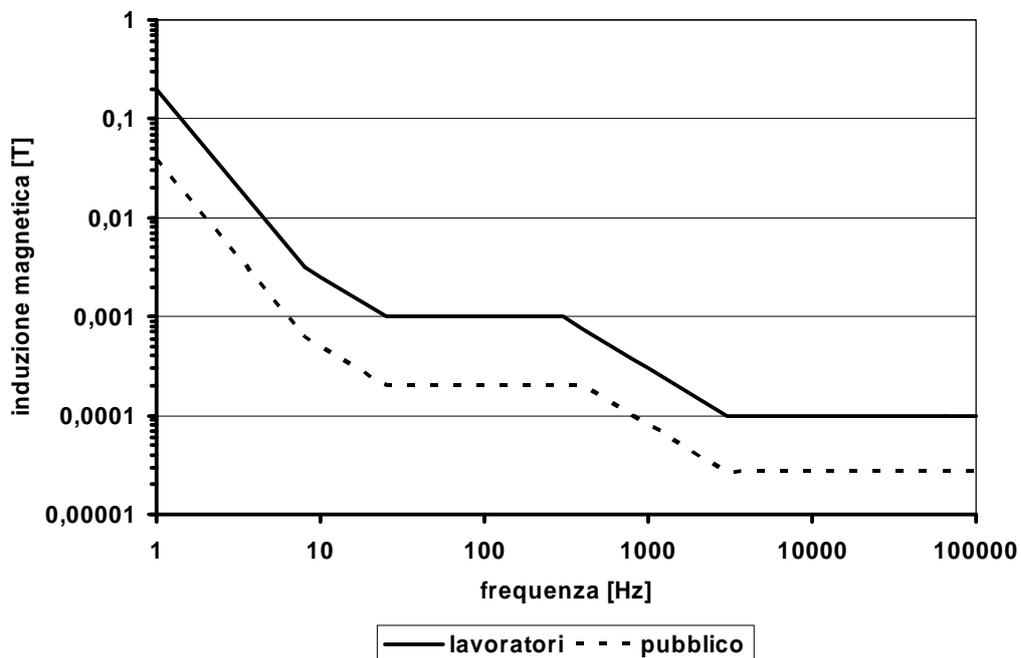


Figura2. Livelli di riferimento per l'esposizione a campi magnetici variabili nel tempo (confronta Tabelle 3 e 4).

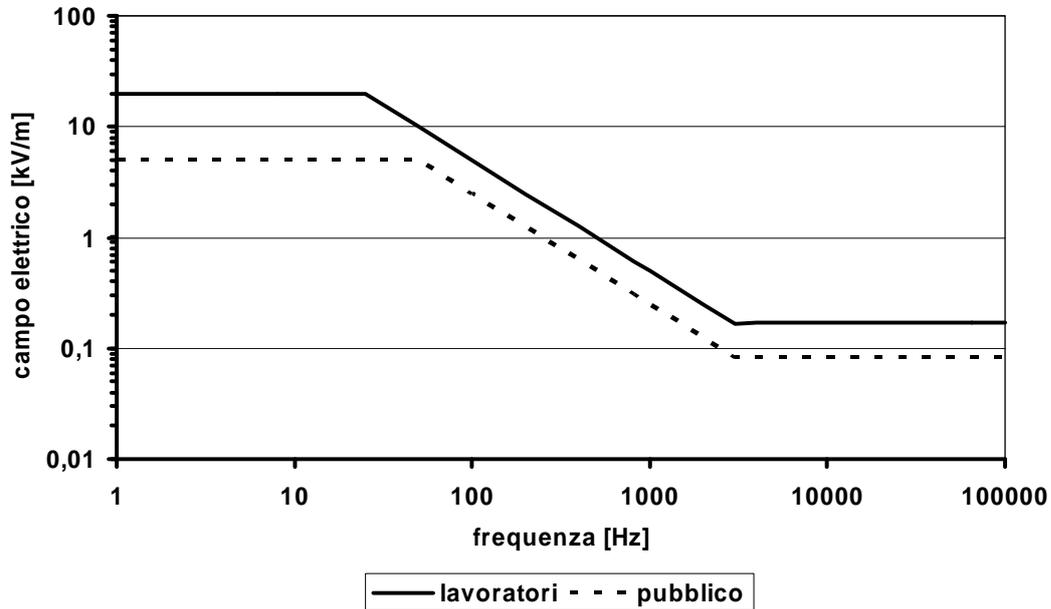


Figura3. Livelli di riferimento per l'esposizione a campi elettrici variabili nel tempo (confronta Tabelle 3 e 4).

I livelli di riferimento sono stati stabiliti per condizioni di esposizione in cui la variazione del campo elettrico o magnetico entro lo spazio occupato dal corpo è relativamente piccola. Nella maggior parte dei casi, però, la distanza dalla sorgente è talmente piccola che la distribuzione del campo è non uniforme, o localizzata in una piccola parte del

corpo. In questi casi la misura della massima intensità del campo elettrico nella posizione dello spazio occupata dal corpo dà luogo a una valutazione dell'esposizione che garantisce sicurezza, ma è molto conservativa.

Per una sorgente localizzata a una distanza di pochi centimetri dal corpo, la sola opzione realistica per la valutazione dell'esposizione consiste nel determinare dosimetricamente, caso per caso, il campo elettrico indotto. Quando la distanza supera i 20 cm, la distribuzione del campo diventa meno localizzata ma è ancora non uniforme ed in questo caso è possibile determinarne la media spaziale nel corpo o in parti di esso (Stuchly and Dawson 2002; Jokela 2007). La media spaziale non dovrebbe superare i livelli di riferimento. L'esposizione locale può in effetti superare i livelli di riferimento, ma con l'importante condizione che non venga superata la restrizione di base. È compito degli enti di standardizzazione fornire ulteriori indicazioni sulle specifiche condizioni di esposizione in cui la media spaziale può essere applicata. Queste indicazioni devono basarsi su una dosimetria ben consolidata. Gli enti di standardizzazione possono anche ricavare nuovi livelli di riferimento per particolari tipi di esposizione non uniforme.

