

**LINEE GUIDA PER LA LIMITAZIONE DELL'ESPOSIZIONE A CAMPI
ELETTRICI E MAGNETICI VARIABILI NEL TEMPO ED A CAMPI
ELETTROMAGNETICI (FINO A 300 GHz)**

Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP)^{1,2}

(Traduzione italiana di: *Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and
Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*. Health Physics 74: 494-522 (1998))

PREFAZIONE

Nel 1974, l'Associazione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni (International Radiation Protection Association, IRPA) formò un gruppo di lavoro sulle radiazioni non ionizzanti (Non Ionizing Radiation, NIR) che esaminasse i problemi che si presentavano nel campo della protezione dai diversi tipi di NIR. Durante il Congresso IRPA del 1977, a Parigi, questo gruppo di lavoro divenne il Comitato Internazionale per le Radiazioni Non Ionizzanti (International Non Ionizing Radiation Committee, INIRC).

In collaborazione con la Divisione di sanità ambientale dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), l'IRPA/INIRC sviluppò un certo numero di documenti riguardanti i criteri sanitari nei confronti delle NIR, nell'ambito del Programma per i Criteri di Sanità Ambientale (Environmental Health Criteria Programme), patrocinato dal Programma per l'Ambiente delle Nazioni Unite (United Nations Environment Programme, UNEP). Ogni documento comprende una panoramica delle caratteristiche fisiche, dei metodi e strumenti di misura, delle sorgenti e delle applicazioni delle NIR, assieme ad un'approfondita rassegna della letteratura sugli effetti biologici e ad una valutazione dei rischi sanitari dell'esposizione alle NIR. Questi documenti hanno fornito la base di dati scientifici per il successivo sviluppo di limiti di esposizione e di codici di comportamento nei riguardi delle NIR.

¹ Segreteria della Commissione ICNIRP: c/o Ing. Rüdiger Matthes, Bundesamt für Strahlenschutz, Institut für Strahlenhygiene, Ingolstädter Landstrasse 1, D-85764 Oberschleissheim, Germany

² Durante la preparazione di queste linee guida, la composizione della Commissione era la seguente: A. Ahlbom (Svezia), U. Berqvist (Svezia), J.H. Bernhardt, Presidente da maggio 1996 (Germania), J.C. Césarini (Francia), L.A. Court, fino a maggio 1996 (Francia), M. Grandolfo, Vicepresidente fino ad aprile 1996 (Italia), M. Hietanen, da maggio 1996 (Finlandia), A.F. McKinlay, Vicepresidente da maggio 1996 (Regno Unito), M.H. Repacholi, Presidente fino ad aprile 1996 (Australia), D.H. Sliney (USA), J.A.J. Stalwijk (USA), M.L. Swicord fino a maggio 1996 (USA), L.D.Szabo (Ungheria), M. Taki (Giappone), T.S. Tenforde (USA), H.P. Jammet (Membro emerito, deceduto), R. Matthes, Segretario scientifico (Germania).

Durante l'ottavo Congresso internazionale dell'IRPA (Montreal, 18-22 maggio 1992) fu costituita una nuova organizzazione scientifica indipendente, la Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, ICNIRP), che succedesse all'IRPA/INIRC. Compito della Commissione è indagare i rischi sanitari che potrebbero essere associati alle diverse forme di NIR, sviluppare linee guida internazionali per la definizione dei relativi limiti di esposizione e trattare ogni aspetto della protezione da queste radiazioni.

Gli effetti biologici riportati in letteratura come derivanti da esposizioni a campi elettrici e magnetici statici ed a frequenze estremamente basse (Extremely Low Frequency, ELF) sono stati oggetto di rassegna critica da parte dell'UNEP/WHO/IRPA (1984, 1987). Queste pubblicazioni, assieme ad altre tra cui UNEP/WHO/IRPA (1993) ed Allen et al. (1991) hanno fornito le basi logico-scientifiche per queste linee guida.

FINALITÀ E CAMPO DI APPLICAZIONE

L'obiettivo principale di questa pubblicazione è quello di stabilire delle linee guida per la limitazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici, in modo da fornire una protezione contro effetti conosciuti che siano nocivi per la salute. Un effetto nocivo danneggia la salute dell'individuo esposto o dei suoi figli; un effetto biologico, invece, può tradursi o non tradursi in un effetto nocivo.

In questa pubblicazione vengono descritti sia effetti diretti, sia effetti indiretti dei campi elettromagnetici; i primi sono il risultato di un'interazione diretta dei campi con il corpo umano, mentre i secondi presuppongono l'interazione con un oggetto che si trovi ad un potenziale elettrico diverso da quello del corpo. Vengono qui discussi i risultati di studi di laboratorio e di indagini epidemiologiche, i criteri fondamentali di protezione dalle esposizioni ed i livelli di riferimento adottati per una pratica valutazione del danno sanitario. Le linee guida qui presentate si applicano alle esposizioni per motivi professionali e a quelle del pubblico.

Linee guida per i campi elettromagnetici ad alte frequenza e per quelli a 50/60 Hz sono state pubblicate dall'IRPA/INIRC rispettivamente nel 1988 e nel 1990, ma vengono sostituite da quelle qui presentate, che coprono l'intero intervallo di frequenza dei campi elettromagnetici variabili nel tempo (fino a 300 GHz); i campi magnetici statici sono coperti dalle linee guida pubblicate dall'ICNIRP (1994). La Commissione riconosce che, nello stabilire dei limiti di esposizione, si debbono conciliare varie e diverse opinioni degli esperti. Si deve anche considerare la validità delle pubblicazioni scientifiche, e si devono compiere delle estrapolazioni dagli esperimenti su animali agli effetti sull'uomo. I limiti forniti in queste linee guida sono basati sui soli dati scientifici; le conoscenze attualmente disponibili

indicano che questi limiti forniscono in ogni caso una protezione adeguata dall'esposizione ai campi elettromagnetici variabili nel tempo. I valori raccomandati si dividono in due categorie:

- **Restrizioni di base:** Le restrizioni sull'esposizione a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo ed a campi elettromagnetici, che siano basate direttamente su effetti sanitari accertati, sono chiamate "restrizioni di base". Secondo la frequenza, le grandezze fisiche usate per specificare queste restrizioni sono la densità di corrente (**J**), il rateo di assorbimento specifico di energia (SAR) e la densità di potenza (**S**). Soltanto la densità di potenza in aria, esterna al corpo, può essere misurata direttamente per gli individui esposti.
- **Livelli di riferimento:** Questi livelli vengono forniti per una valutazione pratica dell'esposizione, al fine di stabilire se le restrizioni di base siano, verosimilmente, rispettate. Alcuni livelli di riferimento sono derivati dalle appropriate restrizioni di base mediante misure e/o tecniche numeriche, mentre altri tengono conto degli effetti di percezione o degli effetti indiretti dell'esposizione a campi elettromagnetici. Le grandezze fisiche derivate sono l'intensità del campo elettrico (**E**), l'intensità del campo magnetico (**H**), l'induzione magnetica (**B**), la densità di potenza (**S**) e la corrente che fluisce attraverso le estremità (I_L). Le grandezze usate per tener conto degli effetti di percezione e di altri effetti indiretti sono la corrente di contatto (I_C) e, per i campi pulsati, l'assorbimento specifico di energia (SA). In ogni situazione specifica, i valori misurati o calcolati di una qualsiasi di queste grandezze possono essere confrontati con il corrispondente livello di riferimento. Il rispetto dei livelli di riferimento garantisce quello della corrispondente restrizione di base. Se, al contrario, il valore misurato o calcolato supera il livello di riferimento, non ne consegue necessariamente che venga violata la restrizione di base. Comunque, ogni volta che viene superato un livello di riferimento, è necessario verificare il rispetto della corrispondente restrizione di base e stabilire se siano necessarie misure di protezione aggiuntive.

Queste linee guida non si occupano in modo diretto di standard di prodotto, termine con il quale si intende una limitazione delle emissioni in condizioni specifiche di prova; le linee guida non trattano neppure le tecniche di misura delle grandezze fisiche che caratterizzano i campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. Esaurienti descrizioni della strumentazione e delle tecniche di misura idonee per un'accurata determinazione di tali grandezze possono essere reperite altrove (NCRP 1981; IEEE 1992; NCRP 1993; DIN VDE 1995).

L'osservanza di queste linee guida non preclude necessariamente interferenze, o effetti di altro tipo, nei confronti di apparati medicali come impianti metallici, pacemaker e defibrillatori cardiaci, apparecchi acustici. Interferenze con i pacemaker possono verificarsi a

livelli inferiori a quelli di riferimento qui raccomandati. I consigli per evitare questi problemi esulano da questo documento, ma possono essere reperiti altrove (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Queste linee guida saranno periodicamente revisionate ed aggiornate in base alle più avanzate conoscenze sugli effetti sanitari dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici.

GRANDEZZE E UNITA' DI MISURA

Mentre i campi elettrici sono associati solamente alla presenza di cariche elettriche, i campi magnetici sono il risultato di movimenti di cariche (correnti elettriche). Un campo elettrico, **E**, esercita una forza su una carica elettrica ed è espresso in volt al metro (V/m). In modo analogo, un campo magnetico può esercitare delle forze fisiche su cariche elettriche, ma solo quando queste sono in moto. I campi elettrici e quelli magnetici possiedono sia un'intensità, sia una direzione (sono, cioè, dei vettori). Un campo magnetico può essere specificato in due modi, cioè attraverso l'induzione magnetica **B**, espressa in tesla (T), oppure attraverso l'intensità di campo magnetico **H**, espressa in ampere al metro (A/m). Le due grandezze sono legate dalla relazione:

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

dove μ è una costante di proporzionalità (detta permeabilità magnetica); nel vuoto, in aria ed in tutti i materiali non magnetici (compresi quelli biologici), μ ha il valore di $4\pi \times 10^{-7}$ in unità di henry al metro (H/m). Quindi, per descrivere un campo magnetico a fini protezionistici, è sufficiente specificare solo una delle due grandezze **B** o **H**.

Nella regione di campo lontano, il modello di onda piana rappresenta una buona approssimazione della propagazione del campo elettromagnetico. Le caratteristiche di un'onda piana sono:

- I fronti d'onda hanno una geometria planare;
- I vettori **E** ed **H** ed il vettore di propagazione dell'onda sono mutuamente perpendicolari;
- La fase dei vettori **E** ed **H** è la stessa, ed il rapporto E/H delle loro ampiezze è costante nello spazio. Nello spazio libero, tale rapporto è pari a 377 ohm, valore che costituisce l'impedenza caratteristica dello spazio libero;
- La densità di potenza **S**, cioè la potenza per unità di superficie perpendicolare alla direzione di propagazione, è legata ai campi elettrici e magnetici dall'espressione:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{H} = E^2/377 = 377 \cdot H^2 \quad (2)$$

La situazione nella regione di campo vicino è alquanto più complicata perché i massimi ed i minimi dei campi E ed H non si presentano negli stessi punti lungo la direzione di propagazione, come invece avviene in campo lontano. Nel campo vicino, la struttura del campo elettromagnetico può essere molto disomogenea e possono verificarsi notevoli scostamenti dal valore di 377 ohm dell'impedenza di onda piana; in altre parole, possono esservi campi quasi puramente elettrici in alcune regioni e quasi puramente magnetici in altre. Le esposizioni in campo vicino sono più difficili da specificare, perché si debbono misurare entrambi i campi E ed H e perché le distribuzioni dei campi sono più complicate; in questa situazione, la densità di potenza non è più una grandezza appropriata per esprimere le restrizioni di esposizione (come invece accade in campo lontano).

L'esposizione a campi elettromagnetici variabili nel tempo dà luogo a correnti elettriche all'interno del corpo e all'assorbimento di energia nei tessuti; entrambi gli effetti dipendono dai meccanismi di accoppiamento e dalla frequenza in gioco. Il campo elettrico interno e la corrispondente densità di corrente sono collegati dalla legge di Ohm:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

dove σ è la conducibilità elettrica del mezzo. Le grandezze dosimetriche utilizzate in queste linee guida, tenendo conto dei diversi intervalli di frequenza e delle diverse forme d'onda, sono le seguenti:

- Densità di corrente, \mathbf{J} , nell'intervallo di frequenze fino a 10 MHz;
- Corrente, I , nell'intervallo di frequenze fino a 110 MHz;
- Rateo di assorbimento specifico di energia, SAR, nell'intervallo di frequenze 100 kHz - 10 GHz;
- Assorbimento specifico di energia, SA, per campi pulsati nell'intervallo di frequenze 300 MHz - 10 GHz;
- Densità di potenza, \mathbf{S} , nell'intervallo di frequenze 10-30 GHz.

Un quadro generale delle grandezze fisiche e delle unità di misura utilizzate in queste linee guida è dato nella Tabella 1.

Tabella 1. Grandezze caratteristiche dei campi elettrici, magnetici e relative grandezze dosimetriche, con le corrispondenti unità SI

Grandezza fisica	Simbolo	
Conducibilità	σ	siemens al metro (S/m)
Corrente	I	ampere (A)
Densità di corrente	\mathbf{J}	ampere al metro quadro (A/m ²)
Frequenza	f	hertz (Hz)
Intensità di campo elettrico	\mathbf{E}	volt al metro (V/m)
Intensità di campo magnetico	\mathbf{H}	ampere al metro (A/m)
Induzione magnetica	\mathbf{B}	tesla (T)
Permeabilità magnetica	μ	henry al metro (H/m)
Permettività	ϵ	farad al metro (F/m)
Densità di potenza	\mathbf{S}	watt al metro quadro (W/m ²)
Assorbimento specifico di energia	SA	joule al chilogrammo (J/kg)
Rateo di assorbimento specifico di energia	SAR	watt al chilogrammo (W/kg)

BASI PER LA LIMITAZIONE DELLE ESPOSIZIONI

Queste linee guida per la limitazione delle esposizioni sono state sviluppate dopo un'accurata revisione di tutta la letteratura scientifica pubblicata. I criteri adottati nel corso della revisione sono stati appositamente studiati per valutare la credibilità dei vari risultati riportati (Repacholi e Stolwijk 1991; Repacholi e Cardis 1997); solo gli effetti accertati sono stati utilizzati come base per le restrizioni qui proposte. Si è giudicato che l'induzione di tumori per effetto di esposizioni a lungo termine a campi elettromagnetici non sia stata accertata e pertanto queste linee guida si basano sugli effetti sanitari immediati delle esposizioni a breve termine, come stimolazione dei nervi periferici e dei muscoli, scosse e ustioni derivanti dal contatto con oggetti conduttori o innalzamenti della temperatura dei tessuti in conseguenza dell'assorbimento di energia durante l'esposizione a campi elettromagnetici. Per ciò che riguarda potenziali effetti a lungo termine, come un aumento del rischio di cancro, l'ICNIRP ha concluso che i dati disponibili costituiscono una base insufficiente per stabilire delle restrizioni all'esposizione, anche se la ricerca epidemiologica ha fornito dei dati che suggeriscono, ma in modo non convincente, un'associazione tra

possibili effetti cancerogeni e l'esposizione a livelli di induzione magnetica a 50/60 Hz che sono molto inferiori a quelli raccomandati in queste linee guida.

Nel seguito vengono riassunti gli effetti *in vitro* di esposizioni di breve durata a campi ELF o a campi elettromagnetici modulati in ampiezza a frequenze estremamente basse. Sono state osservate alcune risposte transitorie di cellule e tessuti esposti a campi elettromagnetici, ma senza alcuna chiara relazione esposizione-risposta. Questi studi hanno un valore limitato per la valutazione di effetti sanitari, perché molte delle risposte osservate non sono state dimostrate *in vivo*. Si è ritenuto quindi che gli studi *in vitro*, da soli, non fornissero dati che potessero servire come base fondamentale per determinare eventuali effetti sanitari dei campi elettromagnetici.

MECCANISMI DI ACCOPPIAMENTO TRA I CAMPI ED IL CORPO

Esistono tre meccanismi di accoppiamento ben individuati, attraverso i quali i campi elettrici e magnetici variabili nel tempo interagiscono direttamente con la materia vivente (UNEP/WHO/IRPA 1993):

- accoppiamento con i campi elettrici a bassa frequenza;
- accoppiamento con i campi magnetici a bassa frequenza;
- assorbimento di energia elettromagnetica.

Accoppiamento con i campi elettrici a bassa frequenza

L'accoppiamento di campi elettrici variabili nel tempo con il corpo umano dà luogo ad un flusso di cariche elettriche (corrente elettrica), alla polarizzazione di cariche legate (formazione di dipoli elettrici) e al riorientamento di dipoli elettrici già presenti nei tessuti. L'importanza relativa di questi diversi effetti dipende dalle proprietà elettriche del corpo, cioè dalla conducibilità elettrica (che governa il flusso della corrente elettrica) e dalla permittività (che governa l'entità degli effetti di polarizzazione). La conducibilità e la permittività elettriche variano con il tipo di tessuto corporeo e dipendono anche dalla frequenza del campo applicato. I campi elettrici esterni al corpo inducono su questo una carica superficiale; quest'ultima dà luogo a correnti indotte nel corpo, la cui distribuzione dipende dalle condizioni di esposizione, dalle dimensioni e dalla forma del corpo e dalla sua posizione nel campo.

Accoppiamento con i campi magnetici a bassa frequenza

L'interazione fisica dei campi magnetici variabili nel tempo con il corpo umano dà luogo a campi elettrici indotti e alla circolazione di correnti elettriche. L'intensità del campo indotto e la densità di corrente sono proporzionali al raggio della spira, alla conducibilità elettrica del

tessuto nonché alla velocità di variazione ed al valore dell'induzione magnetica. Per una data intensità e una data frequenza del campo magnetico, i campi elettrici più intensi sono indotti laddove le dimensioni della spira sono maggiori. L'esatto percorso e l'intensità della corrente indotta in ciascuna parte del corpo dipende dalla conducibilità elettrica del tessuto.

Il corpo non è elettricamente omogeneo; tuttavia, la densità delle correnti indotte può essere calcolata usando modelli realistici dal punto di vista anatomico ed elettrico assieme a metodi di calcolo che presentano un alto grado di risoluzione anatomica.

Assorbimento di energia elettromagnetica

L'esposizione a campi elettrici e magnetici a bassa frequenza normalmente dà luogo ad un assorbimento di energia trascurabile e non produce alcun aumento misurabile di temperatura nel corpo. Invece, l'esposizione a campi elettromagnetici di frequenza superiore a circa 100 kHz può portare a significativi assorbimenti di energia e aumenti di temperatura. In generale, l'esposizione a un campo elettromagnetico uniforme (onda piana) dà luogo a una deposizione e ad una distribuzione dell'energia nel corpo molto disuniformi, che devono essere valutate mediante misure e calcoli dosimetrici.

Dal punto di vista dell'assorbimento di energia da parte del corpo umano, i campi elettromagnetici possono essere suddivisi in quattro intervalli di frequenza (Durney et al. 1985):

- frequenze da circa 100 kHz a circa 20 MHz, per le quali l'assorbimento nel tronco diminuisce rapidamente al decrescere della frequenza, mentre assorbimenti significativi possono prodursi nel collo e nelle gambe;
- frequenze nell'intervallo tra circa 20 MHz e 300 MHz, per le quali si può presentare un assorbimento relativamente alto nel corpo intero, ed uno ancora più elevato se si considerano gli effetti di risonanza in singole parti del corpo (ad esempio la testa);
- frequenze nell'intervallo da circa 300 MHz a qualche gigahertz, in corrispondenza delle quali si verifica un significativo e disuniforme assorbimento locale;
- frequenze superiori a circa 10 GHz, per le quali l'assorbimento di energia ha luogo soprattutto sulla superficie del corpo.

Nei tessuti, il SAR è proporzionale al quadrato dell'intensità del campo elettrico interno. Il SAR medio e la distribuzione del SAR possono essere calcolati o stimati da misure di laboratorio. I valori del SAR dipendono dai seguenti fattori:

- parametri che caratterizzano il campo incidente, cioè frequenza, intensità, polarizzazione e posizione relativa della sorgente e dell'oggetto (campo vicino o lontano);

- caratteristiche del corpo esposto, cioè dimensioni e geometria interna e esterna, nonché proprietà dielettriche dei vari tessuti;
- effetti di contatto a terra ed effetti di riflessione da parte di altri oggetti nel campo, vicino al corpo esposto.

Quando l'asse maggiore del corpo umano è parallelo al vettore campo elettrico, ed in condizioni di onda piana (cioè di esposizione in campo lontano), il SAR nel corpo intero raggiunge i suoi valori massimi. La quantità di energia assorbita dipende da diversi fattori, tra cui le dimensioni del corpo esposto. Il cosiddetto "uomo di riferimento tipico" (ICNIRP 1994), in assenza di contatto a terra, ha una frequenza di risonanza prossima ai 70 MHz. Per individui più alti la frequenza di risonanza è un po' più bassa, mentre nel caso di adulti di bassa statura, bambini o neonati e nel caso in posizione seduta può superare 100 MHz. I valori scelti come livelli di riferimento sono basati sull'andamento dell'assorbimento di energia con la frequenza; in individui che siano in contatto elettrico con il suolo le frequenze di risonanza sono più basse di circa un fattore 2 (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Per alcuni dispositivi che funzionano a frequenze superiori a 10 MHz (ad esempio riscaldatori dielettrici o telefoni mobili), l'esposizione può aver luogo in condizioni di campo vicino. In questa situazione, la dipendenza dell'assorbimento di energia dalla frequenza è molto diversa da quella descritta per le condizioni di campo lontano. Per alcuni apparati, come i telefoni mobili, i campi magnetici possono essere dominanti in certe condizioni di esposizione.