Additività dell'esposizione al campo elettrico e al campo magnetico

Il campo elettrico ed il campo magnetico inducono ciascuno una componente vettoriale del campo elettrico e queste componenti si sommano vettorialmente nel tessuto. Nel caso di un'analisi dell'esposizione basata sul campo elettrico e su quello magnetico esterni, un approccio conservativo potrebbe consistere nell'assumere che le componenti del campo interno indotte elettricamente e magneticamente raggiungano il massimo valore nello stesso punto critico e con la stessa fase. Questo implicherebbe che le esposizioni al campo elettrico e a quello magnetico esterni siano additive (Cech et al 2008). Situazioni simili sono però considerate molto rare, tenendo conto della grande differenza nella distribuzione dei campi elettrici indotti elettricamente e magneticamente.

LIVELLI DI RIFERIMENTO PER LE CORRENTI DI CONTATTO

Fino a 100 kHz, si forniscono livelli di riferimento per le correnti di contatto, verso le quali si deve esercitare cautela per evitare rischi di scosse e ustioni. I livelli di riferimento per contatti puntuali sono presentati nella Tabella 5. Poiché i valori di soglia delle correnti di contatto per la stimolazione di risposte biologiche in bambini e donne adulte sono, rispettivamente, circa metà e due terzi di quelle per i maschi adulti, i livelli di riferimento per le correnti di contatto sono stabiliti per il pubblico a valori inferiori di un fattore 2 rispetto a quelli per le esposizioni lavorative. Si deve notare che con i livelli di riferimento non si intende prevenire la percezione dei campi, ma evitare scosse dolorose.

La percezione delle correnti di contatto non è di per sé pericolosa, ma può essere considerata come un fastidio. La prevenzione di correnti di contatto eccessive è possibile con soluzioni tecniche.

Tabella5. Livelli di riferimento per le correnti, variabili nel tempo, di contatto con oggetti conduttori

Caratteristiche dell'esposizione	Intervallo di frequenza	Massima corrente di contatto (mA)
Esposizione professionale	Fino a 2.5 kHz	1.0
	2.5–100 kHz	0.4 <i>f</i>
	100 kHz – 10 MHz	40
Esposizione del pubblico	Fino a 2.5 kHz	0.5
	2.5–100 kHz	0.2 <i>f</i>
	100 kHz – 10 MHz	20

Nota: *f* è la frequenza in kHz

ESPOSIZIONE SIMULTANEA A CAMPI A FREQUENZE MULTIPLE

È importante determinare se, in situazioni di esposizione simultanea a campi di frequenze differenti, le esposizioni siano additive nei loro effetti. Le formule sottostanti si applicano alle frequenze d'interesse, in condizioni di pratica

esposizione. Per la stimolazione elettrica, rilevante fino a 10 MHz, i campi elettrici interni devono essere sommati secondo la formula:

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_{i,j}}{E_{L,j}} \leq 1 \quad (3)$$

dove

$E_{i,j}$ è l'intensità del campo elettrico interno indotto alla frequenza j ;

$E_{L,j}$ è la restrizione sull'intensità del campo elettrico indotto alla frequenza j , come fornita nella Tabella 2.

Per la pratica applicazione delle restrizioni di base, si dovrebbero applicare le seguenti formule relative ai livelli di riferimento per le intensità dei campi:

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_j}{E_{R,j}} \leq 1 \quad (4)$$

e

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{R,j}} \leq 1 \quad (5)$$

dove

E_j è l'intensità del campo elettrico alla frequenza j ;

$E_{R,j}$ è il livello di riferimento per l'intensità del campo elettrico alla frequenza j , fornito nelle Tabelle 3 e 4;

H_j è l'intensità del campo magnetico alla frequenza j ;

$H_{R,j}$ è il livello di riferimento per l'intensità del campo magnetico alla frequenza j , fornito nelle Tabelle 3 e 4.

Per le correnti negli arti e per le correnti di contatto si dovrebbero applicare, rispettivamente, le formule seguenti:

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{I_j}{I_{L,j}} \leq 1 \quad (6)$$

dove

I_j è la componente della corrente di contatto alla frequenza j ;

$I_{L,j}$ è il livello di riferimento per la corrente di contatto alla frequenza j , fornito nella Tabella 5.

ESPOSIZIONE A CAMPI NON SINUSOIDALI

Alle basse frequenze, sotto i 100 kHz, i campi elettrici e soprattutto quelli magnetici sono nella maggior parte dei casi distorti da componenti armoniche distribuite in un'ampia banda di frequenze. Di conseguenza, le forme d'onda dei campi sono complesse e spesso pulsate. È sempre possibile decomporre questi campi in un numero discreto di componenti spettrali usando, ad esempio, tecniche di trasformate di Fourier ed applicando la formula per le frequenze multiple descritta in precedenza. Questa procedura si basa sull'assunzione che le componenti spettrali si sommino in fase, cioè che tutti i massimi coincidano nello stesso istante e diano luogo a un picco pronunciato. Questa è un'assunzione realistica quando il numero delle componenti spaziali è limitato e le loro fasi non sono coerenti, cioè variano casualmente. Per fasi fisse e coerenti l'assunzione può essere indebitamente conservativa. Inoltre, il campionamento ed il sezionamento nell'analisi spettrale della trasformata di Fourier possono creare frequenze spurie, le quali possono aumentare artificialmente i contributi alla somma lineare delle esposizioni.

Un'opzione alternativa al metodo spettrale consiste nel pesare i campi elettrici e magnetici esterni, i campi elettrici indotti e le correnti indotte con una funzione di filtro legata alla restrizione di base o al livello di riferimento (ICNIRP 2003b; Jokela 2000). Nel caso di un campo a banda larga formato da componenti armoniche, la restrizione imposta con il filtraggio può essere presentata matematicamente come

$$\left| \sum_i \frac{A_i}{EL_i} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \varphi_i) \right| \leq 1 \quad (7)$$

dove t è il tempo, EL_i è il limite di esposizione alla i -ma frequenza armonica ed A_i , θ_i , φ_i sono rispettivamente le ampiezze del campo, gli angoli di fase del campo e gli angoli di fase del filtro alle frequenze armoniche. Salvo che per gli angoli di fase, l'equazione è simile alle formule di somma (3), (4) e (5). Ulteriori indicazioni sull'applicazione pratica della funzione di ponderazione sono fornite nell'appendice informativa-

MISURE PROTETTIVE

L'ICNIRP nota che la protezione delle persone esposte a campi elettrici e magnetici può essere assicurata dal rispetto di tutti gli aspetti di queste linee guida.

Le misure per la protezione dei lavoratori comprendono misure tecniche, controlli amministrativi e programmi di protezione personale. Misure protettive adeguate devono essere adottate quando l'esposizione sui posti di lavoro dà luogo a un superamento delle restrizioni di base. Come primo passo, si devono effettuare, ove possibile, controlli tecnici per ridurre le emissioni degli apparati a livelli accettabili. Questi controlli comprendono buoni progetti di protezione e, se necessario, l'uso di interblocchi o di altri meccanismi simili di protezione.

Assieme ai controlli tecnici, si dovrebbero adottare controlli amministrativi, come limitazioni d'accesso e segnalazioni acustiche e visive. Misure di protezione personale, come indumenti protettivi, sebbene utili in alcune circostanze, devono considerarsi come soluzione ultima per garantire la sicurezza dei lavoratori, dando la precedenza, ove possibile, alle misure tecniche e amministrative. Inoltre, quando si usano questi mezzi, come ad esempio guanti isolanti per proteggere gli individui dalle scosse, non si dovrebbero comunque superare le restrizioni di base perché l'isolamento protegge solo dagli effetti indiretti dei campi.

Con l'eccezione degli indumenti protettivi e di altre misure di protezione personale, le stesse misure possono essere applicate per il pubblico ogni volta che vi sia la possibilità di un superamento dei limiti di riferimento. È anche essenziale definire e mettere in atto regole che prevengano:

- l'interferenza con apparati medici elettronici (compresi i pacemaker cardiaci);
- l'innescò di sistemi elettro-esplosivi (detonatori);
- incendi ed esplosioni dovuti all'azione delle scintille causate da campi indotti, da correnti di contatto o da scariche elettriche su materiali infiammabili.

CONSIDERAZIONI SU POSSIBILI EFFETTI A LUNGO TERMINE

Come notato in precedenza, gli studi epidemiologici hanno coerentemente indicato che l'esposizione cronica a campi magnetici a frequenza industriale di bassa intensità (al di sopra di 0,3-0,4 μ T) è associata ad un aumento del rischio di leucemia infantile. Tuttavia, non è stata stabilita una relazione causale tra campi magnetici e leucemia infantile, né è stato appurato alcun altro effetto a lungo termine. La mancanza di prove di causalità implica che questo effetto non possa essere considerato nelle restrizioni di base. Consigli per la gestione del rischio, tra cui considerazioni sulle misure di precauzione, sono stati comunque forniti dall'OMS e da altre istituzioni.

Ringraziamenti. L'ICNIRP ringrazia per il loro supporto l'Associazione Internazionale per le Protezioni Radiologiche (IRPA), l'Organizzazione Mondiale della Sanità, l'Ufficio Internazionale del Lavoro (ILO), la Commissione Europea ed il Ministero Tedesco per l'Ambiente, la Conservazione della Natura e la Sicurezza Nucleare. L'ICNIRP è anche molto grata ai propri consulenti esperti e a tutti i revisori per i contributi ricevuti nella consultazione aperta.

Durante la preparazione di queste linee guida, le composizioni della Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti e del Gruppo di Lavoro ELF dell'ICNIRP erano le seguenti:

ICNIRP

P. Vecchia, Presidente (Italia)
M. Hietanen, Vicepresidente fino al 2008 (Finlandia)
R. Matthes, Vicepresidente dal 2008 (Germania)
A. Ahlbom fino al 2008 (Svezia)
E. Breitbart fino al 2008 (Germania)
F. R. De Gruijl fino al 2008 (Paesi Bassi)
M. Feychting (Svezia)
A. Green (Australia)
K. Jokela (Finlandia)
J. Lin (USA)
R. Saunders (Regno Unito)
K. Schulmeister (Austria)
P. Söderberg (Svezia)
B. Stuck (USA)
A. Swerdlow (Regno Unito)
M. Taki fino al 2008 (Giappone)
B. Veyret (Francia)

G. Ziegelberger, Segretaria Scientifica (Austria)
M.H. Repacholi, Presidente Emerito (Svizzera)

GRUPPO DI LAVORO ELF

R. Matthes (Germania), Coordinatore
A. Ahlbom (Svezia)
K. Jokela (Finlandia)
C. Roy (Australia)
R. Saunders (Regno Unito)

BIBLIOGRAFIA

- Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen J H, Tynes T, Verkasalo PK. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* 83:692-8; 2000.
- Attwell D. Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system. *Radiat Prot Dosimetry* 106(4):341-348; 2003.
- Bahr A, Bolz T, Hennes C. Numerical dosimetry ELF: accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines. *Health Physics* 92(6):521-530; 2007.
- Barth A, Ponocny I, Ponocny-Seliger E, Vana N, Winker R. Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis. *Bioelectromagnetics*. 2009 Sep 14. [Epub ahead of print].
- Bencsik M, Bowtell R, Bowley R. Electric fields induced in the human body by time varying magnetic fields in MRI: numerical calculations and correlation analysis. *Phys Med Biol* 52:2337-2353; 2007.
- Brand M, Heid O. Induction of electric fields due to gradient switching: a numerical approach. *Magnetic Resonance in Medicine* 48:731-734; 2002.
- Cech R., Leitgeb N., Padiaditis M. Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure. *Phys. Med. Biol.* 53:177-186;2008.