L'utilità, ai fini di una valutazione delle esposizioni in campo vicino, di modelli di calcolo numerico e di misure delle correnti indotte nel corpo e dei campi interni ai tessuti è stata dimostrata nel caso di telefoni mobili, walkie-talkie, trasmettitori radiotelevisivi, sistemi di comunicazione marittima e riscaldatori ad induzione (Kuster e Balzano 1992; Dimbylow e Mann 1994; Jokela et al. 1994; Gandhi 1995; Tofani et al. 1995). L'importanza di questi studi risiede nel fatto che essi hanno mostrato che l'esposizione in campo vicino può dar luogo ad elevati valori di SAR locale (ad esempio nella testa, nei polsi e nelle caviglie) e che sia il SAR mediato sull'intero corpo, sia quello locale, dipendono fortemente dalla distanza che separa la sorgente ad alta frequenza dal corpo. Infine, è da notare che i dati di SAR ottenuti dalle misure sono in accordo con quelli ottenuti da calcoli su modelli numerici. Il SAR mediato sull'intero corpo e quello locale sono grandezze appropriate per confrontare gli effetti osservati in diverse condizioni di esposizione. Una più dettagliata discussione sul SAR può essere reperita altrove (UNEP/WHO/IRPA 1993).

A frequenze superiori a circa 10 GHz, lo spessore di penetrazione dei campi nei tessuti è piccolo, ed il SAR non è una buona grandezza per valutare l'energia assorbita; una grandezza dosimetrica più appropriata è la densità di energia incidente (espressa in W/m^2).

MECCANISMI DI ACCOPPIAMENTO INDIRETTO

Esistono due meccanismi di accoppiamento indiretto:

- le correnti di contatto che si manifestano quando il corpo umano viene in contatto con un oggetto a diverso potenziale elettrico (cioè quando il corpo o l'oggetto sono caricati da un campo elettromagnetico);
- l'accoppiamento del campo elettromagnetico con dispositivi elettromedicali impiantati o portati dal soggetto esposto (questo caso non è considerato nel presente documento).

La carica di un oggetto conduttore da parte di un campo elettromagnetico fa sì che delle correnti elettriche attraversino un corpo umano che sia in contatto con quell'oggetto (Tenforde e Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993). L'intensità e la distribuzione spaziale di queste correnti dipende dalla frequenza, dalle dimensioni dell'oggetto, dalla taglia della persona e dall'area di contatto; scariche transitorie, o scosse, possono verificarsi quando un individuo ed un oggetto conduttore esposti ad un campo intenso vengono a trovarsi in stretta vicinanza.

BASI BIOLOGICHE PER LA LIMITAZIONE DELLE ESPOSIZIONI (FINO A 100 kHz)

I paragrafi che seguono forniscono una panoramica generale della letteratura scientifica significativa riguardo agli effetti biologici e sanitari dei campi elettrici e magnetici di frequenza fino a 10 kHz, cioè nell'intervallo in cui il principale meccanismo di interazione è l'induzione di correnti nei tessuti. Per quanto riguarda l'intervallo di frequenze tra 0 (escluso) e 1 Hz, le basi biologiche per la definizione delle restrizioni di base e dei livelli di riferimento sono state fornite altrove dall'ICNIRP (1994). Sono disponibili anche altre rassegne, più dettagliate (NRPB 1991; UNEP/WHO/IRPA 1993; Blank 1995; NAS 1996; Polk e Postow 1996; Ueno 1996).

Effetti diretti dei campi elettrici e magnetici

Studi epidemiologici. Sono state pubblicate numerose rassegne degli studi epidemiologici sul rischio di cancro in relazione all'esposizione a campi a frequenza industriale (NRPB 1992, 1993, 1994b; ORAU 1992; Savitz 1993; Heath 1996; Stevens e Davis 1996; Tenforde 1996; NAS 1996). Sono state pubblicate analoghe rassegne anche sul rischio di effetti sulla riproduzione associati all'esposizione a campi elettromagnetici (Chernoff et al. 1992; Brent et al. 1993; Shaw e Croen 1993; NAS 1996; Tenforde 1996).

Effetti sulla riproduzione. Gli studi epidemiologici sull'esito di gravidanze non hanno fornito nessuna evidenza convincente di effetti negativi sulla riproduzione in donne che lavoravano con videotermini (Berqvist 1993; Shaw e Croen 1993; NRPB 1994a; Tenforde 1996). Ad esempio, le metanalisi effettuate combinando diversi studi che avevano confrontato donne in gravidanza che usavano videotermini con altre che non li usavano non hanno rivelato nessun eccesso di rischio di aborto spontaneo o di malformazioni (Shaw e Croen 1993). Altri due studi si sono concentrati sull'effettiva misura dei campi elettrici e magnetici generati dai videotermini; uno ha suggerito un'associazione tra campi magnetici ELF e l'aborto (Lindbohm et al. 1992), mentre l'altro non ha trovato alcuna associazione del genere (Schnorr et al. 1991). Uno studio prospettico che comprendeva un gran numero di casi e presentava un alto tasso di partecipazione ed un'accurata valutazione delle esposizioni (Bracken et al. 1995) ha concluso che né il peso alla nascita né il ritmo di crescita intrauterina erano legati ad alcuna esposizione a campi ELF. Gli effetti negativi al momento del parto non risultavano associati a livelli più alti di esposizione. Le misure di esposizione comprendevano il carico potenziale di corrente delle linee elettriche esterne alle abitazioni, misure personali dell'esposizione sull'arco di 7 giorni, misure continue per 24 ore nelle case e risposte a domande sull'uso di coperte elettriche, letti ad acqua calda e videotermini. La maggior parte delle informazioni attualmente disponibili non forniscono sostegno all'ipotesi di un'associazione tra l'esposizione ai videotermini per motivi professionali ed effetti negativi sulla riproduzione (NRPB 1994a; Tenforde 1996).

Studi su cancro ed esposizioni in ambiente residenziale. Esistono notevoli controversie sulla possibilità di un legame tra l'esposizione a campi magnetici ELF ed un aumento del rischio di cancro. Sono apparsi diversi lavori su questo argomento, da quando Wertheimer e Leeper (1979) segnalavano un'associazione tra la mortalità per cancro infantile e la vicinanza delle case a linee di distribuzione elettrica, misurata attraverso ciò che gli autori classificarono come configurazione di alta corrente. L'ipotesi fondamentale che emergeva dallo studio originale era che il contributo delle sorgenti esterne, come le linee elettriche, ai campi magnetici a 50/60 Hz presenti negli ambienti residenziali potesse essere legato ad un aumento del rischio di cancro infantile.

Sono stati finora condotti oltre una dozzina di studi su tumori infantili ed esposizione ai campi magnetici prodotti all'interno delle abitazioni da linee elettriche vicine. Questi studi hanno stimato l'esposizione ai campi magnetici attraverso misure di breve durata oppure sulla base della distanza tra l'abitazione e la linea e, nella maggior parte dei casi, della configurazione della linea; alcuni studi hanno anche tenuto conto del carico sulla linea. I risultati relativi alla leucemia sono i più coerenti. Su 13 studi (Wertheimer e Leeper 1979; Fulton et al. 1980; Myers et al. 1985; Tomeniuss 1986; Savitz et al. 1988; Coleman et al.

1989; London et al. 1991; Feychting e Ahlbom 1993; Olsen et al. 1993; Verkasalo et al. 1995; Michaelis et al. 1997; Linet et al. 1997; Tynes e Haldorsen 1997) tutti, salvo cinque, hanno riportato stime di rischi relativi comprese tra 1,5 e 3,0.

Sia le misure dirette del campo magnetico, sia le stime basate sulla vicinanza delle linee sono indicatori grezzi dell'esposizione che si è verificata in momenti diversi prima che i casi di leucemia fossero diagnosticati, e non è chiaro quale di questi due metodi fornisca la stima più valida. Anche se i dati suggeriscono che i campi elettromagnetici potrebbero effettivamente svolgere un ruolo nell'associazione con il rischio di leucemia, vi è incertezza a causa del piccolo numero dei soggetti studiati e per la correlazione tra il campo magnetico e la vicinanza alle linee elettriche (Feychting et al. 1996).

Poco si sa sull'eziologia della maggior parte dei tumori infantili, ma diversi tentativi di controllare potenziali fattori di confondimento, come lo stato socioeconomico o l'inquinamento dell'aria dovuto ai gas di scarico dei veicoli, hanno avuto poco effetto sui risultati. Gli studi che hanno esaminato l'uso di elettrodomestici (soprattutto coperte elettriche) in relazione al cancro o ad altri effetti sulla salute hanno fornito in generale risultati negativi (Preston-Martin et al. 1988; Verreault et al. 1990; Vena et al. 1991, 1994; Li et al. 1995). Solo due studi caso-controllo hanno valutato l'uso di elettrodomestici in relazione alla leucemia infantile. Uno è stato condotto a Denver (Savitz et al. 1990) ed ha suggerito un legame con l'uso di coperte elettriche prima della nascita; l'altro, effettuato a Los Angeles (London et al. 1991) ha trovato un'associazione tra la leucemia e l'uso, da parte dei bambini, di asciugacapelli e televisori in bianco e nero.

Il fatto che i risultati per la leucemia basati sulla vicinanza delle case alle linee elettriche siano relativamente coerenti ha indotto un Comitato dell'Accademia Nazionale delle Scienze degli Stati Uniti a concludere che i bambini che vivono vicino ad elettrodotti sembrano avere un maggior rischio di leucemia (NAS 1996). A causa dei piccoli numeri, gli intervalli di confidenza dei singoli studi sono ampi; presi nel loro complesso, tuttavia, i risultati sono coerenti, con un rischio relativo complessivo di 1,5 (NAS 1996). Al contrario, le misure momentanee dei campi magnetici in alcuni degli studi non hanno fornito alcuna evidenza di un'associazione tra l'esposizione a campi a 50/60 Hz ed il rischio di leucemia o di qualunque altra forma di cancro infantile. Il Comitato non è rimasto convinto che questo aumento di rischio fosse spiegato dall'esposizione ai campi magnetici, perché non vi era nessuna apparente associazione quando l'esposizione veniva stimata attraverso la lettura di misuratori di campo magnetico all'interno delle abitazioni dei casi di leucemia e dei controlli. È stato suggerito che la spiegazione possa trovarsi nel confondimento dovuto a qualche sconosciuto fattore di rischio per la leucemia, che sia associato alla residenza in vicinanza di elettrodotti; tuttavia, non è stato proposto nessun candidato plausibile.

Dopo che il comitato del NAS aveva completato la sua revisione, sono stati pubblicati i risultati di uno studio condotto in Norvegia (Tynes e Haldorsen 1997). Questo studio includeva 500 casi di tutti i tumori infantili. L'esposizione di ogni individuo era stata stimata attraverso il calcolo del campo magnetico prodotto nell'abitazione dalle linee elettriche circostanti, valutato come media su un intero anno. Non è stata osservata nessuna associazione tra il rischio di leucemia ed il campo magnetico nella residenza al momento della diagnosi. Anche la distanza dall'elettrodotto, l'esposizione durante il primo anno di vita, l'esposizione della madre all'epoca del concepimento ed un'esposizione più alta del valore mediano dei controlli non mostravano alcuna associazione con leucemie, tumori cerebrali o linfomi. Comunque, il numero di casi esposti era piccolo.

Anche uno studio condotto in Germania (Michaelis et al. 1997) è stato pubblicato dopo il completamento dell'analisi del NAS. Si tratta di uno studio caso-controllo sulla leucemia infantile, basato su 129 casi e 328 controlli. La valutazione delle esposizioni comprendeva misure del campo magnetico, estese per 24 ore, nella camera da letto del bambino, nell'abitazione in cui questi aveva vissuto più a lungo prima della data della diagnosi. Per induzioni magnetiche superiori a $0,2 \mu\text{T}$ è stato osservato un rischio relativo elevato, pari a 3,2.

Un ampio studio caso-controllo condotto negli Stati Uniti per verificare se la leucemia infantile linfoblastica acuta fosse associata con l'esposizione a campi magnetici a 60 Hz è stato pubblicato da Linet et al. (1997). Le esposizioni ai campi magnetici sono state determinate mediante misure nella camera da letto mediate su un periodo di 24 ore e misure della durata di 30 secondi in varie altre stanze. Le misure sono state effettuate nelle case in cui ogni bambino aveva vissuto il 70% o più degli ultimi 5 anni precedenti la diagnosi, o per un periodo corrispondente per quanto riguardava i controlli. Sono stati anche determinati i codici dei cavi nei casi di coppie caso-controllo con residenza stabile, cioè in cui nessuno dei due aveva cambiato residenza negli anni precedenti la diagnosi. Il numero di coppie per cui questa valutazione è stata possibile era pari a 416. Non è stata trovata alcuna indicazione di un'associazione tra codice dei cavi e leucemia. Per quanto riguarda le misure dei campi magnetici, i risultati sono più complessi. Scegliendo un valore di discriminazione pari a $0,2 \mu\text{T}$, le analisi con dati accoppiati e non accoppiati hanno fornito una stima del rischio relativo pari a 1,2 e 1,5, rispettivamente. Se si sceglie un valore discriminante di $0,3 \mu\text{T}$, il rischio relativo per dati non accoppiati risulta pari a 1,7, sulla base di 45 casi. Quindi, i risultati basati sulle misure suggeriscono un'associazione positiva tra campi magnetici e rischio di leucemia. Questo studio è tra i più importanti per la sua dimensione, per il numero di soggetti compresi nelle categorie ad alta esposizione, per il momento in cui le misure sono state effettuate rispetto al manifestarsi della leucemia (generalmente entro 24 mesi dalla diagnosi), per le altre misure utilizzate per ricavare i dati di esposizione e per la qualità dell'analisi, che teneva

conto di molteplici fattori di confondimento. Tra i possibili punti deboli, vi sono la procedura per la selezione dei controlli, i tassi di partecipazione ed i metodi usati per l'analisi statistica dei dati. Gli strumenti impiegati per le misure non tenevano conto dei transitori, né delle armoniche superiori. La dimensione di questo studio è tale che i suoi risultati, combinati con quelli degli studi precedenti, indebolisce sensibilmente (anche senza necessariamente invalidarla) l'associazione con i dati dei codici dei cavi.

In questi anni, è stato manifestato un notevole interesse anche per l'ipotesi di una possibile associazione tra l'esposizione a campi magnetici ed il tumore cerebrale nei bambini, che costituisce, per frequenza, la seconda forma di tumore infantile. Tre recenti studi, completati dopo la revisione del NAS, non hanno fornito sostegno ad un'associazione tra tumori cerebrali e l'esposizione dei bambini a campi magnetici generati da elettrodotti o da coperte elettriche, né se tali campi erano stimati mediante calcoli, né se lo erano attraverso il codice dei cavi (Guénel et al. 1996; Preston-Martin et al. 1996a; Tynes e Haldorsen 1997).

I dati relativi a tumori negli adulti in relazione all'esposizione a campi magnetici in ambienti residenziali sono scarsi (NAS 1996). I pochi studi pubblicati sino ad oggi (Wertheimer e Leeper 1979; McDowall 1985; Seversen et al. 1988; Coleman et al. 1989; Schreiber et al. 1993; Feychting e Ahlbom 1994; Li et al. 1996; Verkasalo 1996; Verkasalo et al. 1996) risentono tutti, in qualche misura, di una limitazione nel numero dei casi e non consentono di trarre alcuna conclusione.

E' opinione dell'ICNIRP che i risultati della ricerca epidemiologica sull'esposizione ai campi elettromagnetici ed il cancro, compresa la leucemia infantile, non siano abbastanza consistenti, in assenza di un supporto da parte della ricerca sperimentale, da costituire una base scientifica per delle linee guida di esposizione. Questa valutazione è in accordo anche con altre analisi recenti (NRPB 1992, 1994b; NAS 1996; CRP 1997).

Studi relativi a esposizioni professionali. Sono stati condotti numerosi studi volti a stabilire eventuali collegamenti tra l'esposizione a campi ELF ed il rischio di cancro in lavoratori occupati nel settore elettrico. Il primo studio di questo genere (Milham 1992) sfruttava un archivio di certificati di morte che includeva sia la qualifica professionale, sia informazioni sulla mortalità per tumore. Come metodo grezzo di valutazione dell'esposizione, Milham classificò le qualifiche professionali secondo la presunta esposizione a campi magnetici e trovò un aumento del rischio di leucemia tra i lavoratori "elettrici". Studi successivi (Savitz e Ahlbom 1994) fecero uso di archivi analoghi; i tipi di cancro per cui sono stati osservati tassi elevati variano da uno studio all'altro, in particolare se si distinguono i diversi sottotipi di tumori. Sono stati segnalati aumenti di rischio per vari tipi di leucemia e di tumori del sistema nervoso nonché, in pochi casi, di tumore al seno sia maschile sia femminile (Demers et al. 1991; Matanoski et al. 1991; Tynes et al. 1992; Loomis

et al. 1994). Oltre a fornire risultati in una certa misura incoerenti, questi studi risentivano di una valutazione molto rozza delle esposizioni e non tenevano in adeguata considerazione fattori di confondimento come l'esposizione a solventi a base di benzene nei posti di lavoro.

Tre recenti studi hanno tentato di superare le carenze di quelli precedenti, misurando l'esposizione a campi ELF sui posti di lavoro e tenendo conto della durata delle esposizioni (Floderus et al. 1993; Thériault et al. 1994; Savitz e Loomis 1995). E' stato osservato un aumento del rischio di cancro nei soggetti esposti, ma il tipo di cancro per cui ciò si verificava variava da studio a studio. Floderus et al. (1993) hanno trovato un'associazione significativa con la leucemia; anche Thériault et al. (1994) hanno trovato un'associazione, ma debole e non significativa, mentre nessuna associazione è stata osservata da Savitz e Loomis (1995). Le incoerenze erano anche maggiori per i sottotipi di leucemia, ma i numeri in questo tipo di analisi erano bassi. Per quanto riguarda i tumori del sistema nervoso, Floderus et al. (1993) hanno trovato un eccesso di glioblastoma (astrocitoma III-IV), mentre i risultati sia di Thériault et al. (1994), sia di Savitz e Loomis (1995) suggeriscono solo un aumento di glioma (astrocitoma I-II). Se veramente esistesse una connessione tra l'esposizione professionale a campi magnetici ed il cancro, ci si sarebbe dovuto attendere una maggiore coerenza e delle associazioni più forti in questi studi recenti, che sono basati su dati di esposizione più sofisticati.

I ricercatori hanno analizzato anche la possibilità che i campi elettrici ELF siano legati ai tumori. Le tre compagnie elettriche che hanno partecipato allo studio di Thériault et al. (1994) sui campi magnetici hanno anche analizzato i dati relativi ai campi elettrici. E' stato segnalato che, in una delle compagnie, i lavoratori colpiti da leucemia erano stati probabilmente esposti a campi elettrici più dei lavoratori assunti come controlli. Inoltre, l'associazione era più forte in un gruppo che era stato esposto a una combinazione di alti campi elettrici e magnetici (Miller et al. 1996). In una seconda compagnia, i ricercatori non hanno registrato nessuna associazione tra la leucemia e l'esposizione cumulativa a campi elettrici sul posto di lavoro, ma alcune delle analisi hanno mostrato un'associazione con i tumori cerebrali (Guénel et al. 1996). E' stata anche segnalata un'associazione con il cancro al colon, anche se in altri studi su ampie popolazioni di lavoratori delle compagnie elettriche questo tipo di cancro non è stato trovato. Nella terza compagnia elettrica, non è stata osservata nessuna associazione tra campi elettrici e tumori cerebrali o leucemie, ma questo studio era più piccolo e meno adatto a rilevare piccole variazioni (Baris et al. 1996).

Recentemente, è stata suggerita un'associazione tra il morbo di Alzheimer e l'esposizione professionale a campi magnetici (Sobel e Davanipour 1996), ma questo effetto non è stato confermato.

Studi di laboratorio. I paragrafi che seguono presentano una rassegna ed una valutazione critica degli studi di laboratorio sugli effetti biologici dei campi elettrici e magnetici di frequenze inferiori a 100 kHz. Vengono discussi separatamente i risultati ottenuti su volontari esposti in condizioni controllate e gli studi di laboratorio su sistemi cellulari, su tessuti e su animali.

Studi su volontari. L'esposizione a campi elettrici variabili può dar luogo ad una percezione del campo, come effetto della carica elettrica alternativamente indotta sulla superficie del corpo, che a sua volta fa vibrare i peli cutanei. Diversi studi hanno mostrato che la maggior parte delle persone può percepire campi elettrici a 50/60 Hz superiori a 20 kV/m e che una piccola minoranza è in grado di percepire campi inferiori a 5 kV/m (UNEP/WHO/IRPA 1984; Tenforde 1991).

Piccole variazioni delle funzioni cardiache si sono manifestate in volontari esposti a una combinazione di campi elettrici e magnetici (9 kV/m, 20 μ T) a 60 Hz (Cook et al. 1992; Graham et al. 1994). Il battito cardiaco a riposo risultava ridotto in misura lieve (di 3-5 battiti al minuto), ma significativa, durante l'esposizione o immediatamente dopo. Questa risposta era assente nel caso di esposizioni a campi più intensi (12 kV/m, 30 μ T) o più deboli (6 kV/m, 10 μ T) ed era ridotta se il soggetto era mentalmente all'erta. Nessuno dei soggetti esaminati in questi studi era in grado di rilevare la presenza dei campi, e nessun altro effetto è stato osservato in modo coerente in un'ampia serie di prove sensoriali o percettive.

Nessun effetto negativo di natura fisiologica o psicologica è stato osservato in studi di laboratorio su persone esposte a campi a 50 Hz di intensità tra 2 e 5 mT (Sanders et al. 1982; Ruppe et al. 1995). Negli studi di Sanders et al. (1982) e di Graham et al. (1994) non sono state osservate variazioni chimiche nel sangue, né alterazioni nella conta dei globuli rossi, nei gas del sangue, nei livelli di lattato, nell'elettrocardiogramma, nell'elettroencefalogramma, nella temperatura cutanea e nei livelli ormonali. Recenti studi su volontari non sono riusciti a dimostrare effetti dell'esposizione a campi magnetici a 60 Hz sul livello notturno di melatonina nel sangue (Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996).