- Cook CM, Thomas AW, Prato FS. Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: a review of recent studies. *Bioelectromagnetics* 23(2):144-157; 2002.
- Cook CM, Saucier D M, Thomas AW, Prato FS. Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: the time-course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001-2005). *Bioelectromagnetics* 27:613-627; 2006.
- Crasson M. 50-60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review. *Radiat Prot Dosimetry* 106(4):333-340; 2003.
- Crompton MJ, Collins AR. Are environmental electromagnetic fields genotoxic? *DNA Repair (Amst)* 3(10):1385-1387; 2004.
- Dimbylow PJ. Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys Med Biol* 50:1047-70, 2005.
- Dimbylow PJ. Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz. *Phys Med Biol* 51:2383-2394; 2006.
- Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP. Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol* 37:329-40; 2008.
- Greenland S, Sheppard A R, Kaune W T, Poole C, Kelsh M A. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiology* 11(6):624-34; 2000.
- Hirata A, Wake K, Watanabe S, Taki M. In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures. *Radiation Protection Dosimetry* 135(4): 272-275; 2009
- Hirata A. Personal communication, 2009.
- HPA - National Radiological Board (NRPB). Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz). Documents of the NRPB 15(3), ISBN 0-85951-533-8; 2004.
- Huss A, Spoerri A, Egger M, Rööslı M. Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am J Epidemiol* 169:167-75; 2009.
- IARC International Agency for Research on Cancer. Static and extremely low frequency electric and magnetic fields. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Volume 80; 2002.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. *Health Phys* 66(1): 100-106; 1994.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74(4): 494-522; 1998.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Physics* 82 (4): 540-548; 2002
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0-100 kHz) - Review of the Scientific Evidence and Health Consequences. Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A, Vecchia P, Veyret B (eds) ISBN3-934994-03-2; 2003a.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. *Health Phys* 84:383-387; 2003b.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients. *Health Phys* 87(2):197-216; 2004a.

- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection Standing Committee on Epidemiology (ICNIRP SCI): Ahlbom A, Green A, Kheifets L, Savitz D, Swerdlow A. Epidemiology of Health Effects of Radiofrequency Exposure. *Environmental Health Perspectives* 112(17): 1741-1754; 2004.
- ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limiting exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 96(4): 504-514; 2009.
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC) 62226. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body; 2004.
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC) 62233. Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure, 2005
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC). Medical electrical equipment - Part 1: General requirements for safety 2. collateral standard: electromagnetic compatibility - requirements and tests IEC 60601-1-2; 2005
- IEC International Electrotechnical Commission (IEC). Particular requirements for the safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. Geneva, IEC 60601-2-33; 2006.
- IEEE 1308. Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters - 10 Hz to 3 kHz; 1994.
- IEEE 644-1994 (Reaff 2008). IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines; 2008.
- Ivancsits S, Diem E, Jahn O, Rüdiger HW. Age-related effects on induction of DNA strand breaks by intermittent exposure to electromagnetic fields. *Mech Ageing Dev* 124(7):847-850; 2003a.
- Ivancsits S, Diem E, Jahn O, Rüdiger HW. Intermittent extremely low frequency electromagnetic fields cause DNA damage in a dose-dependent way. *Int Arch Occup Environ Health* 76(6):431-436; 2003b.
- Jefferys JG. Experimental neurobiology of epilepsies. *Curr Opin neurol.* 7:113-122. 1994.
- Jokela K. Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields. *Health Phys.* 79:373-388; 2000.
- Jokela K. Assessment of complex emf exposure situations including inhomogeneous field distribution. *Health Phys* 92:531- 540, 2007.
- Juutilainen J. Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. *Radiat Prot Dosimetry* 106(4):385-390; 2003.
- Juutilainen J. Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 7:107-115; 2005.
- Kanai R, Chaieb L, Antal A, Walsh V and Paulus W. Frequency-dependent electrical stimulation of the visual cortex. *Curr Biol.*, 18, 1839-1843, 2008.
- Kheifets L, Ahlbom A, Johansen C, Feychting M, Sahl J, Savitz D. Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease. *Scand J Work Environ Health* 33(1): 5-12; 2007.
- Kheifets L, Bowman JD, Checkoway H, Feychting M, Harrington M, Kavet R, Marsh G, Mezei G, Renew DC, van Wijngaarden E. Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations. *Occup Environ Med* 66(2):72-80; 2009.
- McNamee D A, Legros A G, Krewski D R, Wisenberg G, Prato F S, and Thomas A W. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Int Arch Occup Environ Health*, 82, 919-933. 2009.
- Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M and Yamanaka Y. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry *Phys. Med. Biol.* 49:1-15; 2004

- Nyenhuis JA, Bourland JD, Kildishev AV, Schaefer DJ. Health effects and safety of intense gradient fields. IN *Magnetic Resonance Procedures: Health Effects and Safety*. (F Shellock, Ed). CRC Press:31-54; 2001. Pogosyan A, Gaynor L D, Eusebio A and Brown P. Boosting cortical activity at beta-band frequencies slows movement in humans. *Curr Biol.*, 19, 1-5, 2009.
- Reilly J. *Applied Bioelectricity: From electrical stimulation to electropathology*. Springer-Verlag, New York ;1998.
- Reilly JP. Comments concerning "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 76(3):314-315; 1999.
- Reilly JP. Neuroelectric mechanisms applied to low frequency electric and magnetic field exposure guidelines - part I: sinusoidal waveforms. *Health Phys* 83(3):341-355; 2002.
- Reilly J, Diamant A. Spatial relationships in electrostimulation: Application to electromagnetic field standards. *IEEE Trans. on Biomed. Eng.* 50(6):783-785; 2003.
- Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med* 67(2):224-32; 2005.
- Saunders RD, Jefferys JG. Weak Electric Field Interactions in the Central Nervous System. *Health Phys* 83(3): 366-375; 2002.
- Saunders RD, Jefferys JG. A neurobiological basis for ELF guidelines. *Health Phys* 92:596-603; 2007.
- Scarfi MR, Sannino A, Perrotta A, Sarti M, Mesirca P, Bersani F. Evaluation of genotoxic effects in human fibroblasts after intermittent exposure to 50 Hz electromagnetic fields: a confirmatory study. *Radiat Res* 164(3):270-276; 2005.
- So P.P.M., Stuchly M.A. and Nyenhuis J A. Peripheral nerve stimulation by gradient switching fields in magnetic resonance imaging. *IEEE Trans. on Biomed. Eng.* 51:1907-1914; 2004.
- Stuchly MA, Dawson TW. Human body exposure to power lines: relation of induced quantities to external magnetic field. *Health Phys* 83:333-340; 2002.
- Watanabe S. Personal communication; 2009.
- World Health Organization (WHO). *Environmental Health Criteria 238. Extremely Low Frequency (ELF) Fields*. Geneva: World Health Organization; 2007a.
- World Health Organization (WHO). *Electromagnetic fields and public health: exposure to extremely low frequency Fields. Fact Sheet No 322*. Geneva: World Health Organization; 2007b.
- World Health Organization (WHO). Preamble to the Constitution of WHO as adopted by the International Health Conference, New York, June 1946. Official records of the World Health Organization. No2:100. http://whqlibdoc.who.int/hist/official_records/constitution.pdf.1946
- Xi, W., Stuchly, M. A. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*; 9:127-134; 1994.

ALLEGATO INFORMATIVO

Determinazione dell'esposizione di picco ponderato

La ponderazione si può effettuare calcolando dapprima lo spettro della forma d'onda ed applicando poi l'equazione 7. In molte applicazioni, però, è più conveniente fare ricorso a un filtraggio analogico o digitale della forma d'onda nel dominio del tempo. Il guadagno del filtro (cioè, il rapporto tra segnale d'uscita e segnale d'entrata) dovrebbe variare con la frequenza in proporzione diretta al limite di esposizione: $G = EL(f_{ref})/EL(f)$, dove EL è il limite di esposizione alla frequenza f e f_{ref} è una frequenza arbitraria di riferimento tra 1 Hz e 100 kHz. Il valore di picco della forma d'onda filtrata non dovrebbe superare il limite di esposizione (restrizione di base o livello di riferimento) convertito nel valore (ampiezza) di picco alla frequenza di riferimento. La Tabella 6 illustra i limiti di picco derivati per i campi elettrici e magnetici normalizzati alla frequenza di riferimento di 50 Hz.

Oltre all'ampiezza i filtri fisici del segnale influenzano sempre la fase del campo, che modifica il valore di picco del campo filtrato. Come mostrato nelle Figure 1, 2 e 3, i limiti sono divisi per bande di frequenza, entro le quali variano proporzionalmente a $1/f^2$, $1/f$, f^0 (costanti) o f . In questi intervalli l'angolo di fase ϕ , del filtro (v. Eq. 7) è rispettivamente di 180, 90, 0 e -90 gradi (vedi Fig. A1).

Tabella 6. Limiti di picco derivati per campi elettrici e magnetici non sinusoidali. La frequenza di riferimento è 50 Hz

	$E_{indotto}(mV/m)$		$E_{esterno}(V/m)$	$B(\mu T)$
	Cervello	Tessuti corporei		
Lavoratori	$\sqrt{2} \times 100$	$\sqrt{2} \times 800$	$\sqrt{2} \times 10\,000$	$\sqrt{2} \times 1\,000$
Pubblico generico	$\sqrt{2} \times 20$	$\sqrt{2} \times 400$	$\sqrt{2} \times 5\,000$	$\sqrt{2} \times 200$

Il filtro di ponderazione può essere approssimato con un filtro elettronico o digitale in cui l'attenuazione non deve deviare più di 3 dB e l'angolo di fase più di 90 gradi dalla risposta esatta data dalla linea spezzata in funzione della frequenza. Come esempio, la Figura A1 mostra l'attenuazione e la fase in funzione della frequenza per il filtro usato per pesare il campo elettrico. Le curve approssimate sono basate su una semplice approssimazione con una funzione di filtro tipo RC (resistore/capacitore).

L'approccio del picco ponderato si può usare per campi sia coerenti, sia non coerenti. In quest'ultimo caso il tempo di misura deve essere abbastanza lungo da rivelare con una ragionevole probabilità il valore di picco del caso peggiore. Nel caso di campi non coerenti che consistano di poche frequenze, l'approccio del picco ponderato è identico alla sommatoria spettrale.