Campi magnetici ELF sufficientemente intensi possono provocare direttamente la stimolazione dei nervi periferici e dei tessuti muscolari e brevi impulsi di campo magnetico sono stati usati in campo clinico per stimolare i nervi nelle estremità, al fine di verificare l'integrità dei percorsi neurali. Stimolazioni dei nervi periferici e dei muscoli sono state anche segnalate in volontari esposti a gradienti di campo magnetico a 1 kHz prodotti da sistemi sperimentali di immagine mediante risonanza magnetica. I valori di soglia in termini di induzione magnetica erano di diversi millitesla, e le corrispondenti densità di corrente indotta dai campi pulsati prodotti dalla rapida commutazione dei gradienti erano di circa 1 A/m². Campi magnetici variabili che inducano densità di corrente superiori a 1 A/m² nei tessuti

portano all'eccitazione neurale e sono in grado di produrre effetti biologici irreversibili come la fibrillazione cardiaca (Tenforde e Kaune 1987; Reilly 1989). In uno studio che prevedeva la registrazione dei segnali elettromiografici in un braccio umano (Polson et al. 1982) si è trovato che occorre un campo pulsato con valori dB/dt superiori a 10^4 T/s per stimolare il tratto mediano del nervo. Si è anche scoperto che la durata dello stimolo magnetico è un parametro importante per la stimolazione dei tessuti eccitabili.

Da studi sulle funzioni visive e mentali in volontari si possono derivare soglie inferiori a 100 mA/m^2 . Sono state segnalate variazioni del tempo di latenza delle risposte in complicati test di ragionamento svolti da volontari esposti a deboli correnti elettriche a frequenza industriale, che venivano fatte circolare attraverso elettrodi collegati alla testa e alle spalle; i valori della densità di corrente erano stimati tra 10 e 40 mA/m^2 (Stollery 1986, 1987). Infine, molti studi hanno segnalato che i volontari provavano deboli sensazioni di bagliori visivi, noti come fosfeni magnetici, durante l'esposizione a campi magnetici ELF superiori a 3-5 mT (Silny 1986). Questi effetti visivi possono anche essere indotti dall'applicazione diretta di deboli correnti elettriche nella testa. A 20 Hz, si è stimato che densità di corrente dell'ordine di 10 mA/m^2 nella retina costituiscano la soglia per l'induzione di fosfeni; questo valore è superiore alle tipiche densità di corrente endogene nei tessuti elettricamente eccitabili. Soglie più elevate sono state osservate a frequenze sia inferiori, sia superiori (Lövsund et al. 1980; Tenforde 1990).

Sono stati condotti studi a 50 Hz su potenziali evocati visivamente; questi studi hanno mostrato per tali effetti delle soglie pari, in termini di induzione magnetica, a 60 mT (Silny 1986). Coerentemente con questo risultato, non hanno ottenuto effetti sui potenziali evocati visivamente né Sanders et al. (1982) usando un campo di 5 mT a 50 Hz, né Graham et al. usando una combinazione di campi elettrici e magnetici a 60 Hz, di intensità fino a 12 kV/m e 30 μT rispettivamente.

Studi su sistemi cellulari e su animali. Nonostante siano stati effettuati numerosi studi per rivelare effetti biologici dei campi elettrici e magnetici ELF, solo poche ricerche sistematiche hanno individuato delle soglie caratteristiche, in termini di intensità dei campi, oltre le quali si producessero significative perturbazioni delle funzioni biologiche. E' ben accertato che una corrente elettrica indotta può stimolare direttamente i tessuti nervosi e muscolari una volta che siano stati superati determinati livelli di soglia della densità di corrente (UNEP/WHO/IRPA 1987; Bernhardt 1992; Tenforde 1996). Densità di corrente non in grado di stimolare in modo diretto i tessuti eccitabili possono comunque agire sull'attività elettrica in corso ed influenzare l'eccitabilità neuronale. E' noto che l'attività del sistema nervoso centrale è sensibile ai campi elettrici endogeni generati dall'azione delle cellule nervose adiacenti, a livelli inferiori a quelli necessari per la stimolazione diretta.

Molti studi hanno suggerito che la trasduzione di segnali elettrici nella regione delle ELF comporta delle interazioni con la membrana cellulare, portando a risposte biochimiche del citoplasma che, a loro volta, comportano variazioni nello stato funzionale e proliferativo delle cellule. Da semplici modelli del comportamento di singole cellule in deboli campi magnetici è stato calcolato che un segnale elettrico nel campo extracellulare deve essere superiore a circa 10-100 mV/m (corrispondente a una densità di corrente indotta di circa 2-20 mA/m²) per superare il livello del rumore endogeno, di origine fisica e biologica, nelle membrane cellulari (Astumian et al. 1995). I dati esistenti suggeriscono anche che diverse proprietà strutturali e funzionali delle membrane possono essere alterate in risposta a campi ELF indotti di intensità pari o inferiore a 100 V/m (Sienkiewicz et al. 1991; Tenforde 1993). Sono state segnalate alterazioni del sistema neuroendocrino (ad esempio soppressione della sintesi notturna di melatonina) come risposta a campi elettrici indotti di 10 mV/m o inferiori, che corrispondono a densità di corrente indotta di circa 2 mA/m² o meno (Tenforde 1991, 1996). Non vi è comunque nessuna chiara evidenza che queste interazioni biologiche dei campi a bassa frequenza portino a effetti negativi per la salute.

E' stato mostrato che campi elettrici indotti e correnti indotte, a livelli superiori a quelli dei segnali bioelettrici presenti nei tessuti, provocano numerosi effetti fisiologici la cui gravità aumenta all'aumentare della densità di corrente indotta (Bernhardt 1979; Tenforde 1996). Nell'intervallo di densità di corrente compreso tra 10 e 100 mA/m², sono stati segnalati effetti sui tessuti e variazioni nelle funzioni cognitive del cervello (NRPB 1992; NAS 1996). Quando la densità di corrente supera valori da 100 a diverse centinaia di mA/m², a frequenze comprese tra circa 10 Hz e 1 kHz, vengono oltrepassate le soglie per la stimolazione neuronale e neuromuscolare. Il valore di soglia per la densità di corrente aumenta progressivamente a frequenze al di sotto di alcuni hertz e al di sopra di 1 kHz. Infine, a densità di corrente estremamente elevate, superiori a 1 A/m², possono verificarsi effetti gravi e potenzialmente fatali, come extrasistole cardiache, fibrillazione ventricolare, tetano muscolare e deficienza respiratoria. La gravità degli effetti sui tessuti e la probabilità che questi siano irreversibili aumenta nel caso di esposizioni croniche a densità di correnti indotte superiori ad un livello tra 10 e 100 mA/m². Sembra quindi opportuno limitare l'esposizione a campi tali da indurre densità di corrente non superiori a 10 mA/m² nella testa, nel collo e nel tronco, a frequenze che vanno da pochi hertz a 1 kHz.

E' stato postulato che forze e momenti di torsione oscillatori, esercitati su particelle di magnetite di origine biologica nei tessuti cerebrali, possano fornire un meccanismo per la trasduzione di segnali prodotti da campi magnetici ELF. Kirshvink et al. (1992b) hanno proposto un modello in cui le forze magnetiche ELF sono viste come in grado di produrre l'apertura e la chiusura, nelle membrane, dei canali ionici sensibili alla pressione. Tuttavia, una difficoltà di questo modello consiste nella rarità di molecole di magnetite rispetto al

numero di cellule nei tessuti cerebrali. Per esempio, è stato riportato che i tessuti cerebrali nell'uomo contengono pochi milioni di particelle di magnetite per grammo, distribuite in 10^5 agglomerati di 5-10 particelle ciascuno (Kirshvink et al. 1992a). Il numero di cellule nei tessuti cerebrali supera quindi quello delle particelle di magnetite di circa un fattore 100, ed è difficile immaginare come le interazioni oscillatorie di natura magnetomeccanica di un campo ELF con i cristalli di magnetite possa influenzare un numero significativo di canali ionici nel cervello. Occorrono chiaramente ulteriori studi per spiegare il ruolo biologico della magnetite ed i possibili meccanismi attraverso cui questo minerale potrebbe svolgere un ruolo nella trasduzione di segnali magnetici ELF.

Un punto importante nella valutazione degli effetti dei campi elettromagnetici è quello dei possibili effetti teratogeni e sullo sviluppo. Sulla base dei dati scientifici pubblicati, è poco verosimile che i campi elettromagnetici a bassa frequenza abbiano effetti negativi sullo sviluppo embrionale e postnatale dei mammiferi (Chernoff et al. 1992; Brent et al. 1993; Tenforde 1996). Inoltre, i dati attualmente disponibili indicano come poco verosimile che si manifestino mutazioni somatiche ed effetti genetici in conseguenza di esposizioni a campi magnetici di frequenze inferiori a 100 kHz (Criland 1993; Sienkiewicz et al. 1993).

La letteratura riporta numerose segnalazioni di effetti *in vitro* dei campi ELF sulle proprietà delle membrane cellulari (trasporto ionico ed interazione dei mitogeni con i recettori alla superficie della cellula) e variazioni nelle funzioni cellulari e nelle proprietà di crescita (ad esempio aumento della proliferazione e alterazioni nel metabolismo, espressione genica, biosintesi delle proteine ed attività enzimatica) (Criland 1993; Sienkiewicz et al. 1993; Tenforde 1991, 1992, 1993, 1996). Una notevole attenzione si è concentrata sugli effetti dei campi a bassa frequenza sul trasporto dello ione Ca^{++} attraverso le membrane cellulari e sulla concentrazione intracellulare di questo ione (Walleczek e Liburdy 1990; Liburdy 1992; Walleczek 1992), sulla sintesi di RNA messaggero e di proteine (Goodman et al. 1983; Goodman e Henderson 1988, 1991; Greene et al. 1991; Phillips et al. 1992), e sull'attività di enzimi come l'ornitina decarbossilasi (ODC) che sono legati alla proliferazione cellulare e alla promozione di tumori (Byus et al. 1987, 1988, Livovitz et al. 1991, 1993). Tuttavia, prima che queste osservazioni possano essere utilizzate per definire dei limiti di esposizione, è essenziale accertare sia la loro riproducibilità, sia la loro rilevanza per il cancro e per altri effetti negativi sulla salute. L'importanza di questo punto è evidenziata dal fatto che vi sono state difficoltà nella replicazione di alcune osservazioni fondamentali di effetti dei campi sull'espressione genica e sulla sintesi proteica (Lacy-Hulbert et al. 1995; Saffer e Thurston 1995). Gli autori di questi studi di replicazione hanno identificato alcune falle nelle indagini precedenti, tra cui un controllo carente della temperatura, una mancanza di appropriati campioni di controllo interno, ed un uso di tecniche a bassa risoluzione per l'analisi della produzione di trascrizioni da parte del RNA messaggero. L'aumento temporaneo di attività

OCD che è stato segnalato in risposta all'esposizione è di piccola entità e non è associato ad una sintesi *de novo* dell'enzima (come avviene invece per agenti chimici promotori dei tumori, come gli esteri forbolici) (Byus et al. 1988). Gli studi relativi all'OCD sono stati condotti soprattutto su preparazioni cellulari; occorrono ulteriori ricerche per mostrare se vi sono effetti sull'OCD *in vivo*, anche se esiste un lavoro che suggerisce degli effetti sull'OCD in un saggio di promozione del tumore mammario nei ratti (Mevisen et al. 1995).

Non esiste alcuna evidenza che i campi ELF alterino la struttura del DNA e della cromatina, e non è previsto nessun conseguente effetto di mutazione o di trasformazione neoplastica. Ciò è confortato dai risultati di studi di laboratorio che erano stati progettati per rivelare danni al DNA e ai cromosomi, casi di mutazione e aumenti nella frequenza di trasformazioni come conseguenza di esposizioni a campi ELF (NRPB 1992; Murphy et al. 1993; McCann et al. 1993; Tenforde 1996). La mancanza di effetti sulla struttura cromosomica suggerisce che i campi ELF, nel caso in cui abbiano qualche effetto sul processo di cancerogenesi, agiscano più verosimilmente come promotori che come iniziatori, aumentando la proliferazione di cellule geneticamente alterate piuttosto che provocare la lesione iniziale nel DNA o nella cromatina. Un'influenza sullo sviluppo dei tumori potrebbe essere mediata da effetti epigenetici di questi campi, come alterazioni nei percorsi dei segnali cellulari o nell'espressione genica. Gli studi recenti si sono quindi focalizzati su una ricerca di effetti dei campi ELF nelle fasi di promozione e di progressione dello sviluppo tumorale, dopo che il processo è stato iniziato da un cancerogeno chimico.

Gli studi sulla crescita *in vivo* di cellule tumorali e sullo sviluppo di tumori trapiantati in roditori non hanno fornito nessuna solida evidenza di possibili effetti cancerogeni dell'esposizione a campi ELF (Tenforde 1996). Diversi studi di più diretta rilevanza per il cancro nell'uomo hanno fatto uso di prove *in vivo* dell'attività di promozione dei campi magnetici su tumori della pelle, del fegato, del cervello e della mammella in roditori. Tre studi sulla promozione di tumori cutanei (McLean et al. 1991; Rannug et al. 1993a, 1994) non sono riusciti a dimostrare alcun effetto dell'esposizione continua o intermittente a campi magnetici a frequenza industriale nella promozione di tumori indotti chimicamente. In corrispondenza a un campo a 60 Hz di induzione magnetica pari a 2 mT, è stato riportato, in una fase iniziale dell'esperimento, un effetto di co-promozione con un estere forbolico nello sviluppo di un tumore cutaneo nel topo, ma la significatività statistica di questo effetto era andata completamente persa prima che lo studio fosse completato, alla 23^a settimana (Stuchly et al. 1992). Precedenti studi degli stessi autori avevano mostrato che l'esposizione a un campo di 2 mT a 60 Hz non aveva un effetto promotore nella crescita di cellule cutanee il cui processo neoplastico era stato iniziato con DMBA (McLean et al. 1991).

Esperimenti su *foci* epatici trasformati dopo un processo tumorale iniziato da un cancerogeno chimico e promosso da estere forbolico in ratti parzialmente epatotomizzati

non hanno rivelato alcun effetto di promozione o co-promozione a seguito di esposizioni a campi a 50 Hz di intensità variabili tra 0,5 e 50 μ T (Rannug et al. 1993b, c).

Studi sullo sviluppo del tumore mammario in roditori trattati con un agente iniziatore chimico hanno suggerito un effetto di promozione del cancro da parte di campi magnetici a frequenza industriale nell'intervallo di intensità tra 0,01 e 30 mT (Beniashvili et al. 1991; Löscher et al. 1993; Mevissen et al. 1993, 1995; Baum et al. 1995; Löscher e Mevissen 1995). E' stato ipotizzato che queste osservazioni di aumenti nell'incidenza di tumori in ratti esposti a campi magnetici fossero legate ad una soppressione, indotta dal campo, della produzione di melatonina dalla ghiandola pineale e ad un conseguente innalzamento dei livelli di ormoni steroidi e del rischio di cancro (Stevens 1987; Stevens et al. 1992). Occorrono comunque prove di replicazione da parte di laboratori indipendenti, prima di poter trarre conclusioni su ciò che questi risultati implicano riguardo all'effetto di promozione dei campi magnetici ELF sui tumori mammari. E' da notare anche che studi recenti non hanno trovato alcuna evidenza di effetti significativi dell'esposizione a campi magnetici ELF sui livelli di melatonina nell'uomo (Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996).

Effetti indiretti dei campi elettrici e magnetici

Effetti indiretti dei campi elettromagnetici possono derivare dal contatto fisico tra una persona ed un oggetto quale una struttura metallica nel campo (oggetto che può essere, ad esempio, toccato o strofinato) quando i due si trovino ad un diverso potenziale elettrico. Il risultato di tale contatto è un flusso (corrente di contatto) delle cariche elettriche che possono essersi accumulate sull'oggetto o sul corpo della persona. Nell'intervallo di frequenze fino a circa 100 kHz, la corrente elettrica che fluisce da un oggetto posto nel campo al corpo dell'individuo può dar luogo alla stimolazione dei muscoli e/o dei nervi periferici. Con il progressivo aumento dell'intensità della corrente, questi effetti possono manifestarsi come percezione, dolorose scosse elettriche e/o ustioni, incapacità di rilasciare l'oggetto, difficoltà di respirazione e, a correnti molto alte, fibrillazione ventricolare (Tenforde e Kaune 1987). I valori di soglia per questi effetti dipendono dalla frequenza: le soglie più basse si presentano a frequenze tra 10 e 100 Hz. Le soglie per la stimolazione dei nervi periferici rimangono basse fino a diversi chilohertz. Appropriate misure di carattere tecnico o amministrativo, o anche l'uso di indumenti protettivi, possono prevenire questi problemi.

Delle scariche elettriche possono verificarsi quando un individuo si trova nelle immediate vicinanze di un oggetto a diverso potenziale elettrico, senza toccarlo (Tenforde e Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993). In un gruppo di volontari che si trovavano elettricamente isolati dal suolo e ciascuno con la punta di un dito vicino ad un oggetto collegato a terra, la soglia per la percezione di scariche era ridotta fino a 0,6 - 1,5 kV/m nel 10% dei casi. Il livello di campo che viene indicato come soglia per provocare una sensazione di disturbo in queste

condizioni si colloca tra circa 2,0 e 3,5 kV/m. Forti correnti di contatto possono dar luogo a contrazioni muscolari. Nel caso di volontari maschi, il valore di soglia oltre il quale, al cinquantesimo percentile, i soggetti non sono più in grado di rilasciare un conduttore carico è stato indicato in 9 mA a 50/60 Hz, in 16 mA a 1 kHz, in circa 50 mA a 10 kHz ed in circa 130 mA a 100 kHz (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Le correnti di soglia per vari effetti indiretti di campi con frequenze fino a 100 kHz sono riassunte nella Tabella 2 (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Tabella 2. Intervalli delle correnti di soglia per effetti indiretti, compresi quelli in bambini, donne e soggetti maschili

Effetto indiretto	Corrente di soglia (mA) alla frequenza di:		
	50/60 Hz	1 kHz	100 kHz
Percezione del contatto	0,2 – 0,4	0,4 – 0,8	25 – 40
Dolore nel punto di contatto (dito)	0,9 – 1,8	1,6 – 3,3	33 - 55
Scossa dolorosa / inibizione del rilascio	8 – 16	12 – 24	112 – 224
Scossa grave / difficoltà di respirazione	12 – 23	21 – 41	160 - 320

Sintesi degli effetti biologici e degli studi epidemiologici (fino a 100 kHz).

Con la sola eccezione, forse, dei tumori mammari, gli studi di laboratorio forniscono poca evidenza che i campi magnetici a frequenza industriale abbiano un effetto di promozione dei tumori. Anche se occorrono ulteriori studi su animali per chiarire i possibili effetti dei campi ELF sui segnali prodotti nelle cellule e sulla regolazione endocrina (ciascuno dei quali può influenzare lo sviluppo di tumori promuovendo la proliferazione di cellule iniziate), si può solo concludere che, al momento attuale, non c'è nessuna evidenza convincente di effetti cancerogeni di questi campi e che questi dati non possono essere usati come base per lo sviluppo di linee guida di esposizione.

Gli studi di laboratorio su sistemi cellulari e su animali non hanno portato ad accertare alcun effetto dei campi a bassa frequenza che sia indicativo di effetti nocivi per la salute quando la densità di corrente indotta è pari o inferiore a 10 mA/m². A livelli più alti di densità di corrente indotta (10-100 mA/m²), sono stati osservati, in modo coerente, effetti più significativi sui tessuti, come alterazioni funzionali del sistema nervoso ed altri (Tenforde 1996).

I dati sul rischio di cancro associato all'esposizione a campi ELF di individui che vivevano vicino ad elettrodotti sembrano indicare un rischio leggermente più alto di leucemia infantile, anche se gli studi più recenti mettono in discussione la debole associazione

osservata in precedenza. Gli studi non indicano comunque un analogo aumento di rischio per nessun altro tipo di tumore infantile, né per alcuna forma di tumore negli adulti. La base di un'ipotetica connessione tra leucemia infantile e residenza nelle immediate vicinanze di elettrodotti è ignota; se questa connessione non ha a che fare con i campi elettrici e magnetici ELF generati dalle linee, allora devono esserci fattori sconosciuti di rischio per la leucemia, connessi in qualche modo, tuttora indeterminato, agli elettrodotti. In assenza di un sostegno da parte degli studi di laboratorio, i dati epidemiologici sono insufficienti per consentire di stabilire linee guida per l'esposizione.

Sono stati segnalati aumenti di rischio in lavoratori del settore elettrico per alcuni tipi di tumori come leucemie, tumori del sistema nervoso e, in misura limitata, tumori al seno. Nella maggior parte degli studi, si è fatto uso delle mansioni professionali per classificare i soggetti secondo i livelli presunti di esposizione ai campi magnetici. In un piccolo numero di studi più recenti si sono però usati metodi più sofisticati per la valutazione delle esposizioni; nel loro complesso questi studi suggeriscono un aumento del rischio di leucemie o di tumori cerebrali, ma sono molto discordanti per quanto riguarda il tipo di cancro di cui si osserva un aumento di rischio. I dati sono insufficienti per fornire una base per linee guida di esposizione a campi ELF. Un gran numero di studi epidemiologici non ha fornito nessuna evidenza coerente di effetti negativi sulla riproduzione.

Le misure di effetti biologici in studi di laboratorio e su volontari hanno fornito poche indicazioni di effetti negativi dei campi a bassa frequenza, ai livelli ai quali le persone sono normalmente esposte. A frequenze fino a 1 kHz, la densità di corrente di soglia per effetti di scarso rilievo sulle funzioni del sistema nervoso è stata stimata in 10 mA/m^2 . Tra i volontari, gli effetti dell'esposizione che si manifestano con maggior regolarità sono la comparsa di fosfeni visivi ed una piccola riduzione del battito cardiaco durante o immediatamente dopo l'esposizione a campi ELF, ma non vi è nessuna evidenza che questi effetti temporanei siano associati ad alcun rischio sanitario a lungo termine. In alcuni roditori si è osservata una riduzione della sintesi notturna di melatonina nella ghiandola pineale dopo l'esposizione a deboli campi elettrici e magnetici ELF, ma nessun effetto del genere è stato segnalato nel caso di soggetti umani esposti a campi ELF in condizioni controllate. Studi che prevedevano esposizioni a campi magnetici a 60 Hz di intensità fino a 20 mT non hanno segnalato effetti attendibili sui livelli di melatonina nel sangue.

BASI BIOLOGICHE PER LA LIMITAZIONE DELL'ESPOSIZIONE (100 kHz - 300 GHz)

I paragrafi che seguono forniscono una panoramica generale della letteratura scientifica di significativa importanza sugli effetti biologici e sui potenziali effetti sanitari dei campi elettromagnetici di frequenza compresa tra 100 kHz e 300 GHz. Sono disponibili anche altre rassegne, più dettagliate (NRPB 1991; UNEP/WHO/IRPA 1993; McKinlay et al. 1996; Polk e Postow 1996; Repacholi 1998).

Effetti diretti dei campi elettromagnetici

Studi epidemiologici. E' stato effettuato solo un limitato numero di studi sugli effetti riproduttivi e sul rischio di cancro in individui esposti a radiazione a microonde. Una sintesi di questa letteratura è stata pubblicata da UNEP/WHO/IRPA (1993).

Effetti sulla riproduzione. Due ampi studi su donne sottoposte a diatermia a microonde per alleviare il dolore delle contrazioni dell'utero durante il parto non hanno prodotto alcuna evidenza di effetti negativi sul feto (Daels 1973, 1976). D'altro canto, sette studi sull'esito della gravidanza di lavoratrici esposte per motivi professionali a radiazioni a microonde e su difetti alla nascita della loro prole hanno offerto risultati sia positivi, sia negativi. In alcuni dei più ampi studi epidemiologici su lavoratrici addette alla saldatura della plastica e su fisioterapiste che lavoravano con apparati di diatermia ad onde corte non si è osservato nessun effetto statisticamente significativo sulla frequenza di aborti o di malformazioni fetali (Källén et al. 1982). Per contro, altri studi su popolazioni analoghe di lavoratrici hanno trovato aumenti del rischio di aborti e di difetti alla nascita (Larsen et al. 1991; Ouellet-Hellstrom e Stewart 1993). Uno studio su lavoratori uomini addetti ai radar non ha trovato alcuna associazione tra l'esposizione a microonde ed il rischio di sindrome di Down nei loro figli (Cohen et al. 1991).

Nel complesso, gli studi sugli effetti riproduttivi in relazione all'esposizione a microonde risentono di una valutazione molto carente delle esposizioni e, in molti casi, di piccoli numeri di soggetti. Nonostante i risultati generalmente negativi di questi studi, sarà difficile trarre solide conclusioni sul rischio di danni nella riproduzione senza ulteriori dati epidemiologici su individui con alte esposizioni e senza stime più precise dell'esposizione.

Studi sul cancro. Gli studi su rischio di cancro ed esposizione a microonde sono pochi e generalmente carenti per quanto riguarda la valutazione delle esposizioni. Due indagini epidemiologiche su lavoratori addetti a radar, nell'industria aeronautica e nelle forze armate degli Stati Uniti, non hanno trovato alcuna evidenza di aumenti di morbilità o di mortalità, per nessuna causa (Barron e Baraff 1958; Robinette et al. 1980; UNEP/WHO/IRPA 1993). Risultati analoghi sono stati ottenuti da Lilienfeld et al. (1978) in uno studio su dipendenti dell'ambasciata degli Stati Uniti a Mosca, che erano stati cronicamente esposti a radiazione a microonde di bassa intensità. Selvin et al. (1992) non hanno segnalato alcun aumento del

rischio di cancro in bambini cronicamente esposti alle radiazioni prodotte da un grande trasmettitore di microonde vicino alle loro abitazioni. Studi più recenti non sono giunti a dimostrare alcun aumento significativo di tumori del sistema nervoso in lavoratori e personale militare esposti a campi a microonde (Beall et al. 1996; Grayson 1996). Inoltre, non è risultato alcun aumento della mortalità totale tra utenti di telefoni mobili (Rothman et al. 1996a, b), ma è ancora troppo presto per osservare un effetto sull'incidenza di tumori o sulla relativa mortalità.

Uno studio ha segnalato un aumento del rischio di cancro in personale militare (Szmigielski et al. 1988), ma i risultati sono difficili da interpretare perché non vengono chiaramente specificati né la dimensione della popolazione in studio, né i livelli di esposizione. In uno studio successivo Szmigielski (1996) ha trovato aumenti nella frequenza di leucemie e di linfomi tra militari esposti a campi elettromagnetici, ma la valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici non era ben definita. Alcuni recenti studi su popolazioni che vivevano vicino a trasmettitori di campi elettromagnetici hanno suggerito un aumento locale dell'incidenza di leucemie (Hocking et al. 1996; Dolk et al. 1997a, b), ma i loro risultati sono non conclusivi. Nel complesso, i risultati dei pochi studi epidemiologici forniscono solo informazioni limitate sul rischio di cancro.

Studi di laboratorio. I paragrafi che seguono forniscono una panoramica ed una valutazione critica degli effetti biologici dei campi elettromagnetici con frequenza compresa tra 100 kHz e 300 GHz. Vengono discussi separatamente i risultati degli studi condotti su volontari esposti in condizioni controllate e quelli di studi di laboratorio su sistemi cellulari, su tessuti biologici e su animali.

Studi su volontari. Gli studi di Chatterjee et al. (1986) hanno dimostrato che, con l'aumentare della frequenza da circa 100 kHz a 10 MHz, l'effetto dominante dell'esposizione a campi elettromagnetici di forte intensità cambia, spostandosi dalla stimolazione di nervi e muscoli al riscaldamento. A 100 kHz la sensazione principale è quella di un tremore nervoso, mentre a 10 MHz è quella di calore sulla pelle. In questo intervallo di frequenze, quindi, i criteri fondamentali di protezione devono essere tali da evitare sia la stimolazione di tessuti eccitabili, sia effetti di riscaldamento. A frequenze da 10 MHz a 300 GHz, il riscaldamento è l'effetto principale dell'assorbimento di energia elettromagnetica, ed aumenti di temperatura superiori a 1-2 °C possono comportare effetti nocivi per la salute, come affaticamento e infarto da calore (ACGIH 1996). Studi condotti su lavoratori in ambienti termicamente non confortevoli hanno mostrato peggioramenti nell'esecuzione di semplici compiti quando la temperatura del corpo saliva fino a livelli vicini allo stress termico (Ramsey e Kwon 1988).

Una sensazione di calore è stata riportata da volontari che sperimentavano una corrente ad alta frequenza di circa 100-200 mA attraverso un'estremità. Il corrispondente valore di

SAR non produceva verosimilmente nelle estremità un aumento locale della temperatura superiore a 1 °C (Chatterjee et al. 1986; Chen e Ghandi 1988; Hoque e Ghandi 1988); secondo quanto suggerito dagli studi, questo è il limite superiore degli innalzamenti di temperatura che non producono effetti di danno alla salute (UNEP/WHO/IRPA 1993). I dati su volontari, riportati da Gandhi et al. (1986) per frequenze fino a 50 MHz e da Tofani et al. (1995) per frequenze fino a 110 MHz (limite superiore della banda per le trasmissioni radio FM) forniscono la base per definire come livello di riferimento per la corrente nelle estremità il valore di 100 mA, al fine di evitare effetti dovuti a un eccessivo riscaldamento (Dimbylow 1997).

Sono stati condotti diversi studi sulle risposte del sistema di termoregolazione di volontari esposti, a riposo, ai campi elettromagnetici che si presentano in sistemi di immagine a risonanza magnetica (Shellock e Crues 1987; Magin et al. 1992). In generale, questi studi hanno dimostrato che un'esposizione fino a 30 minuti, in condizioni in cui il SAR medio sul corpo intero era inferiore a 4 W/kg, provocava un aumento di temperatura di meno di 1 °C all'interno del corpo.

Studi su sistemi cellulari e su animali. Esistono numerose segnalazioni di risposte comportamentali e fisiologiche di animali da laboratorio, compresi i roditori, a interazioni di natura termica con campi elettromagnetici di frequenze superiori a 10 MHz. Le risposte termosensoriali e termoregolatorie sono associate sia all'ipotalamo, sia ai recettori termici localizzati nella pelle e in parti interne del corpo. I segnali afferenti, che riflettono una variazione di temperatura, convergono nel sistema nervoso centrale e modificano l'attività dei principali sistemi di controllo neuroendocrino, innescando le risposte fisiologiche e comportamentali necessarie per mantenere l'omeostasi.

L'esposizione di animali da laboratorio a campi elettromagnetici che provocano un assorbimento superiore a circa 4 W/kg ha rivelato un quadro caratteristico di risposte del sistema di termoregolazione, in cui la temperatura corporea inizialmente aumenta per poi stabilizzarsi in seguito all'attivazione dei meccanismi di termoregolazione (Michaelson 1983). La fase iniziale di questa risposta è accompagnata da un aumento del volume sanguigno dovuto al movimento di fluido immesso dallo spazio extracellulare nel sistema circolatorio e da aumenti del ritmo cardiaco e dalla pressione sanguigna intraventricolare. Queste variazioni cardiodinamiche sono il risultato di risposte termoregolatorie che facilitano la conduzione di calore verso la superficie del corpo. Un'esposizione prolungata di animali a radiazione a microonde che innalzi la temperatura corporea finisce col portare al cedimento di questi meccanismi di termoregolazione.

Diversi studi su roditori e scimmie hanno anche dimostrato una componente comportamentale delle risposte legate alla termoregolazione. Sono state osservate in ratti e

scimmie riduzioni nella capacità di svolgere alcuni compiti in corrispondenza di valori di SAR compresi tra 1 e 3 W/kg (Stern et al. 1979; Adair e Adams 1980; de Lorge e Ezell 1980; D'Andrea et al. 1986). Nelle scimmie, le alterazioni del comportamento dovute alla termoregolazione iniziano già quando la temperatura nella regione dell'ipotalamo sale di 0,2-0,3 °C (Adair et al. 1984). L'ipotalamo è considerato il centro di controllo dei normali processi di termoregolazione e la sua attività può essere modificata da un piccolo aumento locale della temperatura, in condizioni in cui la temperatura rettale rimane costante.

In studi su sistemi cellulari e animali (Michaelson e Elson 1996) sono stati caratterizzati numerosi effetti fisiologici a livelli di assorbimento di energia elettromagnetica tali da provocare aumenti di temperatura superiori a 1-2 °C. Questi effetti comprendono alterazioni delle funzioni neurali e neuromuscolari, aumenti di permeabilità della barriera sangue-cervello, danneggiamenti dell'occhio (opacizzazione del cristallino e aberrazioni della cornea), alterazioni da stress del sistema immune, variazioni ematologiche, modificazioni del sistema riproduttivo (ad esempio riduzione della produzione di spermatozoi), teratogenicità, modificazioni della morfologia delle cellule, del contenuto in acqua e in elettroliti e delle funzioni di membrana.

In condizioni di esposizione parziale del corpo, possono verificarsi danni significativi di origine termica in organi sensibili, come gli occhi e i testicoli. Un'esposizione della durata di 2-3 ore a microonde ha prodotto la cataratta negli occhi di conigli, a partire da valori di SAR di 100-140 W/kg i quali producevano nel cristallino temperature di 41-43 °C (Guy et al. 1975). Non sono stati osservati casi di cataratta in scimmie esposte a campi a microonde di intensità simili o superiori, forse a causa delle diverse modalità di assorbimento di energia nelle scimmie e nei conigli. A frequenze molto alte (10-300 GHz), l'assorbimento di energia elettromagnetica è in gran parte limitato agli strati epidermici della pelle, ai tessuti sottocutanei e alla parte esterna dell'occhio. Nella regione superiore di questo intervallo di frequenze, l'assorbimento diventa progressivamente più superficiale. A queste frequenze, i danni agli occhi possono essere evitati se si mantiene la densità di potenza al di sotto di 50 W/m² (Sliney e Wolbarsht 1980; UNEP/WHO/IRPA 1993).

Sono da qualche tempo oggetto di notevole interesse i possibili effetti cancerogeni dell'esposizione a campi a microonde, nell'intervallo di frequenze utilizzato dai più diffusi sistemi di comunicazione, compresi i telefoni mobili e le relative stazioni radio base. I risultati delle ricerche condotte in questo campo sono stati sintetizzati dall'ICNIRP (1996). In breve sintesi, vi sono molti lavori che suggeriscono che i campi a microonde non siano mutageni e che quindi l'esposizione a questi campi non possa, verosimilmente, iniziare la cancerogenesi (NRPB 1992; Cridland 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993). Per contro, alcuni recenti studi suggeriscono che l'esposizione di roditori a campi a microonde, a livelli di SAR dell'ordine di 1 W/kg, possano produrre rotture nel filamento del DNA di tessuti testicolari e

cerebrali (Sarkar et al. 1994; Lai e Singh 1995, 1996), sebbene sia l'ICNIRP (1996), sia Williams (1996) abbiano evidenziato carenze metodologiche che potrebbero aver influenzato notevolmente questi risultati.

In un ampio studio su ratti esposti a microonde per più di 25 mesi, è stato notato un eccesso di tumori primari negli animali esposti rispetto ai controlli (Chou et al. 1992). Tuttavia, l'incidenza di tumori benigni non differiva tra i due gruppi, e nessun tipo di tumore mostrava una maggiore prevalenza nel gruppo esposto rispetto a ratti dello stesso ceppo mantenuti in condizioni simili di assenza di patogeni specifici. Nel loro insieme, i risultati di questo studio non possono essere interpretati come indicativi di un effetto di iniziazione di tumori da parte dei campi magnetici.

Diversi studi hanno esaminato gli effetti dell'esposizione a microonde sullo sviluppo di cellule tumorali preindotte. Szmigielski et al. (1982) hanno notato, in ratti esposti ad alte densità di potenza a microonde, un aumento del tasso di crescita di cellule di sarcoma polmonare trapiantate. E' possibile che ciò fosse il risultato di un indebolimento delle difese immunitarie in conseguenza dello stress termico provocato dall'esposizione a microonde. Studi recenti, con irraggiamento di microonde a livelli non termici, non hanno mostrato alcun effetto sullo sviluppo di melanoma nei topi o di glioma cerebrale nei ratti (Santini et al. 1988; Salford et al. 1993).

Repacholi et al. hanno riportato che l'esposizione, per periodi di tempo fino a 18 mesi, di 100 femmine di topi transgenici *Eμ-pim1* a campi a 900 MHz, modulati a 217 Hz con impulsi della durata di 0,6 μs, produceva un raddoppio dell'incidenza di linfomi rispetto a 101 controlli. Poiché i topi erano liberi di vagabondare nelle gabbie, le variazioni di SAR erano notevoli (da 0,01 a 4,2 W/kg). Dato che il tasso metabolico a riposo di questi topi è compreso tra 7 e 15 W/kg, solo i livelli più alti dell'intervallo di esposizione possono aver prodotto qualche lieve riscaldamento. Quindi, questo studio sembra suggerire che ad agire sia un meccanismo non termico, che richiede di essere ulteriormente indagato. Comunque, prima di poter fare qualunque assunzione sui rischi sanitari, vi sono diverse questioni da risolvere. Lo studio deve essere replicato, confinando gli animali in modo da ridurre la variabilità del SAR e determinare se vi sia una relazione dose-risposta. Sono poi necessari ulteriori studi per accertare se gli stessi risultati si trovano in altri modelli animali, per poter essere in grado di generalizzare i risultati all'uomo. E' anche essenziale stabilire se i risultati trovati su animali transgenici siano applicabili all'uomo.

Considerazioni particolari per forme d'onda pulsate e modulate in ampiezza

Rispetto alla radiazione in onda continua, i campi a microonde pulsati sono generalmente, a parità di tasso medio di deposizione di energia nei tessuti, più efficaci nel produrre risposte biologiche, specialmente quando vi siano da superare soglie ben definite per

provocare l'effetto (ICNIRP 1996). Un esempio ben noto è il cosiddetto "effetto uditivo delle microonde" (Frey 1961; Frey e Messenger 1973; Lin 1978): persone con un udito normale possono percepire campi modulati ad impulsi, di frequenze comprese tra circa 200 MHz e 6,5 GHz. La sensazione uditiva è stata di volta in volta descritta come un ronzio, un ticchettio o uno schioppettio, secondo le caratteristiche di modulazione del campo. L'effetto uditivo delle microonde è stato attribuito a un'interazione termoelastica nella corteccia uditiva del cervello, con una soglia di percezione tra circa 100 e 400 mJ/m² per impulsi di durata inferiore a 30 µs a 2,45 GHz (corrispondenti a un valore di SA tra 4 e 16 mJ/kg). Un'esposizione ripetuta o prolungata a microonde con effetti uditivi può essere fastidiosa e potenzialmente pericolosa.

Alcuni lavori suggeriscono che la retina, l'iride e l'endotelio della cornea dell'occhio di primati siano sensibili a bassi livelli di radiazione pulsata a microonde (Kues et al. 1985; UNEP/WHO/IRPA 1993). Modificazioni di carattere degenerativo in cellule sensibili alla luce sono state segnalate già a livelli di assorbimento di energia di 26 mJ/kg. Dopo la somministrazione di maleato di timololo, una sostanza usata per la cura del glaucoma, la soglia di danno alla retina da parte di campi pulsati scendeva drasticamente fino a 2,6 mJ/kg. Tuttavia, un tentativo di replicare parzialmente questi risultati con onda continua (cioè non pulsata) in un laboratorio indipendente non ha avuto successo (Kamimura et al. 1994) ed è quindi impossibile al momento attuale stabilire le possibili implicazioni di carattere sanitario dei risultati iniziali di Kues et al. (1985).

E' stato riportato che l'esposizione ad alti campi pulsati a microonde sopprime la reazione di trasalimento in topi coscienti e stimola movimenti del corpo (NRPB 1991; Sinkiewicz et al. 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993). Il livello di soglia per indurre movimenti del corpo risultava, in termini di assorbimento di energia al centro del cervello, di 200 J/kg per impulsi di 10 µs. Il meccanismo alla base di questi effetti delle microonde pulsate resta ancora da stabilire, ma si ritiene che sia collegato al fenomeno uditivo delle microonde. Le soglie uditive per i roditori sono circa un ordine di grandezza inferiori a quelle per l'uomo, cioè pari a 1-2 mJ/kg per impulsi di durata inferiore a 30 µs. E' stato riportato che impulsi di questa entità influenzano il metabolismo dei neurotrasmettitori e la concentrazione dei recettori neurali coinvolti nelle risposte di stress e di ansia in differenti regioni del cervello dei ratti.

Il problema delle interazioni non termiche dei campi elettromagnetici ad alta frequenza verte in larga misura sulle segnalazioni di effetti biologici di campi modulati in ampiezza, in condizioni di esposizione *in vitro* a livelli di SAR ben al di sotto di quelli che producono un riscaldamento misurabile dei tessuti. Alcuni studi iniziali, condotti in due laboratori indipendenti, portarono a segnalare che campi a frequenza VHF (very high frequency) con una modulazione d'ampiezza a frequenze estremamente basse (6-20 Hz) produceva un piccolo, ma statisticamente significativo, rilascio di ioni Ca⁺⁺ dalla superficie delle cellule di

cervello di pollo (Bawin et al. 1975; Blackman et al. 1979). Un successivo tentativo di replicare questi risultati, usando lo stesso tipo di campi modulati in ampiezza, non ebbe successo (Albert et al. 1987). Diversi altri studi sugli effetti dei campi modulati in ampiezza sull'omeostasi del Ca^{++} hanno prodotto risultati sia positivi, sia negativi. Per esempio, effetti dei campi modulati in ampiezza sul legame del Ca^{++} alla superficie delle cellule sono stati osservati in cellule di neuroblastoma, in cellule pancreatiche, nel tessuto cardiaco ed in cellule del cervello di gatti, ma non in cellule nervose di ratti in coltura, in muscoli dello scheletro di pollo, o in cellule del cervello di ratti (Postow e Swicord 1996).

E' stato anche riportato che campi modulati in ampiezza alterino l'attività elettrica cerebrale (Bawin et al. 1974), inibiscano l'attività citotossica dei linfociti T (Lyle et al. 1983), diminuiscano l'attività della chinasi AMP-non-ciclico-dipendente nei linfociti (Byus et al. 1984) e provochino un aumento temporaneo dell'attività citoplasmatica dell'ornitina decarbossilasi, un enzima essenziale per la proliferazione cellulare (Byus et al. 1988; Litovitz et al. 1992). Per contro, non è stato osservato alcun effetto su una grande varietà di altri sistemi cellulari e processi funzionali funzionali, tra cui *capping* di linfociti, trasformazioni di cellule neoplastiche e varie proprietà elettriche ed enzimatiche di membrana (Postow e Swicord 1996). Di particolare rilevanza per potenziali effetti cancerogeni dei campi pulsati è l'osservazione di Balce-Kubiczek e Harrison (1991) che la trasformazione neoplastica risultava accelerata in cellule C3H/10T1/2 esposte a campi a microonde di 2450 MHz modulati con impulsi a 120 kHz. L'effetto dipendeva dall'intensità del segnale, ma si manifestava solo quando nel mezzo di coltura cellulare era presente un promotore chimico dei tumori, il TPA. Questo risultato suggerisce che le microonde pulsate possano esercitare un effetto co-cancerogeno in combinazione con un agente chimico che aumenti il tasso di proliferazione delle cellule trasformate. Fino ad oggi non vi sono stati tentativi di replicare questi risultati, di cui non sono chiare le implicazioni per quanto riguarda gli effetti sulla salute umana.

L'interpretazione di diversi altri effetti osservati dei campi elettromagnetici è ulteriormente complicata dall'apparente esistenza di "finestre" di risposta, sia in densità di potenza sia in frequenza. Non esistono modelli accettati che spieghino adeguatamente questo fenomeno, che mette in discussione il concetto tradizionale di una relazione monotona tra l'intensità del campo e la gravità degli effetti biologici conseguenti.

Nel complesso, la letteratura sugli effetti non termici dei campi modulati in ampiezza è così complessa, la validità degli effetti segnalati è stabilita in modo così carente e la rilevanza degli effetti per la salute umana è così incerta che è impossibile usare queste informazioni per stabilire limiti di esposizione a questi campi.