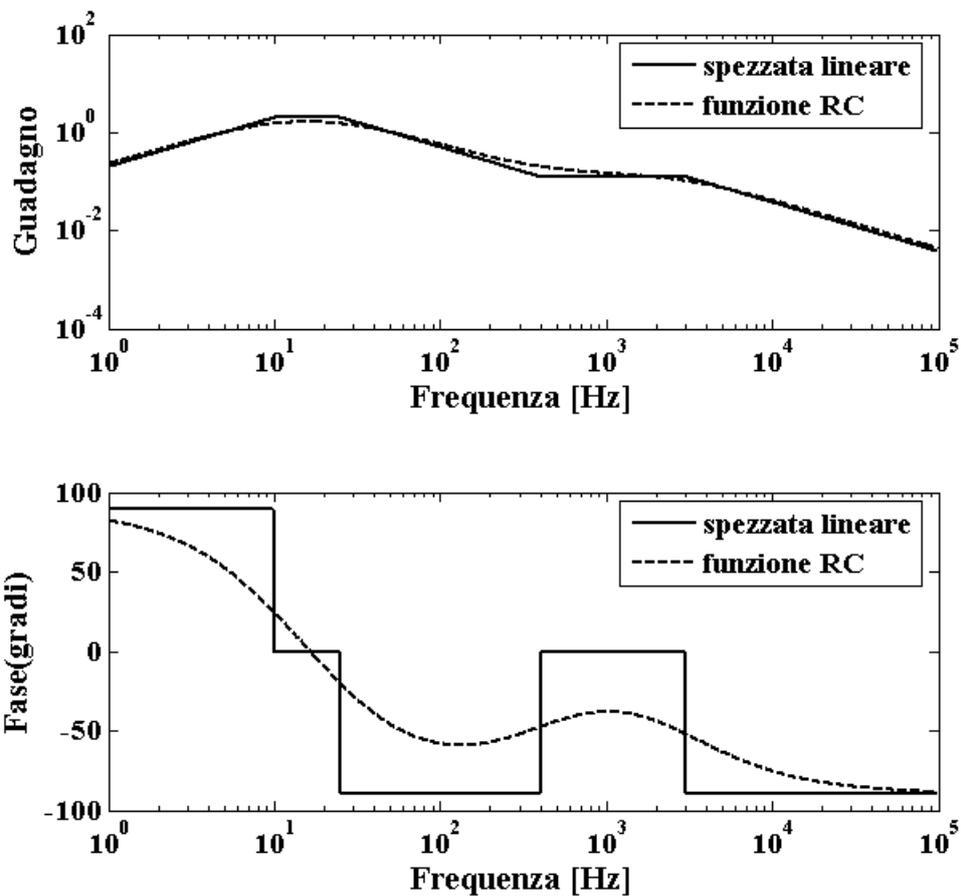


Figura A1. Risposta in ampiezza e fase per la ponderazione del campo elettrico indotto

GLOSSARIO

Armoniche

Frequenze che sono multipli interi della frequenza di rete o di qualche altra frequenza particolare.

Campi elettromagnetici

Combinazione di campi elettrici e magnetici nell'ambiente. Questo termine viene spesso confuso con quello di "radiazione elettromagnetica" e può quindi essere fuorviante quando è usato per le frequenze estremamente basse, in cui la radiazione non è praticamente rilevabile.

Campo elettrico

Un campo vettoriale \mathbf{E} espresso in volt al metro

Campo magnetico

Una grandezza vettoriale, \mathbf{H} , specifica un campo magnetico in qualunque punto dello spazio; è espresso in ampere al metro (A/m). Si veda anche Induzione magnetica

Cancro

Malattia caratterizzata dalla divisione incontrollata e anormale delle cellule eucariotiche e dalla diffusione della malattia (metastasi) a svariati siti nell'organismo

Caratteristiche

Proprietà fisiche dettagliate dei campi elettrici o magnetici, come l'ampiezza, lo spettro di frequenze, la polarizzazione, la modulazione ecc.

Campo non uniforme

Un campo che non è costante in ampiezza, direzione e fase relativa lungo le dimensioni del corpo, o delle parti del corpo in considerazione. Nel caso di campi elettrici, la definizione si applica a un campo ambientale non perturbato dalla presenza del corpo.

CC

Abbreviazione di "corrente continua" (*in inglese DC, abbreviazione di "direct current", NdT*), ma usata anche per indicare la costanza dei campi (*v. Campi statici*)

Campo statico

Un campo che non varia nel tempo. Nella maggior parte degli ambienti, i campi elettrici e magnetici cambiano nel tempo, ma il loro spettro di frequenza ha una componente a 0 Hz. Questa componente "quasi statica" del campo può essere misurata mediando sul tempo di campionamento il segnale oscillante.

Conducibilità

Una proprietà dei materiali, espressa in siemens al metro (S/m), che determina la densità di corrente elettrica quando al materiale viene applicato un campo elettrico; è l'inverso della resistività

Corrente di contatto

La corrente fatta passare in un mezzo biologico mediante un elettrodo di contatto o un'altra sorgente di corrente

Corrente di rilascio

Il livello di soglia della corrente elettrica per cui la contrazione involontaria dei muscoli impedisce il rilascio di un conduttore in tensione che sia stato afferrato.

Densità di corrente

Un vettore, il cui integrale su una data superficie è uguale alla corrente che fluisce attraverso la superficie stessa; la densità di corrente media in un conduttore lineare è uguale alla corrente divisa per la sezione trasversale del conduttore. È espressa in ampere al metro quadrato (A/m^2)

Depolarizzazione (cellulare)

La riduzione del potenziale a riposo attraverso una membrana cellulare

Distanza di media

La distanza su cui si media il campo elettrico interno quando si verifica il rispetto delle restrizioni di base

DNA (acido desossiribonucleico)

Una molecola polimerica formata da gruppi di desossiribonucleotidi che, disposti lungo un doppio filamento a forma di doppia elica, costituiscono il materiale genetico della maggior parte degli organismi

Dosimetria

Misura, o determinazione mediante calcoli, dell'intensità del campo elettrico interno, o della corrente elettrica indotta, o dell'assorbimento specifico (SA, specific absorption), o del tasso di assorbimento specifico (SAR, specific absorption rate) in esseri umani o animali esposti a campi elettromagnetici

Effetto diretto

Un effetto biologico risultante dall'interazione diretta dei campi elettromagnetici con le strutture biologiche

Effetto nocivo

Un effetto di danno alla salute di un individuo, dovuto all'esposizione a un campo elettrico o magnetico, o a una corrente di contatto

Elettrostimolazione

Induzione, mediante uno stimolo elettrico, di un potenziale d'azione che si propaga nei tessuti; polarizzazione elettrica in processi pre-sinaptici con conseguente modificazione nell'attività post-sinaptica della cellula.