Effetti indiretti dei campi elettromagnetici

Nell'intervallo di frequenze tra circa 10 kHz e 110 MHz, possono prodursi scosse o bruciature, o perché un individuo tocca un oggetto metallico che ha acquistato una carica elettrica nel campo, o per un contatto tra un individuo carico ed un oggetto collegato a terra. Si deve notare che il limite superiore dell'intervallo di frequenze per la corrente di contatto (110 MHz) è imposto da una mancanza di dati relativi alle frequenze più alte, piuttosto che da una mancanza di effetti. Comunque, la frequenza di 110 MHz costituisce il limite superiore della banda per le trasmissioni radio FM. In esperimenti controllati su volontari sono state determinate le correnti di soglia per vari effetti biologici di diversa gravità, dalla percezione al dolore (Chatterjee et al. 1986; Tenforde e Kaune 1986; Bernhardt 1988); queste sono riassunte nella Tabella 3. In generale, è stato mostrato che le correnti di soglia per la percezione ed il dolore variano di poco nell'intervallo di frequenze 100 kHz - 1 MHz, ed è poco verosimile che varino in misura significativa entro l'intervallo di frequenze fino a circa 110 MHz. Come già notato per le basse frequenze, esistono anche significative differenze di sensibilità tra uomini, donne e bambini. I dati della Tabella 3 rappresentano gli intervalli entro cui variano i valori al 50° percentile per persone di diversa taglia e con diversa sensibilità alle correnti di contatto.

Tabella 3. Intervalli entro cui variano tra le persone (compresi uomini, donne e bambini) i valori di soglia per effetti indiretti delle correnti di contatto

Effetto indiretto	Corrente di soglia (mA) alla frequenza:	
	100 kHz	1 MHz
Percezione al contatto	25-40	25-40
Dolore al contatto con un dito	35-55	28-50
Scossa dolorosa/incapacità di rilascio	112-224	Non determinata
Scossa grave/difficoltà di respirazione	160-320	Non determinata

Sintesi degli effetti biologici e degli studi epidemiologici (100 kHz - 300 GHz)

I dati sperimentali disponibili indicano che l'esposizione per circa 30 minuti dell'uomo a riposo a campi elettromagnetici che producano un SAR mediato sul corpo intero tra 1 e 4 W/kg dà luogo ad un aumento della temperatura corporea inferiore a 1 °C. I dati su animali indicano una soglia per risposte di tipo comportamentale che si colloca nello stesso intervallo di SAR. Esposizioni a campi più intensi, che producano valori di SAR superiori a 4 W/kg, possono andare al di là della capacità di termoregolazione del corpo e produrre riscaldamenti del corpo a livelli pericolosi. Molti studi di laboratorio su roditori e primati hanno dimostrato la grande varietà dei danni ai tessuti conseguenti a riscaldamenti del corpo intero o di parti di esso che diano luogo ad aumenti di temperatura superiori a 1-2 °C. La sensibilità dei vari tipi di tessuto a danni di origine termica varia molto, ma la soglia per effetti irreversibili, anche nei tessuti più sensibili, è superiore a 4 W/kg in normali condizioni ambientali. Questi dati costituiscono la base per limitare l'esposizione professionale a 0,4 W/kg, un valore che fornisce un ampio margine di sicurezza per altre condizioni limite, come alta temperatura ambientale, umidità o intensa attività fisica.

Sia i dati di laboratorio sia i risultati di un numero limitato di studi sull'uomo (Michaelson e Elson 1996) mostrano chiaramente che condizioni ambientali sfavorevoli e l'uso di farmaci o alcool possono compromettere le capacità di termoregolazione del corpo. In queste condizioni, si devono introdurre dei fattori di sicurezza per garantire un'adeguata protezione degli individui esposti.

Dati sulle risposte dell'organismo umano a campi elettromagnetici ad alta frequenza che producano un riscaldamento rilevabile sono stati ottenuti da esperimenti controllati su volontari e da studi epidemiologici su lavoratori esposti a particolari sorgenti, come radar, apparati per diatermia in campo medico e termosaldatrici. Questi dati hanno confermato pienamente la conclusione degli studi di laboratorio, secondo cui effetti biologici negativi possono essere causati da aumenti della temperatura dei tessuti superiori a 1 °C. Gli studi epidemiologici su lavoratori esposti e sulla popolazione non hanno mostrato nessun effetto sanitario di rilievo associato ai tipici livelli ambientali di esposizione. Vi sono ancora carenze nella ricerca epidemiologica, come ad esempio un'insoddisfacente valutazione delle esposizioni; comunque, gli studi non hanno fornito nessuna evidenza convincente che i tipici livelli di esposizione portino ad effetti nocivi nella riproduzione o ad aumenti del rischio di cancro negli individui esposti. Questo è in accordo con i risultati della ricerca di laboratorio su modelli cellulari e animali, che non hanno dimostrato effetti né teratogeni né cancerogeni dell'esposizione a livelli non termici di campi elettromagnetici ad alta frequenza.

L'esposizione a campi elettromagnetici pulsati di sufficiente intensità porta ad alcuni effetti prevedibili, come quello uditivo, e a varie risposte comportamentali. Gli studi

epidemiologici su lavoratori e su individui della popolazione hanno fornito solo informazioni limitate e non sono riusciti a provare nessun effetto sanitario. Le segnalazioni di gravi danni alla retina sono state smentite da successivi tentativi di replicare, senza successo, i risultati.

Un gran numero di studi sugli effetti biologici di campi elettromagnetici modulati in ampiezza, condotti per la maggior parte a bassi livelli di esposizione, hanno fornito risultati sia positivi sia negativi. Un'approfondita analisi di questi studi rivela che gli effetti dei campi modulati in ampiezza variano molto con i parametri di esposizione, con i tipi di cellule e di tessuti esposti, e con l'effetto biologico che si sta esaminando. In generale, gli effetti dell'esposizione dei sistemi biologici a livelli non termici di campi elettromagnetici modulati in ampiezza sono piccoli e molto difficilmente possono essere collegati a potenziali effetti sulla salute. Non vi è nessuna evidenza convincente di finestre, in frequenza o in densità di potenza, nella risposta a questi campi.

Gli effetti nocivi indiretti dei campi elettromagnetici a bassa frequenza, legati a un contatto con oggetti metallici immersi nel campo, possono essere scosse e ustioni. A frequenze comprese tra 100 kHz e 110 MHz (limite superiore delle trasmissioni radiofoniche in modulazione di frequenza) i valori di soglia oltre cui le correnti di contatto producono effetti, che vanno dalla percezione al dolore acuto, non variano significativamente al variare della frequenza del campo.

La soglia per la percezione varia tra 25 e 40 mA in soggetti di taglia diversa, mentre per il dolore la soglia varia approssimativamente tra 30 e 50 mA; oltre 50 mA si possono produrre ustioni gravi nella zona di tessuto che viene a contatto con un oggetto metallico nel campo.

LINEE GUIDA PER LA LIMITAZIONE DELL'ESPOSIZIONE

Limitazioni all'esposizione professionale e a quella del pubblico

La popolazione esposta per motivi professionali è formata da adulti che sono generalmente esposti in condizioni note e sono informati e consapevoli dei potenziali rischi e delle opportune precauzioni da adottare.

Al contrario, il pubblico generico comprende individui di tutte le età e con diverso stato di salute, e può includere gruppi di persone particolarmente sensibili. In molti casi, i membri del pubblico non sono consapevoli della loro esposizione ai campi elettromagnetici. Inoltre, non ci si può ragionevolmente attendere che i singoli individui della popolazione adottino misure per minimizzare o per evitare l'esposizione. Sono queste le considerazioni alla base dell'adozione di limitazioni più restrittive per l'esposizione del pubblico rispetto a quella dovuta a motivi professionali.

Restrizioni di base e livelli di riferimento

Le restrizioni sull'esposizione sono basate su effetti sanitari accertati e vengono chiamate restrizioni di base. Secondo la frequenza, le grandezze fisiche usate per specificare le restrizioni di base per l'esposizione a campi elettromagnetici sono la densità di potenza, il rateo di assorbimento specifico (o SAR, dall'inglese Specific Absorption Rate) e la densità di potenza. Per la protezione da effetti nocivi per la salute, non si devono superare queste restrizioni di base.

I livelli di riferimento vengono forniti ai fini di un confronto pratico con i valori misurati di determinate grandezze fisiche: il rispetto di tutti i livelli di riferimento forniti da queste linee guida assicurano il rispetto delle restrizioni di base. Se i valori misurati sono superiori ai livelli di riferimento, non ne consegue necessariamente che siano superate le restrizioni di base, ma è necessaria un'analisi più dettagliata per verificare il rispetto di queste ultime.

Osservazioni generali sui fattori di sicurezza

Le informazioni disponibili sugli effetti biologici e sanitari dei campi elettromagnetici sull'uomo e sugli animali sono insufficienti per fornire una base rigorosa su cui stabilire fattori di sicurezza per l'intero intervallo di frequenze e per tutte le modulazioni di frequenza; inoltre, l'incertezza sui fattori di sicurezza deriva in parte da lacune nella conoscenza della dosimetria appropriata (Repacholi 1998). Nello sviluppare i fattori di sicurezza per i campi elettromagnetici ad alta frequenza si sono tenute in considerazione le seguenti variabili:

- gli effetti dei campi elettromagnetici in condizioni ambientali sfavorevoli (temperature elevate, ecc.) e/o di alta intensità;
- una sensibilità al calore potenzialmente più alta in certi gruppi della popolazione, come tra soggetti cagionevoli e/o anziani, neonati e bambini piccoli, malati o persone che assumono farmaci che compromettano la loro tolleranza al calore.

Nel derivare i livelli di riferimento per i campi ad alta frequenza si sono tenuti in considerazione i seguenti ulteriori fattori:

- differenze di assorbimento dell'energia elettromagnetica da parte di individui di diversa taglia ed in relazione a diversi orientamenti rispetto al campo;
- riflessione, focalizzazione e diffusione del campo incidente, che possono dar luogo ad un più intenso assorbimento locale dell'energia ad alta frequenza.

Restrizioni di base

Le basi scientifiche utilizzate per sviluppare le restrizioni di base sono diverse per i vari intervalli di frequenza:

- tra 1 Hz e 10 MHz, vengono fornite restrizioni di base sulla densità di corrente, per prevenire effetti sulle funzioni del sistema nervoso;
- tra 100 kHz e 10 GHz, vengono fornite restrizioni di base sul SAR, per prevenire sbalzi termici nel corpo intero e riscaldamenti eccessivi di tessuti a livello locale; nell'intervallo tra 100 kHz e 10 MHz, vengono fornite restrizioni sia per la densità di corrente sia per il SAR;
- tra 10 e 300 GHz, vengono fornite restrizioni di base sulla densità di potenza, per prevenire un riscaldamento eccessivo nei tessuti superficiali del corpo o in quelli adiacenti.

Nell'intervallo di frequenza tra pochi hertz e 1 kHz, se la densità di corrente indotta supera 100 mA/m^2 , vengono superate le soglie per variazioni dell'eccitabilità del sistema nervoso centrale e per altri effetti acuti, come un'inversione dei potenziali visivi evocati.

Alla luce delle considerazioni di sicurezza sopra illustrate, è stato deciso che, per frequenze comprese tra 4 Hz e 1 kHz, l'esposizione per motivi professionali debba essere limitata a campi che inducano densità di correnti inferiori a 10 mA/m^2 , cioè che venga adottato un fattore di sicurezza pari a 10. Per il pubblico in generale si applica un ulteriore fattore pari a 5, che porta ad un limite di base di 2 mA/m^2 .

Al di sotto di 4 Hz e al di sopra di 1 kHz, le restrizioni di base sulla corrente indotta aumentano progressivamente, in corrispondenza di un aumento della soglia per la stimolazione nervosa in questi intervalli di frequenza. Gli effetti biologici e sanitari che sono stati accertati nell'intervallo di frequenza tra 10 MHz e pochi GHz possono essere interpretati come risposte ad un aumento della temperatura corporea di oltre 1°C . In condizioni ambientali normali, un simile aumento di temperatura è provocato da un'esposizione ad un SAR al corpo intero di circa 4 W/kg per circa 30 minuti.

Si è quindi scelto un SAR medio sul corpo intero di $0,4 \text{ W/kg}$, come limite in grado di fornire un'adeguata protezione per l'esposizione professionale. Per l'esposizione della popolazione si introduce un ulteriore fattore di sicurezza pari a 5, che fornisce un limite di $0,08 \text{ W/kg}$ per il SAR medio sul corpo intero.

L'abbassamento delle restrizioni di base nel caso di esposizione del pubblico generico tiene conto del fatto che l'età e lo stato di salute possono essere diversi rispetto ai lavoratori.

Nel campo delle basse frequenze, vi sono al momento pochi dati che colleghino le correnti transitorie ad effetti sanitari. L'ICNIRP raccomanda quindi che le restrizioni sulla densità di corrente indotta da campi transitori o da impulsi di durata molto breve siano considerate come valori istantanei e non siano mediati nel tempo.

Le restrizioni di base sulla densità di corrente, sul SAR mediato sul corpo intero e sul SAR localizzato, per frequenze comprese tra 1 Hz e 10 GHz, sono presentate nella Tabella 4,

mentre le restrizioni sulla densità di potenza nell'intervallo di frequenza tra 10 GHz e 300 GHz sono presentati nella Tabella 5.

Tabella 4. Restrizioni di base per campi elettrici e magnetici variabili nel tempo, con frequenze fino a 10 GHz

Caratteristiche dell'esposizione	Intervallo di frequenza	Densità di corrente per la testa ed il tronco (mA/m ²)(rms)	SAR mediato sul corpo intero (W/kg)	SAR localizzato (testa e tronco)	SAR localizzato (arti)
Esposizione professionale	fino a 1 Hz	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/ <i>f</i>	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	<i>f</i> /100	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	<i>f</i> /100	0,4	10	20
	10 MHz-10 GHz	-	0,4	10	20
Esposizione del pubblico	fino a 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/ <i>f</i>	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	<i>f</i> /500	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	<i>f</i> /500	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz	-	0,08	2	4

Note:

1. *f* è la frequenza in hertz.
2. A causa della disomogeneità del corpo, le densità di corrente devono essere mediate su una sezione trasversale di 1 cm² perpendicolare alla direzione della corrente.
3. Per frequenze fino a 100 kHz, i valori di picco della densità di corrente possono essere ottenuti moltiplicando i valori efficaci (rms) per $\sqrt{2}$ ($\approx 1,414$). Per impulsi di durata t_p la frequenza equivalente da applicare nelle restrizioni di base deve essere calcolata come $f = 1/(2t_p)$.
4. Per frequenze fino a 100 kHz e per campi magnetici pulsati, la massima densità di corrente associata agli impulsi deve essere calcolata dal tempo di salita/discesa e dal massimo rateo di variazione dell'induzione magnetica. La densità di corrente indotta può quindi essere confrontata con la restrizione di base appropriata.
5. Tutti i valori di SAR devono essere mediati su un periodo di 6 minuti.
6. La massa su cui mediare il SAR localizzato è qualunque massa contigua di 10 g di tessuto; il massimo SAR così ottenuto deve essere il valore usato per la stima dell'esposizione.
7. Per impulsi di durata t_p , la frequenza equivalente da applicare nelle restrizioni di base deve essere calcolata come $f = 1/(2t_p)$. Inoltre, per esposizioni a campi pulsati, nell'intervallo di frequenza tra 0,3 e 10 GHz e per esposizioni localizzate della testa, viene raccomandata un'ulteriore restrizione di base per limitare o evitare gli effetti uditivi causati dall'espansione termoelastica. Questa restrizione è che il SA, mediato su 10 g di tessuto, non deve superare 10 mJ/kg per i lavoratori e 2 mJ/kg per il pubblico.

Tabella 5. Restrizioni di base per la densità di potenza per frequenze comprese tra 10 e 300 GHz

Caratteristiche dell'esposizione	Densità di potenza (W/m ²)
Esposizione professionale	50
Esposizione del pubblico	10

Note:

1. Le densità di potenza devono essere mediate su qualunque superficie di 20 cm² di area esposta e su qualunque periodo di $86/f^{1,05}$ minuti (dove *f* è in GHz) per compensare il sempre minore spessore di penetrazione all'aumentare della frequenza.
2. I massimi valori spaziali della densità di potenza, mediati su 1 cm², non devono superare 20 volte i valori sopra riportati.

Livelli di riferimento

Quando è opportuno, i livelli di riferimento si ottengono dai limiti di base, alle specifiche frequenze, attraverso modelli matematici ed estrapolazioni dai risultati delle ricerche di laboratorio. I livelli di riferimento vengono forniti per le condizioni di massimo accoppiamento del campo con l'individuo esposto e garantiscono quindi la massima protezione.

Le tabelle 6 e 7 riassumono i livelli di riferimento per l'esposizione professionale e per quella del pubblico generico, rispettivamente; gli stessi livelli di riferimento sono illustrati nelle figure 1 e 2. I livelli di riferimento devono intendersi come valori mediati sull'intero corpo dell'individuo esposto, ma con l'importante avvertenza che non devono essere comunque superati i limiti di base per l'esposizione localizzata.

Tabella 6. Livelli di riferimento per l'esposizione professionale a campi elettrici e magnetici (valori efficaci imperturbati)

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μ T)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente S_{eq} (W/m^2)
fino a 1 Hz	-	$1,63 \times 10^5$	2×10^5	-
1-8 Hz	20.000	$1,63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	-
8-25 Hz	20.000	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^4/f$	-
0,025-0,82 kHz	$500/f$	$20/f$	$25/f$	-
0,82-65 kHz	610	24,4	30,7	-
0,065-1 MHz	610	$1,6/f$	$2,0/f$	-
1-10 MHz	$610/f$	$1,6/f$	$2,0/f$	-
10-400 MHz	61	0,16	0,2	10
400-2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$0,01f^{1/2}$	$f/40$
2-300 GHz	137	0,36	0,45	50

Note:

- f è espressa nelle unità indicate nella prima colonna.
- I valori delle intensità di campo possono essere superati, purché siano rispettate le prescrizioni di base e si possano escludere effetti indiretti.
- Per frequenze tra 100 kHz e 10GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 e B^2 devono essere mediati su qualunque periodo di 6 minuti.
- Per i valori di picco a frequenze fino a 100 kHz si veda la Tabella 4, Nota 3.
- Per i valori di picco a frequenze superiori a 100 kHz si vedano le Figure 1 e 2. Tra 100 kHz e 10 MHz, i valori di picco per le intensità di campo si ottengono per interpolazione tra il valore di picco di 1,5 volte a 100 kHz e quello di 32 volte a 10 MHz. Per frequenze superiori a 10 MHz, si suggerisce che la densità di potenza di picco dell'onda piana equivalente, mediata sulla durata dell'impulso, non superi di 1000 volte la restrizione per S_{eq} , o che le intensità dei campi non superino di 32 volte i livelli forniti nella tabella.
- Per frequenze superiori a 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 e B^2 devono essere mediati su qualunque periodo i $68/f^{0.05}$ minuti (f in GHz).
- Non viene fornito nessun valore di campo elettrico per i campi a frequenze < 1 Hz, che sono in pratica campi elettrici statici. Le scosse da sorgenti a bassa impedenza si prevengono con procedure di sicurezza elettrica acquisite per questo genere di apparecchiature.

Tabella 7. Livelli di riferimento per l'esposizione del pubblico a campi elettrici e magnetici (valori efficaci imperturbati)

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (μT)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente S_{eq} (W/m^2)
fino a 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	-
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3-150 kHz	87	5	6,25	-
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	$1,375f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$0,0046f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Note:

1. f è espressa nelle unità indicate nella prima colonna.
2. I valori delle intensità di campo possono essere superati, purché siano rispettate le prescrizioni di base e si possano escludere effetti indiretti.
3. Per frequenze tra 100 kHz e 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 e B^2 devono essere mediati su qualunque periodo di 6 minuti.
4. Per i valori di picco a frequenze fino a 100 kHz si veda la Tabella 4, Nota 3.
5. Per i valori di picco a frequenze superiori a 100 kHz si vedano le Figure 1 e 2. Tra 100 kHz e 10 MHz, i valori di picco per le intensità di campo si ottengono per interpolazione tra il valore di picco di 1,5 volte a 100 kHz e quello di 32 volte a 10 MHz. Per frequenze superiori a 10 MHz, si suggerisce che la densità di potenza di picco dell'onda piana equivalente, mediata sulla durata dell'impulso, non superi di 1000 volte la restrizione per S_{eq} , o che le intensità dei campi non superino di 32 volte i livelli forniti nella tabella.
6. Per frequenze superiori a 10 GHz, S_{eq} , E^2 , H^2 e B^2 devono essere mediati su qualunque periodo i $68/f^{1.05}$ minuti (f in GHz).
7. Non viene fornito nessun valore di campo elettrico per i campi a frequenze < 1 Hz, che sono in pratica campi elettrici statici. Per la maggior parte delle persone non si manifestano effetti fastidiosi di percezione delle cariche elettriche superficiali a intensità di campo elettrico inferiori a 25 kV/m. Effetti di scarica che provochino stress o fastidio devono essere evitati.

Per quanto riguarda i campi a bassa frequenza, sono stati sviluppati diversi metodi di calcolo e di misura per ricavare i livelli di riferimento dai limiti di base. Le semplificazioni adottate fino ad ora non tenevano conto di fenomeni come la distribuzione disomogenea e l'anisotropia della conducibilità elettrica e di altre caratteristiche dei tessuti che sono importanti per questi calcoli.

La dipendenza dalla frequenza dei livelli di riferimento rispecchia sia quella degli effetti biologici, sia quella dell'accoppiamento del corpo con il campo.

I modelli per il campo magnetico assumono che il corpo abbia una conducibilità omogenea ed isotropa e prevede semplici circuiti circolari per stimare le correnti indotte in diversi organi e diverse regioni del corpo, come ad esempio la testa, usando per un campo puramente sinusoidale alla frequenza f la seguente equazione derivata dalla legge di induzione di Faraday:

$$J = \pi R f \sigma B \quad (4)$$

dove B è l'induzione magnetica e R è il raggio della spira considerata per l'induzione della corrente. Modelli più complessi usano un modello ellissoidale per rappresentare il tronco o l'intero corpo al fine di studiare le densità di corrente indotte sulla superficie del corpo (Reilly 1989, 1992).