Elettrostimolazione diretta

La stimolazione, tramite un campo elettrico entro il sistema biologico, indotta da un campo elettrico o magnetico esterno senza contatto diretto con altri conduttori o correnti di scarica

Energia elettromagnetica

L'energia immagazzinata in un campo elettromagnetico. È espressa in joule (J)

Esposizione

Ciò che si verifica ogni volta che una persona è soggetta all'influenza di un campo a bassa frequenza o da una corrente di contatto.

Esposizione a fini medici

L'esposizione a campi a bassa frequenza che una persona riceve come paziente soggetto a diagnosi o cura medica, o come volontario nella ricerca medica.

Esposizione a lungo termine

Questo termine indica un'esposizione che duri per una parte rilevante della vita del sistema biologico coinvolto; la sua durata può quindi variare da poche settimane a molti anni.

Esposizione del pubblico

Ogni esposizione a campi elettromagnetici sperimentata da membri del pubblico generico, escluse le esposizioni lavorative e quelle per scopi medici.

Esposizione lavorativa

Ogni esposizione a campi elettromagnetici sperimentata dagli individui per effetto delle loro regolari attività lavorative o di specifici compiti assegnati.

Fase relativa

L'angolo di fase di una forma d'onda sinusoidale rispetto all'angolo di fase di un'altra forma d'onda misurata in un punto diverso entro il mezzo conduttore o rispetto a una data forma d'onda di riferimento.

Fattore di riduzione

Misura della riduzione di una soglia di effetti, per compensare varie fonti d'incertezza nel processo di definizione delle linee guida. Esempi di fonti d'incertezza sui livelli di soglia degli effetti dell'esposizione sono l'estrapolazione all'uomo dei dati sugli animali, differenze nelle riserve fisiologiche e nelle corrispondenti tolleranze in persone diverse e incertezze statistiche (limiti di confidenza) nella funzione dose-risposta. Secondo l'ICNIRP, l'incertezza nelle misure sperimentali impiegate nell'attuazione delle linee guida spetta soprattutto alle organizzazioni che hanno la responsabilità di sviluppare metodi per la conformità. Questo aspetto non viene considerato dall'ICNIRP nel definire i fattori di riduzione.

Fibra nervosa

Un singolo assone del nervo.

Fibrillazione ventricolare

Aritmia dei ventricoli del cuore, caratterizzata da rapide contrazioni scoordinate.

Forma d'onda

Variazione dell'ampiezza di un campo nel tempo. Se non diversamente specificato, in queste linee guida il termine forma d'onda si riferisce a valori (o misure) in siti interni al mezzo biologico.

Fosfene

Sensazione visiva causata da stimoli non luminosi. Gli elettrofosfene sono indotti da correnti elettriche, i magnetofosfene da campi magnetici.

Frequenza industriale (o frequenza di rete)

La frequenza a cui si genera elettricità in corrente alternata. Per le utenze elettriche, la frequenza di rete è di 60 Hz nell'America Settentrionale, in Brasile e in parte del Giappone, di 50 Hz in gran parte del resto del mondo.

Frequenze armoniche *v. Armoniche*

Hertz (Hz)

Unità di misura della frequenza (f). Un hertz è uguale a un ciclo al secondo. 1 kHz = 1000 Hz, 1 MHz = 1000 kHz, 1 GHz = 1000 MHz.

Induzione

Un campo elettrico o magnetico in un mezzo conduttore, prodotto dall'azione di un campo elettrico o magnetico esterno (ambientale).

Intensità di campo elettrico (E)

La forza esercitata da un campo elettrico su una carica elettrica puntiforme, divisa per la carica stessa. L'intensità del campo elettrico è espressa in newton al coulomb o in volt al metro ($N/C = V/m$).

Intensità di campo magnetico (H)

L'ampiezza del vettore campo magnetico, espressa in ampere al metro (A/m).

Induzione magnetica (B)

Una grandezza vettoriale che specifica la forza di una o più cariche in moto (corrente elettrica). L'induzione magnetica è espressa in tesla (T). Un gauss (unità il cui uso è scoraggiato) equivale a 0,0001 T.

Istantaneo

Aggettivo usato per descrivere particolari parametri che devono essere misurati o valutati su di un intervallo di tempo molto breve (tipicamente 100 microsecondi o meno).

Lavoratori *V. Esposizione lavorativa*

Livelli di riferimento

Valori quadratici medi (rms) e valori di picco dei campi elettrici e magnetici e delle correnti di contatto a cui una persona può essere esposta senza effetti nocivi e con fattori di sicurezza accettabili. I livelli di riferimento per l'esposizione a campi elettrici e magnetici specificati in questo documento possono essere superati, se si può dimostrare che non vengono superate le restrizioni di base. I livelli di riferimento sono quindi parametri pratici o "surrogati" che possono essere usati per accertare il rispetto delle restrizioni di base.

Magnetofosfeni

Sensazione di lampi luminosi provocata da correnti elettriche che stimolano la retina.

Meccanismo accertato

Un meccanismo bioelettrico che possiede le seguenti caratteristiche: (a) può essere usato per predire un effetto biologico nell'uomo; (b) può essere modellizzato esplicitamente con equazioni o relazioni parametriche; (c) è stato verificato nell'uomo, oppure da dati su animali che possono credibilmente essere estrapolati all'uomo; (d) è supportato da solide evidenze; (e) è largamente accettato dalla comunità scientifica.