Se, per semplicità, si assume una conducibilità omogenea di 0,2 S/m, un'induzione magnetica di 100 μT a 50 Hz genera densità di corrente tra 0,2 e 2 mA/m^2 nelle zone periferiche del corpo (CRP 1997). Secondo un'altra analisi (NIEHS 1996), livelli di esposizione di 100 μT a 60 Hz corrispondono a una densità di corrente media di 0,28 mA/m^2 , e ad un massimo locale di circa 2 mA/m^2 . Calcoli più realistici, basati su modelli dettagliati dal punto di vista anatomico ed elettrico (Xi e Stuchly 1994), indicano valori massimi della densità di corrente che superano 2 A/m^2 nel caso di un campo di 100 μT a 50 Hz. Tuttavia, la presenza di cellule biologiche influenza la distribuzione spaziale delle correnti e dei campi indotti, dando luogo a significative differenze sia nell'intensità (superiore di un fattore 2) sia nei percorsi delle correnti indotte rispetto a quanto previsto dalle analisi semplificate (Stuchly e Xi 1994).

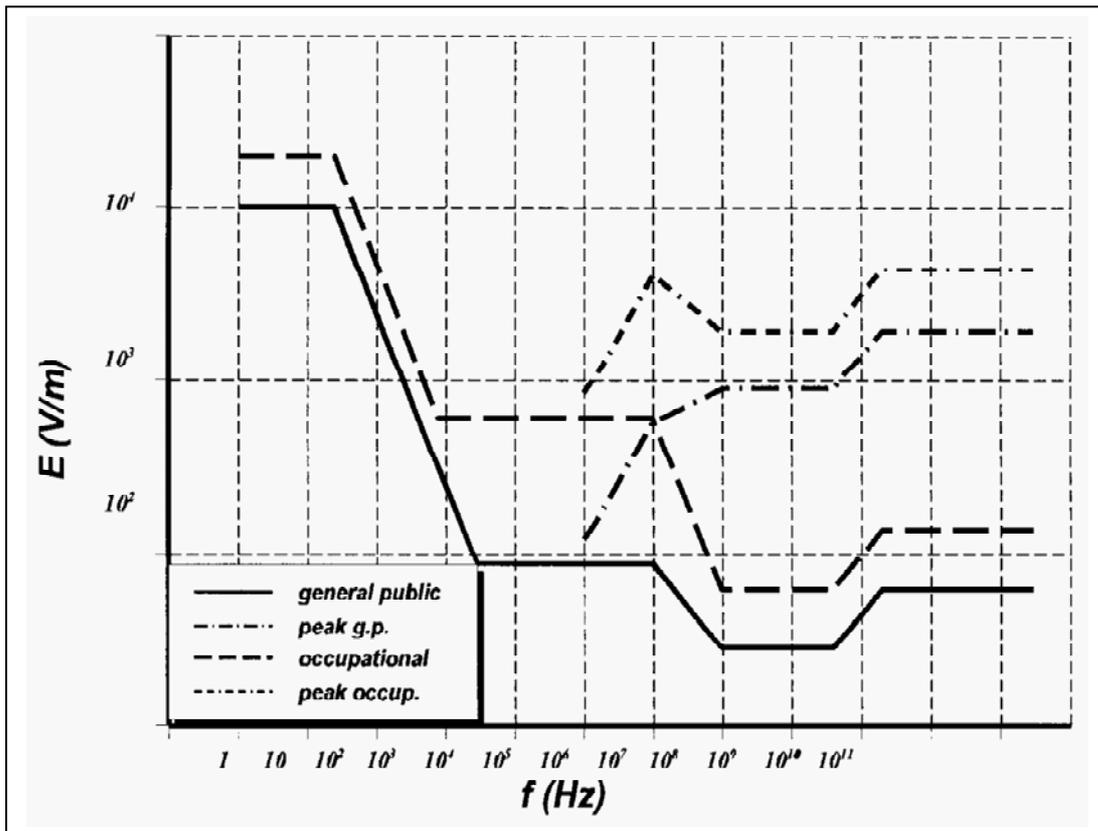


Figura 1. Livelli di riferimento per l'esposizione a campi elettrici variabili nel tempo (v. Tabelle 6 e 7)

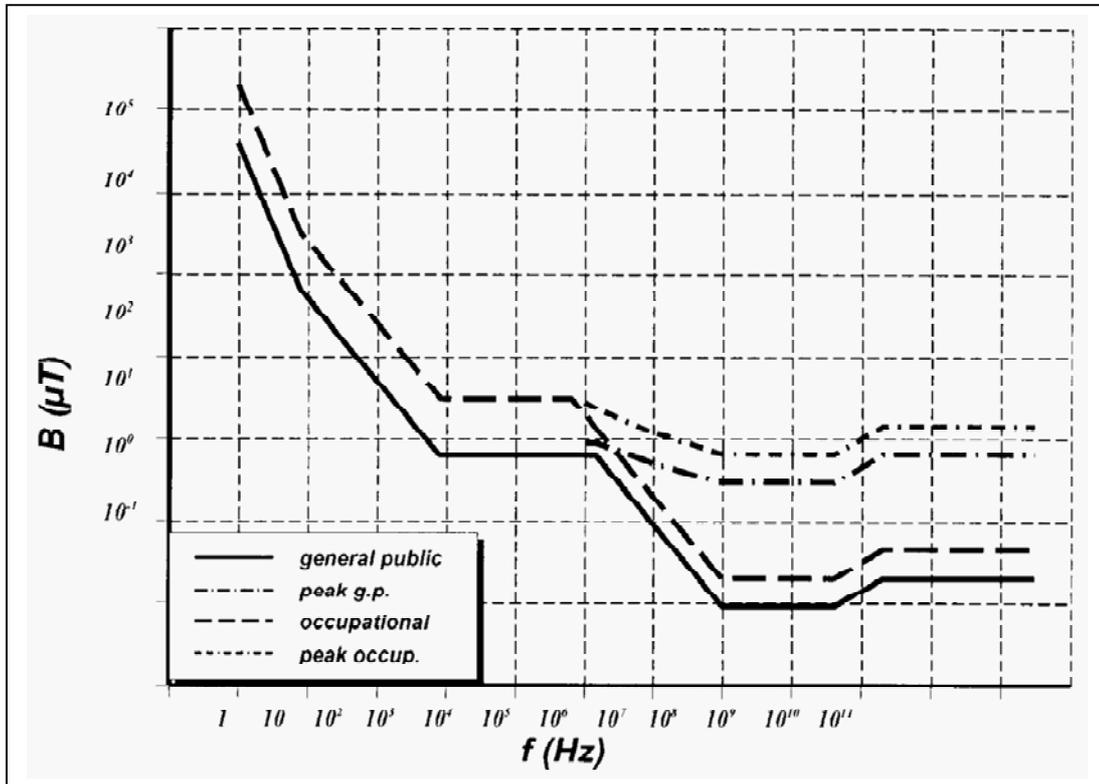


Figura 2. Livelli di riferimento per l'esposizione a campi magnetici variabili nel tempo (v. Tabelle 6 e 7)

I modelli per il campo elettrico devono tener conto del fatto che, secondo le condizioni di esposizione e secondo la taglia, la forma e la posizione del corpo esposto nel campo, la densità di carica superficiale può variare notevolmente dando luogo a una distribuzione variabile e disuniforme delle correnti all'interno del corpo. Per campi elettrici sinusoidali di frequenze inferiori a circa 10 MHz, il valore della densità di corrente indotta nel corpo aumenta con la frequenza. La densità di corrente è inversamente proporzionale alla sezione del corpo e può essere relativamente alta nel collo e nelle caviglie. Il livello di esposizione di 5 kV/m che costituisce il livello di riferimento per la popolazione corrisponde, nelle condizioni di esposizione più sfavorevoli, a una densità di corrente di circa 2 mA/m² nel collo e nel tronco del corpo esposto, se il vettore campo elettrico è parallelo all'asse del corpo (ILO 1994; CRP 1997). Comunque, la densità di corrente indotta da un campo elettrico di 5 kV/m rispetta i limiti di base nelle condizioni peggiori, ma realistiche.

Al fine di provare il rispetto dei limiti di base, i livelli di riferimento per il campo elettrico e per il campo magnetico devono essere considerati separatamente, e non additivamente. Ciò è dovuto al fatto che, ai fini protezionistici, le correnti indotte dal campo elettrico e da quello magnetico non sono additive.

Nel caso specifico di esposizioni professionali, a frequenze fino a 100 kHz, il campo elettrico dedotto come livello di riferimento può essere aumentato di un fattore 2, purché si possano escludere effetti di danno indiretto dovuti al contatto con conduttori elettricamente carichi.

A frequenze superiori a 10 MHz, i campi elettrici e magnetici sono stati dedotti dai limiti per il SAR nel corpo intero, utilizzando dati forniti dai calcoli o dagli esperimenti. Nel caso più pessimistico, l'accoppiamento in termini di energia raggiunge un massimo tra 20 MHz e qualche centinaio di MHz. In questo intervallo di frequenza, i livelli di riferimento assumono i loro valori più bassi. Le intensità del campo magnetico sono state calcolate da quelle del campo elettrico usando la relazione tra campo elettrico e magnetico valida per il campo lontano ($E/H = 377 \Omega$). In condizioni di campo vicino, le curve che rappresentano la dipendenza del SAR dalla frequenza non sono più valide; inoltre, i contributi del campo elettrico e di quello magnetico devono essere considerati separatamente. Per un'approssimazione cautelativa, si possono usare i livelli di riferimento anche per una valutazione in campo vicino, perché l'accoppiamento, in termini di energia, che deriva dai contributi del campo elettrico e del campo magnetico non può superare il limite di SAR. Per una valutazione meno cautelativa, si dovrebbero utilizzare i limiti di base del SAR per il corpo intero e su quello locale.

I livelli di riferimento per l'esposizione della popolazione sono stati ottenuti da quelli per l'esposizione professionale usando vari fattori per coprire l'intero intervallo di frequenze. Questi fattori sono stati scelti sulla base di effetti che sono stati riconosciuti come specifici e significativi nei vari intervalli di frequenza. In generale, questi fattori accompagnano i limiti di base su tutto l'intervallo di frequenza, ed il loro valore corrisponde ad una relazione matematica tra limiti di base e livelli di riferimento derivati, secondo quanto descritto di seguito:

- Nell'intervallo di frequenze fino a 1 kHz, i livelli di riferimento per la popolazione, per quanto riguarda il campo elettrico, sono metà di quelli stabiliti per l'esposizione professionale. Il valore di 10 kV/m per l'esposizione professionale a campi a 50 Hz, o quello di 8,3 kV/m a 60 Hz, includono un margine di sicurezza sufficiente a prevenire effetti di stimolazione derivanti da correnti di contatto, in tutte le possibili condizioni. Per i livelli di riferimento per la popolazione si sono scelti valori metà di quelli suddetti, cioè 5 kV/m per i 50

Hz e 4,2 kV/m per i 60 Hz, al fine di prevenire effetti negativi per oltre il 90% degli individui esposti;

- Nell'intervallo delle basse frequenze, fino a 100 kHz, i livelli di riferimento per la popolazione, per quanto riguarda il campo magnetico, sono fissati ad un valore 5 volte al di sotto di quello stabilito per l'esposizione professionale;
- Nell'intervallo di frequenza tra 100 kHz e 10 MHz, i livelli di riferimento per il campo magnetico, nel caso della popolazione, sono stati aumentati rispetto ai valori delle linee guida pubblicate dall'IRPA nel 1988. In quel documento, i livelli di riferimento per il campo magnetico erano calcolati da quelli per il campo elettrico usando la formula che collega E ed H in caso di campo lontano. Questi livelli di riferimento sono troppo cautelativi, perché il campo magnetico a frequenze inferiori a 10 MHz non contribuisce in modo significativo al rischio di scosse, ustioni o effetti di carica superficiale, che costituiscono la base principale per limitare l'esposizione professionale al campo elettrico in quell'intervallo di frequenza;
- Nell'intervallo delle alte frequenze, tra 10 MHz e 10 GHz, i livelli di riferimento per l'esposizione della popolazione a campi elettrici e magnetici sono inferiori di un fattore 2,2 rispetto a quelli stabiliti per l'esposizione professionale. Il fattore 2,2 corrisponde alla radice quadrata di 5, numero che costituisce il fattore di sicurezza tra i limiti di base per l'esposizione professionale e quella per la popolazione. La radice quadrata è introdotta per collegare le grandezze "intensità del campo" e "densità di potenza";
- Nell'intervallo delle alte frequenze comprese tra 10 e 300 GHz, i livelli di riferimento per la popolazione sono definiti in termini di densità di potenza, come i limiti di base, e sono ridotti di un fattore 5 rispetto a quelli per l'esposizione professionale;
- Sebbene siano disponibili poche informazioni sulle relazioni tra effetti biologici e valori di picco dei campi pulsati, si suggerisce che, per frequenze superiori a 10 MHz, la densità di potenza equivalente S_{eq} mediata sulla durata dell'impulso non superi di oltre 1000 volte i livelli di riferimento, ovvero che le intensità dei campi non superino di oltre 32 volte i corrispondenti livelli di riferimento riportati nelle tabelle 6 e 7 e mostrati nelle figure 1 e 2. Per frequenze tra 0,3 GHz e diversi gigahertz, e per l'esposizione localizzata della testa si deve limitare l'assorbimento specifico connesso agli impulsi, al fine di limitare o evitare effetti uditivi provocati dall'espansione termoelastica. In questo intervallo di frequenza, il valore di SA di 4-6 mJ/kg che costituisce la soglia per questo effetto corrisponde, nel caso di impulsi di 30 μ s, a valori di picco del SAR nel cervello

tra 130 e 520 W/kg. Tra 100 kHz e 10 MHz, i valori di picco si ottengono dai livelli di riferimento delle figure 1 e 2 attraverso un fattore moltiplicativo ottenuto per interpolazione tra quello pari a 1,5 a 100 kHz e quello pari a 32 a 10 MHz.

- Nelle tabelle 6 e 7, come pure nelle figure 1 e 2, appaiono diverse discontinuità nella dipendenza dalla frequenza dei livelli di riferimento per l'esposizione professionale e quella della popolazione. Ciò è conseguenza dei diversi fattori usati per ricavare i livelli di riferimento per la popolazione, mantenendo la stessa dipendenza dalla frequenza per i livelli professionali e per quelli validi per il pubblico generico.

LIVELLI DI RIFERIMENTO PER CORRENTI DI CONTATTO E CORRENTI INDOTTE

Nell'intervallo di frequenze fino a 110 MHz, che comprende la banda per le trasmissioni radiofoniche in modulazione di frequenza (FM), vengono forniti dei livelli di riferimento per la corrente di contatto, come misura precauzionale da adottare per evitare rischi di scosse e ustioni. I livelli di riferimento per contatti su aree puntiformi del corpo sono presentati nella Tabella 8. Poiché i livelli di soglia della corrente indotta per risposte biologiche in bambini o in donne adulte sono all'incirca la metà e due terzi, rispettivamente, di quello per gli uomini adulti, i livelli di riferimento per il pubblico sono stati fissati un fattore 2 al di sotto di quelli per l'esposizione dei lavoratori.

Tabella 8. Livelli di riferimento per correnti, variabili nel tempo, da 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	$0,4f$
	100 kHz-110 MHz	40
Esposizione del pubblico	fino a 2,5 kHz	0,5
	2,5-100 kHz	$0,2f$
	100 kHz-110 MHz	20

Nota: f è la frequenza in kHz.

Per l'intervallo di frequenze 10-110 MHz, vengono forniti dei livelli di riferimento per le correnti negli arti, che corrispondono a restrizioni di base inferiori a quelle sul SAR locale (v. Tabella 9).

Tabella 9. Livelli di riferimento per la corrente indotta in un qualunque arto a frequenze comprese tra 10 e 110 MHz

Caratteristiche dell'esposizione	Corrente (mA)
Esposizione professionale	100
Esposizione del pubblico	45

Note:

1. Il livello di riferimento per il pubblico è uguale a quello per l'esposizione professionale, diviso per 5.
2. Ai fini del rispetto della restrizione di base sul SAR locale, la radice quadrata della media temporale su qualunque periodo di 6 minuti del quadrato della corrente indotta è assunta come base per i livelli di riferimento.

ESPOSIZIONE SIMULTANEA A CAMPI DI FREQUENZE DIVERSE

E' importante stabilire se, nel caso di esposizioni simultanee a campi di frequenze diverse, i relativi effetti siano additivi. L'addittività deve essere esaminata separatamente per gli effetti termici e per la stimolazione elettrica, e si devono rispettare le restrizioni di base sotto indicate. Le formule qui riportate si applicano alle frequenze di interesse in situazioni pratiche di esposizione.

Per la stimolazione elettrica, che è significativa per frequenze fino a 10 MHz, le correnti indotte devono essere sommate secondo la formula:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1 \quad (5)$$

Per gli effetti termici, che sono significativi al di sopra di 100 kHz, i valori di SAR e di densità di potenza devono essere sommati secondo la formula:

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{10\text{GHz}} \frac{\text{SAR}_i}{\text{SAR}_L} + \sum_{i>10\text{GHz}}^{300\text{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1 \quad (6)$$

dove:

- J_i = densità di corrente indotta alla frequenza i ;
 $J_{L,i}$ = limite per la densità di corrente indotta alla frequenza i , come indicato nella Tab. 4;
 SAR_i = SAR causato dall'esposizione alla frequenza i ;
 SAR_L = Limite per il SAR dato nella Tab. 4;
 S_L = limite per la densità di potenza dato nella Tab. 5;
 S_i = densità di potenza alla frequenza i .

Per la pratica applicazione delle restrizioni di base, si devono usare i criteri che seguono per quanto riguarda i livelli di riferimento.

Per la densità di corrente indotta e per gli effetti di stimolazione elettrica, che sono significativi fino a 10 MHz, si applicano ai livelli di campo le due equazioni seguenti:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{MHz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1 \quad (7)$$

e

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad (8)$$

dove:

- E_i = intensità del campo elettrico alla frequenza i ;
 $E_{L,i}$ = livello di riferimento per il campo elettrico, come indicato nelle Tabelle 6 e 7;
 H_j = intensità del campo magnetico alla frequenza j ;
 $H_{L,j}$ = livello di riferimento per il campo magnetico, come indicato nelle Tabelle 6 e 7;
 a = 610 V/m per l'esposizione lavorativa e 87 V/m per quella del pubblico;
 b = 24,4 A/m (30,7 μ T) per l'esposizione lavorativa e 5 A/m (30,7 μ T) per quella del pubblico.

Le costanti a e b sono utilizzate al di sopra di 1 MHz per il campo elettrico ed al di sopra di 65 kHz per il campo magnetico, perché la somma si basa sulle densità di corrente indotta e non deve essere confusa con considerazioni termiche. Queste ultime costituiscono la base per i limiti $E_{L,i}$ e $H_{L,j}$, rispettivamente al di sopra di 1 MHz e di 65 kHz, che sono riportati nelle Tabelle 6 e 7.

Per le considerazioni termiche, che sono rilevanti al di sopra di 100 kHz, si devono applicare alle intensità di campo le due equazioni seguenti:

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{c}\right)^2 + \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2 \leq 1 \quad (9)$$

e

$$\sum_{j=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{H_j}{d}\right)^2 + \sum_{j>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}}\right)^2 \leq 1 \quad (10)$$

dove:

- E_i = intensità del campo elettrico alla frequenza i ;
 $E_{L,i}$ = livello di riferimento per il campo elettrico, come indicato nelle Tabelle 6 e 7;
 H_j = intensità del campo magnetico alla frequenza j ;
 $H_{L,j}$ = livello di riferimento per il campo magnetico, come indicato nelle Tabelle 6 e 7;
 a = $610/f$ V/m (f in MHz) per l'esposizione lavorativa e $87/f^{1/2}$ V/m per quella del pubblico;
 b = $16/f$ A/m (f in MHz) per l'esposizione lavorativa e $0,73/f$ A/m per quella del pubblico.

Per le correnti negli arti e per la corrente di contatto si devono applicare, rispettivamente, le regole seguenti:

$$\sum_{k=10MHz}^{110MHz} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1 \qquad \sum_{n=1Hz}^{110MHz} \frac{I_n}{I_{C,n}} \leq 1 \qquad (11)$$

dove:

- I_k = componente alla frequenza k della corrente negli arti;
 $I_{L,k}$ = livello di riferimento per la corrente negli arti (v. Tab. 9);
 I_n = componente alla frequenza n della corrente di contatto;
 $I_{C,n}$ = livello di riferimento per la corrente di contatto alla frequenza n (v. Tab. 8);

Le formule di somma sopra riportate sono state ricavate assumendo le condizioni peggiori per i campi alle diverse frequenze. Di conseguenza, situazioni tipiche di esposizione possono in pratica richiedere livelli di esposizione meno restrittivi di quelli indicati dalle formule per i livelli di riferimento.

MISURE PROTETTIVE

L'ICNIRP fa notare che spetta alle industrie che causano esposizioni a campi elettrici e magnetici la responsabilità di garantire il rispetto di tutto quanto è previsto dalle linee guida.

Le misure di protezione per i lavoratori comprendono controlli tecnici e amministrativi, programmi di protezione personale e sorveglianza medica (ILO 1994). Appropriate misure di protezione devono essere messe in pratica quando le esposizioni sui luoghi di lavoro diano luogo ad un superamento delle restrizioni di base. Come primo passo, si dovrebbero adottare, ove possibile, controlli tecnici per ridurre le emissioni delle apparecchiature a livelli accettabili. Questi controlli comprendono la previsione di buone misure di sicurezza in fase progettuale e, se necessario, l'uso di interblocchi o altri meccanismi di protezione simili.

Assieme a quelli tecnici, si dovrebbero impiegare controlli amministrativi, come limitazioni di accesso e uso di segnalatori sonori e visivi. Dispositivi di protezione personale, come indumenti isolanti, anche se utili in certe circostanze, dovrebbero essere considerati come misura ultima per assicurare la sicurezza dei lavoratori, dando la precedenza, ove possibile, alle misure tecniche e amministrative. Inoltre, anche quando si usano oggetti come guanti isolanti per proteggere le persone da scosse e ustioni, non si devono comunque violare le restrizioni di base, perché l'isolamento protegge soltanto dagli effetti indiretti dei campi.