Membrana plasmatica

Doppio strato lipidico che circonda il citoplasma delle cellule animali e vegetali.

Metrica di esposizione

Un numero che riassume l'esposizione a un campo elettrico o magnetico. La metrica è generalmente costituita da una combinazione di elaborazione del segnale strumentale e analisi dei dati successivamente alla misura.

Mutageno

Una sostanza in grado di causare una mutazione.

Mutazione

Qualunque modificazione osservabile ed ereditaria del materiale genetico, non causata da ricombinazione genica.

Nervo

Un fascio di assoni.

Nervo periferico

Un nervo che si trova al di fuori del sistema nervoso centrale e che porta da o verso quest'ultimo

Neurone

Una singola unità cellulare che generalmente consiste in un assone, un corpo cellulare e un albero dendritico.

Permeabilità

La grandezza scalare o tensoriale il cui prodotto per l'intensità del campo magnetico fornisce l'induzione magnetica. *Nota:* Per i mezzi isotropi, la permeabilità è uno scalare, per quelli anisotropi una matrice. *Sinonimo:* permeabilità assoluta. Se si divide la permeabilità di un materiale o di un mezzo per la permeabilità del vuoto (costante magnetica μ_0), si ottiene ciò che è chiamato permeabilità relativa (μ). La sua unità è l'henry al metro (H/m).

Permeabilità relativa

La permeabilità (assoluta) (ν) divisa per la permeabilità del vuoto. Un valore prossimo all'unità significa che il materiale è magnetizzato solo debolmente da un campo esterno.

Permittività

Costante che definisce l'influenza di un mezzo isotropo sulle forze di attrazione o repulsione tra corpi elettricamente carichi e che è espressa in farad al metro (F/m); la permittività relativa è la permittività di un materiale o di un mezzo divisa per la permittività del vuoto.

Picco spaziale

Termine usato per descrivere il massimo livello di una determinata grandezza, misurato su una piccola massa o una piccola area del corpo umano.

Polarizzazione (cellulare)

Potenziale elettrico che si forma attraverso una membrana cellulare.

Proteina

Composto organico di elevato peso molecolare, contenente azoto, di forma e composizione complesse.

Pubblico (generico)

Il termine pubblico (generico) si riferisce all'intera popolazione. Questa comprende individui di tutte le età e con differente stato di salute, tra cui gruppi particolarmente sensibili come persone deboli, anziani, lavoratrici in gravidanza, neonati e bambini piccoli.

Radiazioni non ionizzanti (NIR)

Il termine comprende tutte le radiazioni e i campi dello spettro elettromagnetico che non hanno normalmente l'energia necessaria per produrre ionizzazione nella materia; sono caratterizzate da un'energia per fotone inferiore a circa 12 eV, corrispondente a lunghezze d'onda maggiori di 100 nm, ovvero frequenze minori di 3×10^{15} Hz.

Radiofrequenza (RF)

Energia elettromagnetica di frequenza compresa tra 3 kHz e 300 GHz.

Restrizioni di base

Limitazioni tassative su quantità strettamente legate a tutti i meccanismi noti d'interazione biofisica con i tessuti, che possano portare a effetti nocivi

Rischio relativo (RR)

Rapporto tra il tasso di una patologia nel gruppo in studio e il tasso di un gruppo di controllo con aggiustamenti, ove necessario, per i fattori di confondimento come l'età. Per malattie rare, il rischio relativo è praticamente uguale all'*odds ratio*.

Ritmo cardiaco

Misura del numero di battiti cardiaci al minuto.

Scarica elettrica

Passaggio di corrente attraverso uno strato d'aria, che richiede una tensione abbastanza alta da ionizzare l'aria, a differenza del contatto diretto con una sorgente.

SI

Abbreviazione del sistema internazionale di unità.

Sistema nervoso centrale

Parte del sistema nervoso dei vertebrati costituita dal cervello e dal midollo spinale, ma che esclude i nervi periferici

Soglia

Livello di uno stimolo, che segna il confine tra risposta e assenza di risposta.

Soglia mediana

In una distribuzione statistica, il valore di una soglia tale che tra i soggetti il 50% soglie più alte, ed il restante 50% soglie più basse di questo.

Tempo di fase (t_p)

Il tempo che intercorre tra due passaggi per lo zero di una forma d'onda con valor medio zero. Per un'onda sinusoidale di frequenza f , $t_p = 1/(2f)$. Per una forma d'onda esponenziale, t_p è interpretato come il tempo misurato dal picco della forma d'onda al punto in cui l'ampiezza decade a 0,37 (1/e) del s valore di picco.

Tesla (T)

L'unità S.I. dell'induzione magnetica. 1 tesla = 10000 gauss

Valore medio

La media aritmetica di una serie di misure o di altri dati.

Valore quadratico medio (rms, root mean square)

La radice quadrata della media dei valori di una funzione $F(t)$ variabile nel tempo, su un periodo specifico dall'istante t_1 all'istante t_2 . Si ottiene elevando al quadrato la funzione, determinando poi la media dei quadrati così ottenuti e prendendo la radice quadrata di questo valore medio, cioè:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [F(t)]^2 dt}$$

Valutazione dell'esposizione

La valutazione dell'esposizione di una persona effettuata mediante misure, calcoli e informazioni sulle sorgenti, o con altri mezzi.

Voxel

Elemento di calcolo tridimensionale. In queste linee guida è usato per rappresentare i tessuti animali e umani nei modelli dosimetrici.

Traduzione italiana di Paolo Vecchia, Istituto Superiore di Sanità, Roma

La responsabilità del testo italiano è interamente del traduttore. In caso di difformità rispetto all'originale, fa fede il testo inglese.

L'articolo originale è disponibili sul sito dell'ICNIRP: www.icnirp.org