Ad eccezione degli indumenti protettivi e di altre forme di protezione personale, le stesse misure possono applicarsi al pubblico in generale, tutte le volte che vi sia la possibilità di un superamento dei livelli di riferimento per la popolazione. E' anche essenziale stabilire e mettere in pratica regole che impediscano:

- interferenze con dispositivi medici (compresi i pacemaker cardiaci);
- attivazione di dispositivi elettrici per esplosivi (detonatori);
- incendi ed esplosioni conseguenti a scintille causate, presso materiali infiammabili, da campi indotti, correnti di contatto o scariche elettriche.

Ringraziamenti - L'ICNIRP ringrazia per il supporto ricevuto l'Associazione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni, l'Organizzazione Mondiale della Sanità, il Programma Ambientale delle Nazioni Unite, l'Ufficio Internazionale del Lavoro, la Commissione Europea ed il Governo tedesco.

Durante la preparazione di questo documento, l'ICNIRP ha avuto la collaborazione dei seguenti esperti esterni: S. Allen (Regno Unito), J. Brix (Germania), S. Eggert (Germania), H. Garn (Austria), K. Jokela (Finlandia), H. Korniewicz (Polonia), G.F. Mariutti (Italia), R. Saunders (Regno Unito), S. Tofani (Italia), P. Vecchia (Italia), E. Vogel (Germania). La Commissione è grata per i molti, validi commenti forniti da altri esperti internazionali.

BIBLIOGRAFIA

- Adair, E. R.; Adams, B. W.; Akel, G. M. Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior. *Bioelectromagnetics* 5:13-30; 1984.
- Adair, E. R.; Adams, B. W. Microwaves modify thermoregulatory behavior in squirrel monkey. *Bioelectromagnetics*; 1:1-20; 1980.
- Albert, E. N.; Slaby, F.; Roche, J.; Loftus, J. Effect of amplitude modulated 147 MHz radiofrequency radiation on calcium ion efflux from avian brain tissue. *Radiat. Res*; 109:19-27; 1987.
- Allen, S. G.; Bernhardt, J. H.; Driscoll, C. M. H.; Grandolfo, M.; Mariutti, G. F.; Matthes, R.; McKinlay, A. F.; Steinmetz, M.; Vecchia, P.; Whillock, M. Proposals for basic restrictions for protection against occupational exposure to electromagnetic non-ionizing radiations. Recommendations of an International Working Group set up under the auspices of the Commission of the European Communities. *Phys. Med.*; VII:77-89; 1991.

- American Conference of Government Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH; American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 1996.
- Astumian, R. D.; Weaver, J. C.; Adair, R. K. Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells. *PNAS*; 92:3740–3743; 1995
- Balcer-Kubiczek, E. K.; Harrison, G. H. Neoplastic transformation of C3H/10T1/2 cells following exposure to 120 Hz modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. *Radiation Res.*; 126:65–72; 1991.
- Baris, D.; Armstrong, B. G.; Deadman, J.; Thériault, G. A mortality study of electrical utility workers in Quebec. *Occ. Environ. Med.*; 53:25–31; 1996.
- Barron, C. I.; Baraff, A. A. Medical considerations of exposure to microwaves (radar). *J. Am. Med. Assoc.*; 168:1194–1199; 1958.
- Baum, A.; Mevissen, M.; Kamino, K.; Mohr, U.; Löscher, W. A histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 μ T magnetic field exposure. *Carcinogenesis*; 16:119–125; 1995.
- Bawin, S. M.; Gavalas-Medici, R. J.; Adey, W. R. Reinforcement of transient brain rhythms by amplitude modulated VHF fields. In: *Biological and clinical effects of low frequency magnetic and electric fields* (Llaurado, J. G.; Sances, A.; Battocletti, J. H., eds.). Springfield, IL, Charles C. Thomas:172–186; 1974.
- Bawin, S. M.; Kaczmarek, L. K.; Adey, W. R. Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann. NY Acad. Sci.*; 274:74–81; 1975.
- Beall, C.; Delzell, E.; Cole, P.; Brill, I. Brain tumors among electronics industry workers. *Epidemiology*; 7:125–130; 1996.
- Beniashvili, D. S.; Bilanishvili, V. G.; Menabde, M. Z. The effect of low-frequency electromagnetic fields on the development of experimental mammary tumors. *Vopr. Onkol.*; 37:937–941; 1991.
- Bergqvist, U. Pregnancy outcome and VDU work — a review. In: Luczak, H.; Cakir, A.; An Cakir, G., eds. *Work with Display Units '92 — Selected Proceedings of the 3rd International Conference WWDO '92, Berlin Germany 1–4 Sept. 1992*. Amsterdam, Elsevier, 70–76; 1993.
- Bernhardt, J. H. The direct influence of electromagnetic fields on nerve and muscle cells of man within the frequency range of 1 Hz to 30 MHz. *Radiat. Environ. Biophys.*; 16:309–323; 1979.
- Bernhardt, J. H. The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effect. *Radiat. Environ. Biophys.*; 27:1–27; 1988.
- Bernhardt, J. H. Basic criteria of ELF-standards: world-wide achievement in public and occupational health protection against radiation. *Proceedings of the Eighth*

- International Congress of the International Radiation Protection Association, 933–936; 1992.
- Blackman, C. F.; Elder, J. A.; Weil, C. M.; Benane, S. G.; Eichinger, D. C.; House, D. E. Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation: effects of modulation frequency and field strength. *Radio Sci.*; 14:93–98; 1979.
- Blank, M., ed. *Electromagnetic fields: biological interactions and mechanisms*. Washington, DC; American Chemical Society Press; 1995 .
- Bracken, M. B.; Belanger, K.; Hellenbrand, K.; Dlugosz, L.; Holford, T. R.; McSharry, J. E.; Adesso, K.; Leaderer, B. Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth. *Epidemiol.*; 6:263–270; 1995.
- Brent, R. L.; Beckman, D. A.; Landel, C. P. Clinical teratology. *Curr. Opin. Pediatr.*; 5:201–211; 1993.
- Byus, C. V.; Lundak, R. L.; Fletcher, R. M.; Adey, W. R. Alterations in protein kinase activity following exposure of cultured human lymphocytes to modulated microwave fields. *Bioelectromagnetics*; 5:341–351; 1984.
- Byus, C. V.; Pieper, S. E.; Adey, W. R. The effects of low-energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis*; 8:1385–1389; 1987.
- Byus, C. V.; Kartun, K.; Pieper, S.; Adey, W. R. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Res.*; 48:4222–4226; 1988.
- Chatterjee, I.; Wu, D.; Gandhi, O. P. Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazards analysis in the VLF-MF band. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-33:486–494; 1986.
- Chen, J. Y.; Gandhi, O. P. Thermal implications of high SARs in the body extremities at the ANSI-recommended MF-VHF safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-35: 435–441; 1988.
- Chernoff, N.; Rogers, J. M.; Kavet, R. A review of the literature on potential reproductive and developmental toxicity of electric and magnetic fields. *Toxicology*; 74:91–126; 1992.
- Chou, C.-K.; Guy, A. W.; Kunz, L. I.; Johnson, R. B.; Crowley, J. J.; Krupp, J. H. Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics*; 13:469–496; 1992.
- Cohen, B. H.; Lillienfield, A. M.; Kramer, A. M.; Hyman, L. C. C. Parental factors in Down's syndrome: results of the second Baltimore case control study. In: *Population cytogenetics —studies in humans* (Hook, E. B; Porter, I. H., eds.). New York, Academic Press; 301–352; 1977.

- Coleman, M. P.; Bell, C. M. J.; Taylor, H. L.; Primic-Zakelj, M. Leukemia and residence near electricity transmission equipment: a case-control study. *Br. J. Cancer*; 60:793–798; 1989.
- Commission on Radiological Protection. Protection against low-frequency electric and magnetic fields in energy supply and use. Recommendation, approved on 16th / 17th February 1995. In: *Berichte der Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 7*. Stuttgart, Fischer; 1997.
- Cook, M. R.; Graham, C.; Cohen, H. D.; Gerkovich, M. M. A replication study of human exposure to 60-Hz fields: effects on neurobehavioral measures. *Bioelectromagnetics*; 13:261–285; 1992.
- Cridland, N. A. Electromagnetic fields and cancer: a review of relevant cellular studies. Chilton, UK; National Radiological Protection Board; Report NRPB-R256; 1993.
- Daels, J. Microwave heating of the uterine wall during parturition. *Obstet. Gynecol.*; 42:76–79; 1973.
- Daels, J. Microwave heating of the uterine wall during parturition. *J. Microwave Power*; 11:166–167; 1976.
- D’Andrea, J. A.; DeWitt, J. R.; Gandhi, O. P.; Stensaas, S.; Lords, J. L.; Neilson, H. C. Behavioral and physiological effects of chronic 2450-MHz microwave irradiation of the rat at 0.5 mW/cm². *Bioelectromagnetics*; 7:45–56; 1986.
- De Lorge, J. O.; Ezell, C. S. Observing responses of rats exposed to 1.28- and 5.62-GHz microwaves. *Bioelectromagnetics*; 1:183–198; 1980.
- Demers, P. A.; Thomas, D. B.; Sternhagen, A.; Thompson, W. D.; Curnen, M. G. M.; Satariano, W.; Austin, D. F.; Issacson, P.; Greenberg, R. S.; Key, C.; Kolonel, L. K.; West, D. W. Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am. J. Epidemiol.*; 132:775–776; 1991.
- Dimbylow, P. J. FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. *Phys. Med. Biol.*; 42:479–490; 1997.
- Dimbylow, P. J.; Mann, S. M. SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phys. Med. Biol.*; 39:1537–1553; 1994.
- DIN VDE 0848, Teil 1, Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Mess und Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag, Berlin; 1995.
- Dolk, H.; Shaddick, H.; Walls, P.; Grundy, C.; Thakrar, B.; Kleinschmidt, I.; Elliot, P. Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part I. Sutton Coldfield Transmitter. *Am. J. Epidemiol.*; 145:1–9; 1997a.

- Dolk, H.; Elliot, P.; Shaddick, G.; Walls, P.; Thakrar, B. Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part II. All high-power transmitters. *Am. J. Epidemiol.*; 145:10–17; 1997b.
- Durney, C. H.; Massoudi, H.; Iskander, M. F. Radiofrequency radiation dosimetry handbook, Reg. No. SAM-TR-85-73. U.S. Air Force School of Aerospace, Medical Division, Brooks Air Force Base, Texas; 1985.
- Feychting, M.; Ahlbom, A. Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.*; 138:467–481; 1993.
- Feychting, M.; Ahlbom, A. Magnetic fields, leukemia, and central nervous system tumors in Swedish adults residing near high-voltage power lines. *Epidemiology*; 5:501–509; 1994.
- Feychting, M.; Kaune, T.W.; Savitz, D.A.; Ahlbom, A. Estimating exposure in studies on residential magnetic fields and cancer. *Epidemiology*; 7:220–224; 1996.
- Floderus, B.; Persson, T.; Stenlund, C.; Wennberg, A.; Ost, A.; Knave, B. Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden. *Cancer Causes and Control*; 4:465–476; 1993.
- Frey, A. M. Auditory system response to radiofrequency energy. *Aerospace Med.*; 32:1140–1142; 1961.
- Frey, A. M.; Messenger, R. Human perception of illumination with pulsed ultra-high-frequency electromagnetic radiation. *Science*; 181:356–358; 1973.
- Fulton, J. P.; Cobb, S.; Preble, L.; Leone, L.; Forman, E. Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am. J. Epidemiol.*; 111:292–295; 1980.
- Gandhi, O. P.; Chen, J. Y.; Riazi, A. Current induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0–50 MHz and for RF sealers. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-33(8):757–767; 1986.
- Gandhi, O. P. Some numerical methods for dosimetry: extremely low frequencies to microwave frequencies. *Radio Science*; 30:161–177; 1995.
- Goodman, R.; Bassett, C. A.; Henderson, A. S. Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription. *Science*; 220:1283–1285; 1983.
- Goodman, R.; Henderson, A. S. Exposure of salivary gland cells to low-frequency electromagnetic fields alters polypeptide synthesis. *Proc. Nat. Acad. Sci.*; 85:3928–3232; 1988.
- Goodman, R.; Henderson, A. S. Transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 25:335–355; 1991.
- Graham, C.; Cook, M. R.; Cohen, H. D.; Gerkovich, M. M. Dose response study of human exposure to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 15:447–463; 1994.

- Graham, C.; Cook, M. R.; Riffle, D. W.; Gerkovich, M. M.; Cohen, H. D. Nocturnal melatonin levels in human volunteers exposed to intermittent 60 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 17:263–273; 1996.
- Graham, C.; Cook, M. R.; Riffle, D. W. Human melatonin during continuous magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*; 18:166–171; 1997.
- Grayson, J. K. Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force: a nested case-control study. *Am. J. Epidemiol.*; 143:480–486; 1996.
- Greene, J. J.; Skowronski, W. J.; Mullins, J. M.; Nardone, R. M. Delineation of electric and magnetic field effects of extremely low frequency electromagnetic radiation on transcription. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*; 174:742–749; 1991.
- Guénel, P.; Nicolau, J.; Imbernon, E.; Chevalier, A.; Goldberg, M. Exposure to 50-Hz electric field and incidence of leukemia, brain tumors, and other cancers among French electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 144:1107–21; 1996.
- Gurney, J. G.; Mueller, B. A.; Davis, S.; Schwartz, S. M.; Stevens, R. G.; Kopecky, K. J. Childhood brain tumor occurrence in relation to residential power line configuration, electric heating sources, and electric appliance use. *Am. J. Epidemiol.*; 143:120–128; 1996.
- Guy, A. W.; Lin, J. C.; Kramar, P. O.; Emery, A. Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique*, MTT-23:492–498; 1975.
- Heath, C. W. Jr. Electromagnetic field exposure and cancer: a review of epidemiologic evidence. *Ca. Cancer J. Clin.*; 46:29–44; 1996.
- Hocking, B.; Gordon, I. R.; Grain, M. L.; Hatfield, G. E. Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med. J. Australia*; 165:601–605; 1996.
- Hoque, M.; Gandhi, O. P. Temperature distributions in the human leg for VLF-VHF exposures at the ANSI-recommended safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; 35:442–449; 1988.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.*; 66:100–106; 1994.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Phys.*; 70:587–593; 1996.
- International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. Oxford, Pergamon Press; ICRP Publication 66, 1994.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York, Institute of Electrical and Electronic Engineers; (IEEE C95.1-1991); 1992.

- International Labour Organisation. Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva, International Labour Office; (Occupational Safety and Health Series, No. 69); 1994.
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Phys.*; 54:115–123; 1988.
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. *Health Phys.*; 58:113–121; 1990.
- Jokela, K.; Puranen, L.; Gandhi, O. P. Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. *Health Phys.*; 66:237–244; 1994.
- Källén, B.; Malmquist, G.; Moritz, U. Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: Is non-ionizing radiation a fetal hazard? *Arch. Environ. Health*; 37:81–85; 1982.
- Kamimura, Y.; Sato, K.; Saiga, T.; Amemiya, Y. Effects of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans. Communications*, E77-B:762–765; 1994.
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Diaz Ricci, J. C.; Kirschvink, S. J. Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; Suppl. 1:101–113; 1992a.
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Woodford, B. J. Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc. Nat. Acad. Sci.*; 89:7683–7687; 1992b.
- Kues, H. A.; Hirst, L. W.; Luty, G. A.; D'Anna, S. A.; Dunkelberger, G. R. Effects of 2.45-GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics*; 6:177–188; 1985.
- Kuster, N.; Balzano, Q. Energy absorption mechanisms by biological bodies in the near-field of dipole antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VT-42:17–23; 1992.
- Lacy-Hulbert, A.; Wilkins, R. C.; Hesketh, T. R.; Metcalfe, J. C. No effect of 60 Hz electromagnetic fields on MYC or beta-actin expression in human leukemic cells. *Rad Res.*; 144:9–17; 1995.
- Lai, H.; Singh, N. P. Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*; 16:207–210; 1995.
- Lai, H.; Singh, N. P. Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radiation Biol.*; 69:513–521; 1996.
- Larsen, A. I.; Olsen, J.; Svane, O. Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists. *Scand. J. Work Environ. Health*; 17:324–329; 1991.

- Li, D.; Ceckoway, H.; Mueller, B. A. Electric blanket use during pregnancy in relation to the risk of congenital urinary tract anomalies among women with a history of subfertility. *Epidemiology*; 6:485–489; 1995.
- Li, C. Y.; Thériault, G.; Lin, R. S. Epidemiological appraisal of studies of residential exposure to power frequency magnetic fields and adult cancers. *Occup. Environ. Med.*; 53:505–510; 1996.
- Liburdy, R. P. Biological interactions of cellular systems with time-varying magnetic fields. *Ann. NY Acad. Sci.*; 649:74–95; 1992.
- Lillienfeld, A. M.; Tonascia, J.; Tonascia, S.; Libauer, C. A.; Cauthen, G. M. Foreign service health status study — evaluation of health status of foreign service and other employees from selected eastern European posts. Final report. Washington, DC, Department of State; Contract No. 6025-619073, NTIS PB-288163; 1978.
- Lin, J. C. Microwave auditory effects and applications. Springfield, IL, Charles C. Thomas; 1978.
- Lindbohm, M. L.; Hietanen, M.; Kyörönen, P.; Sallmen, M.; van Nandelstadh, P.; Taskinen, H.; Pekkarinen, M.; Ylikoski, M.; Hemminki, K. Magnetic fields of video display terminals and spontaneous abortion. *Am. J. Epidemiol.*; 136:1041–1051; 1992.
- Linnet, M. S.; Hatch, E. E.; Kleinerman, R. A.; Robinson, L. L.; Kaune, W. T.; Friedman, D. R.; Severson R. K.; Haines, C. M.; Hartsock, C. T.; Niwa, S.; Wacholder, S.; Tarone, R.E. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *New Eng. J. Med.*; 337:1–7; 1997.
- Litovitz, T. A.; Krause, D.; Mullins, J. M. Effect of coherence time of the applied magnetic field on ornithine decarboxylase activity. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*; 178(3):862–865; 1991.
- Litovitz, T. A.; Montrose, C. J.; Wang, W. Dose-response implications of the transient nature of electromagnetic-field-induced bioeffects: theoretical hypotheses and predictions. *Bioelectromagnetics*; Suppl. 1:237–246; 1992.
- Litovitz, T. A.; Krause, D.; Penafiel, M.; Elson, E. C.; Mullins, J. M. The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics*; 14:395–403; 1993.
- Löscher, W.; Mevissen, M.; Lehmacher, W.; Stamm, A. Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field. *Cancer Letters*; 71:75–81; 1993.
- Löscher, W.; Mevissen, M. Linear relationship between flux density and tumor co-promoting effect of prolonging magnetic exposure in a breast cancer model. *Cancer Letters*; 96:175-180; 1995.

- Lövsund, P.; Öberg, P.; Nilsson, S. E. G. Magneto- and electrophosphenes: a comparative study. *Med. Biol. Eng. Computing*; 18:758–764; 1980.
- London, S. J.; Thomas, D. C.; Bowman, J. D.; Sobel, E.; Cheng, T. C.; Peters, J. M. Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am. J. Epidemiol.*; 134:923–937; 1991.
- Loomis, D. P.; Savitz, D. A.; Ananth, C. V. Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *J. Nat. Cancer Inst.*; 86:921–925; 1994.
- Lyle, D. B.; Schechter, P.; Adey, W. R.; Lundak, R. L. Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to sinusoidally amplitude-modulated fields. *Bioelectromagnetics*; 4:281–292; 1983.
- Magin, R. L.; Liburdy, R. P.; Persson, B. Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Ann. NY Acad. Sci.*; 649; 1992.
- Matanoski, G. M.; Breyse, P. N.; Elliott, E. A. Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet*; 337:737; 1991.
- McCann, J.; Dietrich, F.; Rafferty, C.; Martin, A. A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutation Res.*; 297:61–95; 1993.
- McDowall, M. Mortality in persons resident in the vicinity of electricity transmission facilities. *Br. J. Cancer*; 53; 271–279; 1985.
- McKinlay, A. F.; Andersen, J. B.; Bernhardt, J. H.; Grandolfo, M.; Hossmann, K. A.; Mild, K. H.; Swerdlow, A. J.; Van Leeuwen, M.; Verschaeve, L.; Veyret, B. Radiotelephones and human health— proposal for a European research programme. Report of a European Commission Expert Group. Brussels, European Commission Directorate General XIII; 1996.
- McLean, J.; Stuchly, M. A.; Mitchel, R. E.; Wilkinson, D.; Yang, H.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Schunk, M.; Callary, E.; Morrison, D. Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field: II. Tumor development and immune response. *Bioelectromagnetics*; 12:273–287; 1991.
- Mevissen, M.; Stamm, A.; Buntenkötter, S.; Zwingelberg, R.; Wahnschaffe, U.; Löscher, W. Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics*; 14:131–143; 1993.
- Mevissen, M.; Kietzmann, M.; Löscher, W. In vivo exposure of rats to weak alternating magnetic field increases ornithine decarboxylase activity in the mammary gland by a similar extent as the carcinogen DMBA. *Cancer Letters*; 90:207–214; 1995.
- Michaelis, J.; Schüz, J.; Meinert, R.; Menger, M.; Grigat, J. P.; Kaatsch, P.; Kaletsch, U.; Miesner, A.; Stamm, A.; Brinkmann, K.; Kärner, H. Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes and Control*; 8:167–174; 1997.

- Michaelson, S. M. Biological effects and health hazards of RF and MW energy: fundamentals and overall phenomenology. In: Grandolfo, M.; Michaelson, S. M.; Rindi, A., eds. Biological effects and dosimetry of nonionizing radiation. New York, Plenum Press; 337–357; 1983.
- Michaelson, S. M.; Elson, E. C. Modulated fields and ‘window’ effects. In: Polk, C.; Postow, E., eds. Biological effects of electromagnetic fields. Boca Raton, FL, CRC Press; 435–533; 1996.
- Milham, S., Jr. Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *New Engl. J. Med.*; 307:249; 1982.
- Miller, A. B.; To, T.; Agnew, D. A.; Wall, C.; Green, L. M. Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 144:150–160; 1996.
- Murphy, J. C.; Kaden, D. A.; Warren, J.; Sivak, A. Power frequency electric and magnetic fields: a review of genetic toxicology. *Mutation Res.*; 296:221–240; 1993.
- Myers, A.; Cartwright, R. A.; Bonnell, J. A.; Male, J. C.; Cartwright, S. C. Overhead power lines and childhood cancer. International Conference of Electric and Magnetic Fields in Medicine and Biology, London, December 4–5, 126; IEEE Conf. Publ. No. 257; 1985
- National Academy of Science/National Research Council. Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields. Washington, DC, National Academy Press; 1996
- National Council on Radiation Protection. Radiofrequency electromagnetic fields. Properties, quantities and units, biophysical interaction, and measurement. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 67; 1981.
- National Council on Radiation Protection. A practical guide to the determination of human exposure to radiofrequency fields. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 119; 1993
- National Radiological Protection Board. Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: III: Radiofrequency and microwave radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; Report R-240; 1991.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 3(1); 1992.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Summary of the views of the Advisory Group on Non-ionising Radiation on epidemiological studies published since its 1992 report. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 4(5); 1993.

- National Radiological Protection Board. Health effects related to the use of visual display units. Report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 5(2); 1994a.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Supplementary report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation of 12 April 1994. *Radiol. Prot. Bull.*; 154:10–12; 1994b.
- Olsen, J. H.; Nielsen, A.; Schulgen, G. Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children. *Danish Cancer Registry, AG-NIR*:1–26; 1993.
- Oak Ridge Associated Universities. Health effects of low-frequency electric and magnetic fields. Oak Ridge, Oak Ridge Associated Universities, TE; ORAU 92/F9; 1992.
- Ouellet-Hellstrom, R.; Stewart, W. F. Miscarriages among female physical therapists, who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation. *Am. J. Epidemiol.*; 138:775–786; 1993.
- Phillips, J. L.; Haggren, W.; Thomas, W. J.; Ishida-Jones, T.; Adey, W. R. Magnetic field-induced changes in specific gene transcription. *Biochim. Biophys. Acta*; 1132:140–144; 1992.
- Polk, C.; Postow, E. *Biological effects of electromagnetic fields*, 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC Press; 1996.
- Polson, M. J. R.; Barker, A. T.; Freeston, I. L. Stimulation of nerve trunks with time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*; 20:243–244; 1982.
- Postow, E.; Swicord, M. L. Modulated fields and ‘window’ effects. In: *Handbook of biological effects of electromagnetic fields* (Polk, C.; Postow, E., eds.). Boca Raton, FL, CRC Press; 535–580; 1996.
- Preston-Martin, S.; Peters, J. M.; Yu, M. C.; Garabrant, D. H.; Bowman, J. D. Myelogenous leukemia and electric blanket use. *Bioelectromagnetics*; 9:207–213; 1988.
- Preston-Martin, S.; Navidi, W.; Thomas, D.; Lee, P. J.; Bowman, J.; Pogoda, J. Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am. J. Epidemiol.*; 143:105–119; 1996a.
- Preston-Martin, S.; Gurney, J. G.; Pogoda, J. M.; Holly, E. A.; Mueller, B. A. Brain tumor risk in children in relation to use of electric blankets and water bed heaters: results from the United States West Coast Childhood Brain Tumor Study. *Am. J. Epidemiol.*; 143:1116–1122; 1996b.
- Ramsey, J. D.; Kwon, Y. C. Simplified decision rules for predicting performance loss in the heat. In: *Proceedings Seminar on heat stress indices*. Luxembourg, CEC 337; 1988.
- Rannug, A.; Ekström, T.; Mild, K. H.; Holmberg, B.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. A study on skin tumour formation in mice with 50 Hz magnetic field exposure. *Carcinogenesis*; 14:573–578; 1993a.

- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekström, T.; Mild, K. H. Rat liver foci study on coexposure with 50 Hz magnetic fields and known carcinogens. *Bioelectromagnetics*; 14:17–27; 1993b.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Mild, K. H. A rat liver foci promotion study with 50-Hz magnetic fields. *Environ. Res.*; 62:223–229; 1993c.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekström, T.; Mild, K. H.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. Intermittent 50 Hz magnetic field and skin tumour promotion in Sencar mice. *Carcinogenesis*; 15:153–157; 1994.
- Reilly, J. P. Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: exposure to time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*; 3:101–109; 1989.
- Reilly, J. P. *Electrical stimulation and electropathology*. Cambridge, Cambridge University Press; 1992.
- Repacholi, M. H. Low-level exposure to radiofrequency fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*; 19:1-19; 1998.
- Repacholi, M. H.; Stolwijk, J. A. J. Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. *Rad. Protect. Austral.*; 9:79–84; 1991.
- Repacholi, M. H.; Cardis, E. Criteria for EMF health risk assessment. *Rad. Protect. Dosim.*; 72:305-312; 1997.
- Repacholi, M. H.; Basten, A.; Gebiski, V.; Noonan, D.; Finnie, J.; Harris, A. W. Lymphomas in $E\mu$ -Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Rad. Res.*; 147:631–640; 1997.
- Robinette, C. D.; Silverman, C.; Jablon, S. Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar). *Am. J. Epidemiol.*; 112:39–53; 1980.
- Rothman, K. J.; Chou, C. K.; Morgan, R.; Balzano, Q.; Guy, A. W.; Funch, D. P.; Preston-Martin, S.; Mandel, J.; Steffens, R.; Carlo, G. Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research. *Epidemiology*; 7:291–298; 1996a.
- Rothman, K. J.; Loughlin, J. E.; Funch, D. P.; Dreyer, N. A. Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology*; 7:303–305; 1996b.
- Ruppe, I.; Hentschel, K.; Eggert, S.; Goltz, S. Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung von 50 Hz Magnetfeldern. *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin*, Bf 11.003; 1995 (in German).
- Saffer, J. D.; Thurston, S. J. Cancer risk and electromagnetic fields. *Nature*; 375:22–23; 1995.
- Salford, L. G.; Brun, A.; Eberhardt, J. L. Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 30:313–318; 1993.
- Sander, R.; Brinkmann, J.; Kühne, B. Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50 Hz electric and magnetic fields. CIGRE, International Congress on

- Large High Voltage Electric Systems, Paris, 1-9 September, CIGRE Paper 36-01; 1982.
- Santini, R.; Hosni, M.; Deschaux, P.; Packeco, H. B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. *Bioelectromagnetics*; 9:105–107; 1988
- Sarkar, S.; Ali, S.; Behari, J. Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. *Mutation Res.*; 320:141–147; 1994.
- Savitz, D. A. Overview of epidemiological research on electric and magnetic fields and cancer. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*; 54:197–204; 1993.
- Savitz, D. A.; Ahlbom, A. Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure. In: *Biologic effects of electric and magnetic fields, Vol. 2.* New York, Academic Press; 233–262; 1994.
- Savitz, D. A.; Loomis, D. P. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 141:123–134; 1995.
- Savitz, D. A.; Wachtel, H.; Barnes, F. A.; John, E. M.; Tvrdik, J. G. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*; 128:21–38; 1988.
- Savitz, D. A.; John, E. M.; Kleckner, R. C. Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 131:763–773; 1990.
- Schnorr, T. M.; Grajewski, B. A.; Hornung, R. W.; Thun, M. J.; Egeland, G. M.; Murray, W. E.; Conover, D. L.; Halperin, W. E. Video display terminals and the risk of spontaneous abortion. *New Eng. J. Med.*; 324:727–733; 1991.
- Schreiber, G. H.; Swaen, G. M.; Meijers, J. M.; Slangen, J. J.; Sturmans, F. Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment: a retrospective cohort study. *Int. J. Epidemiol.*; 22:9–15; 1993.
- Selmaoui, B.; Lambrozo, J.; Touitou, Y. Magnetic fields and pineal function in humans: evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms. *Life Sci.*; 58:1539–1549; 1996.
- Selvin, S.; Schulman, J.; Merrill, D. W. Distance and risk measures for the analysis of spatial data: a study of childhood cancers. *Soc. Sci. Med.* 34:769–777; 1992.
- Severson, R. K.; Stevens, R. G.; Kaune, W. T.; Thomas, D. B.; Houser, L.; Davis, S.; Sever, L. E. Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 128:10–20; 1988.
- Shaw, G. W.; Croen, L. A. Human adverse reproductive outcomes and electromagnetic fields exposures: review of epidemiologic studies. *Environ. Health Persp.* 101:107–119; 1993.

- Shellock, F. G.; Crues, J. V. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical imaging at 1.5 T. *Radiology*; 163:259–262; 1987.
- Sienkiewicz, Z. J.; Saunders, R. D.; Kowalczyk, C. I. The biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: II Extremely low frequency electric and magnetic fields. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB R239; 1991.
- Sienkiewicz, Z. J.; Cridland, N. A.; Kowalczyk, C. I.; Saunders, R. D. Biological effects of electromagnetic fields and radiations. In: Stone, W. R.; Hyde, G., eds. *The review of radio science: 1990-1992*; Oxford, Oxford University Press; 737–770; 1993.
- Silny, J. The influence threshold of a time-varying magnetic field in the human organism. In: Bernhardt, J. H., ed. *Biological effects of static and extremely-low-frequency magnetic fields*. Munich, MMV Medizin Verlag; 105–112; 1986.
- Sliney, D.; Wolbarsht, M. *Safety with laser and other optical sources*. London, Plenum Press; 1980.
- Sobel, E.; Davanipour, Z. EMF exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease. *Neurology*; 47:1594–1600; 1996.
- Stern, S.; Margolin, L.; Weiss, B.; Lu, S. T.; Michaelson, S. M. Microwaves: effects on thermoregulatory behavior in rats. *Science*; 206:1198–1201; 1979.
- Stevens, R. G. Electric power use and breast cancer: a hypothesis. *Am. J. Epidemiol.*; 125:556–561; 1987.
- Stevens, R. G.; Davis, S.; Thomas, D. B.; Anderson, L. E.; Wilson, B. W. Electric power, pineal function and the risk of breast cancer. *The FASEB Journal*; 6:853–860; 1992.
- Stevens, R. G.; Davis, S. The melatonin hypothesis: electric power and breast cancer. *Environ. Health Persp.*; 104 (Suppl. 1):135–140; 1996.
- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on mood and verbal reasoning skills. *Br. J. Ind. Med.*; 43:339–349; 1986.
- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on vigilance and concentration. *Br. J. Ind. Med.*; 44:111–118; 1987.
- Stuchly, M. A.; McLean, J. R. N.; Burnett, R.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Mitchel, R. E. J. Modification of tumor promotion in the mouse skin by exposure to an alternating magnetic field. *Cancer Letters*; 65:1–7; 1992.
- Stuchly, M. A.; Xi, W. Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields. *Phys. Med. Biol.*; 39:1319–1330; 1994.
- Szmigielski, S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Science of the Total Environment*; 180:9–17; 1996.

- Szmigielski, S.; Szudinski, A.; Pietraszek, A.; Bielec, M.; Wrembel, J. K. Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*; 3:179–191; 1982.
- Szmigielski, S.; Bielec, M.; Lipski, S.; Sokolska, G. Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. In: Marino, A. A., ed. *Modern bioelectricity*. New York, Marcel Dekker; 861–925; 1988.
- Tenforde, T. S. Biological interactions and human health effects of extremely-low-frequency magnetic fields. In: *Extremely low-frequency electromagnetic fields: the question of cancer*. (Anderson, L. E.; Stevens, R. G.; Wilson, B. W. eds.). Columbia, OH, Battelle Press; 291–315; 1990.
- Tenforde, T. S. Biological interactions of extremely-low-frequency electric and magnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 25:1–17; 1991.
- Tenforde, T. S. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Ann. Rev. Public Health*; 13:173–196; 1992.
- Tenforde, T. S. Cellular and molecular pathways of extremely-low-frequency electromagnetic field interactions with living systems. In: Blank, M., ed. *Electricity and magnetism in biology and medicine*. San Francisco, San Francisco Press; 1–8; 1993.
- Tenforde, T. S. Interaction of ELF magnetic fields with living systems. In: Polk, C.; Postow, E., eds. *Biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton, FL, CRC Press; 185–230; 1996.
- Tenforde, T. S.; Kaune, W. T. Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health Phys.*; 53:585–606; 1987.
- Thériault, G.; Goldberg, M.; Miller, A. B.; Armstrong, B.; Guénel, P.; Deadman, J.; Imbernon, E.; To, T.; Chevalier, A.; Cyr, D.; Wall, C. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France — 1970–1989. *Am. J. Epidemiol.*; 139:550–572; 1994.
- Tofani, S.; d'Amore, G.; Fiandino, G.; Benedetto, A.; Gandhi, O. P.; Chen, J. Y. Induced foot-currents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EC-37:96; 1995.
- Tomenius, L. 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county. *Bioelectromagnetics*; 7:191–207; 1986.
- Tynes, T.; Andersen, A.; Langmark, F. Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*; 136:81–88; 1992.
- Tynes, T.; Haldorsen, T. Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.*; 145:219–226; 1997.

- Ueno, S. (ed.). Biological effects of magnetic and electromagnetic fields. New York, Plenum Press; 1996.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Extremely low frequency (ELF) fields. Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 35; 1984.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Magnetic fields. Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 69; 1987.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 137; 1993.
- Vena, J. E.; Graham, S.; Hellman, R.; Swanson, M.; Brasure, J. Use of electric blankets and risk of post-menopausal breast cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 134:180–185; 1991.
- Vena, J. E.; Freudenheim, J. L.; Marshall, J. R.; Laughlin, R.; Swanson, M.; Graham, S. Risk of premenopausal breast cancer and use of electric blankets. *Am. J. Epidemiol.*; 140:974–979; 1994.
- Verkasalo, P. K. Magnetic fields and leukemia: risk for adults living next to power lines. *Scand. J. Work Environ. Health*; 22 (Suppl. 2):7–55; 1996.
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Hongisto, M. Y.; Valjus, J. E.; Jörvinen, P. J.; Heikkila, K. V.; Koskenvuo, M. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Br. Med. J.*; 307:895–899; 1993.
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Kaprio, J.; Heikkila, K. V.; Koskenvuo, M. Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults: nationwide cohort study. *Br. Med. J.*; 313:1047–1051; 1996.
- Verreault, R.; Weiss, N. S.; Hollenbach, K. A.; Strader, C. H.; Daling, J. R. Use of electric blankets and risk of testicular cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 131:759–762; 1990.
- Walleczek, J. Electromagnetic field effects on cells of the immune system: the role of calcium signalling. *The FASEB Journal*; 6:3177–3185; 1992.
- Walleczek, J.; Liburdy, R. P. Nonthermal 60 Hz sinusoidal magnetic-field exposure enhances $^{45}\text{Ca}^{2+}$ uptake in rat thymocytes: dependence on mitogen activation. *FEBS Letters*; 271:157–160; 1990.
- Wertheimer, N.; Leeper, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 109:273–284; 1979.
- Williams, G. M. Comment on “Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strandbreaks in rat brain cells” by Henry Lai and Narendra P. Singh. *Bioelectromagnetics*; 17:165; 1996.

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.

APPENDICE

Glossario

Assorbimento. Nella propagazione delle radioonde, l'attenuazione di un'onda dovuta alla dissipazione della sua energia, cioè alla conversione dell'energia in una forma diversa, come il calore.

Assorbimento specifico di energia (SA, Specific Absorption). L'energia assorbita per unità di massa di un tessuto biologico, espressa in joule al chilogrammo (J/kg). L'assorbimento specifico di energia è l'integrale nel tempo del tasso di assorbimento specifico.

Barriera sangue-cervello. Un concetto funzionale sviluppato per spiegare perché molte sostanze trasportate dal sangue penetrano facilmente in altri tessuti ma non nel cervello; la "barriera" funziona come se fosse una membrana continua che foderà la vascolatura del cervello. Queste cellule endoteliali formano una barriera quasi continua contro l'ingresso di sostanze dal sistema vascolare nel cervello.

Campo lontano. La regione in cui la distanza da un'antenna radiante supera la lunghezza d'onda del campo elettromagnetico irradiato; nel campo lontano, le componenti del campo (**E** ed **H**) e la direzione di propagazione sono mutuamente perpendicolari e l'andamento del campo è indipendente dalla distanza dalla sorgente.

Campo vicino. La regione in cui la distanza da un'antenna radiante è inferiore alla lunghezza d'onda del campo elettromagnetico irradiato. *Nota:* L'intensità del campo magnetico (moltiplicata per l'impedenza dello spazio) e quella del campo elettrico sono uguali e, a distanze dall'antenna inferiori a un decimo della lunghezza d'onda, variano in proporzione inversa al quadrato o al cubo della distanza se l'antenna è piccola rispetto a quest'ultima.

Conducibilità elettrica. La quantità scalare o vettoriale che, moltiplicata per l'intensità del campo elettrico, fornisce la densità di corrente di conduzione; è l'inverso della resistività e viene espressa in siemens al metro (S/m).

Conduttanza. L'inverso della resistenza. Viene espressa in siemens (S).

Costante dielettrica. V. permittività

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

Densità di potenza. Nella propagazione di onde a radiofrequenza, è la potenza che attraversa una superficie unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. Viene espressa in watt al metro quadro (W/m^2).

Dosimetria. Misura, o determinazione attraverso il calcolo, dell'intensità del campo elettrico interno o della densità di corrente indotta, del tasso di assorbimento specifico, o della distribuzione del tasso di assorbimento specifico negli uomini o negli animali esposti a campi elettromagnetici.

Effetto atermico. Qualunque effetto dell'energia elettromagnetica sul corpo che non sia legato al calore.

ELF. Frequenza estremamente bassa (in inglese, Extremely Low Frequency); frequenza inferiore a 300 Hz.

Energia elettromagnetica. L'energia immagazzinata in un campo elettromagnetico. Viene misurata in joule (J).

Esposizione del pubblico. Ogni esposizione a campi elettromagnetici sperimentata da individui dal pubblico che non sia un'esposizione professionale né che abbia luogo durante procedure mediche.

Esposizione professionale. Ogni esposizione a campi elettromagnetici sperimentata da individui in connessione alla loro attività lavorativa.

Frequenza. Il numero di cicli sinusoidali completati dall'onda in 1 s. Generalmente viene espressa in hertz (Hz).

Impedenza dell'onda. Il rapporto tra i numeri complessi (vettori) che rappresentano il campo elettrico trasversale ed il campo magnetico trasversale in un punto. Viene espressa in ohm (Ω).

Induzione magnetica. Una quantità vettoriale, indicata con **B**, che esprime una forza agente tra cariche in moto. Viene espressa in tesla (T).

Intensità del campo elettrico. La forza (**E**) esercitata su una carica positiva unitaria in un certo punto all'interno di un campo elettrico. Viene misurata in volt al metro (V/m).

Intensità del campo magnetico. Una quantità vettoriale assiale, indicata con **H**, la quale, assieme all'induzione magnetica, specifica un campo magnetico in un punto dello spazio. Viene espressa in ampere al metro (A/m).

Lunghezza d'onda. La distanza, misurata lungo la direzione di propagazione, tra due punti successivi di un'onda periodica nei quali l'oscillazione ha la stessa fase.

Microonde. Radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda abbastanza piccola da poter essere in pratica trasmesse e captate attraverso guide d'onda e cavità ad esse collegate. *Nota:* Il termine viene usato per indicare radiazioni o campi di frequenza compresa nell'intervallo 300 MHz – 300 GHz.

Onda piana. Un'onda elettromagnetica nella quale i vettori campo elettrico e campo magnetico giacciono in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda e per la quale l'intensità del campo magnetico (moltiplicata per l'impedenza dello spazio) e quella del campo elettrico sono uguali.

Permeabilità magnetica. La quantità scalare o vettoriale che, moltiplicata per l'intensità del campo magnetico, fornisce l'induzione magnetica. Viene espressa in henry al metro (H/m). *Nota:* Per i mezzi isotropi, la permeabilità magnetica è una grandezza scalare, per i mezzi anisotropi è una grandezza tensoriale.

Permettività. Una costante che definisce l'influenza di un mezzo isotropo sulle forze attrattive o repulsive tra corpi elettricamente carichi. Viene espressa in farad al metro (F/m). La permettività relativa è la permettività di un materiale o di un mezzo divisa per la permettività del vuoto.

Radiazioni non ionizzanti (NIR, Non Ionizing Radiation). Comprendono tutte le radiazioni ed i campi dello spettro elettromagnetico che non hanno normalmente un'energia sufficiente per produrre la ionizzazione nella materia. Sono caratterizzate da energie fotoniche inferiori a 12 eV, da lunghezze d'onda maggiori di 100 nm e da frequenze inferiori a 3×10^{15} Hz.

Radiofrequenza (RF). Ogni frequenza alla quale la radiazione elettromagnetica sia utile per le telecomunicazioni. *Nota:* In questa pubblicazione, si intendono come radiofrequenze le radiazioni di frequenza compresa nell'intervallo 300 Hz – 300GHz.

Risonanza. Il cambiamento di ampiezza che si verifica quando la frequenza di un'onda si avvicina a una frequenza naturale del mezzo o coincide con essa. L'assorbimento di onde elettromagnetiche da parte del corpo intero presenta il suo massimo valore, cioè la risonanza, a frequenze (in MHz) corrispondenti a circa $14/L$, dove L è l'altezza dell'individuo espressa in metri.

Spessore di penetrazione. Per un campo elettromagnetico in condizioni di onda piana che incida sulla superficie di un buon conduttore, lo spessore di penetrazione è la profondità alla quale l'intensità del campo si riduce a $1/e$, ovvero a circa il 37%, del suo valore originario.

Tasso di assorbimento specifico (SAR, Specific Absorption Rate). Il tasso a cui l'energia è assorbita nei tessuti corporei, espresso in watt al chilogrammo (W/kg); il SAR è la grandezza dosimetrica ampiamente adottata a frequenze superiori a circa 100 kHz.

Valore quadratico medio (rms, root mean square). Alcuni effetti elettrici sono proporzionali alla radice quadrata del valor medio (su un periodo) del quadrato di una funzione periodica. Questo valore è noto come valore efficace o valore quadratico medio, perché viene calcolato effettuando dapprima il quadrato della funzione, determinando poi il valore medio dei quadrati così ottenuti e calcolando infine la radice quadrata del valor medio.

(Traduzione italiana di Paolo Vecchia)