

LINEE GUIDA SUI LIMITI DI ESPOSIZIONE A CAMPI MAGNETICI STATICI

Commissione Internazionale sulla Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti*

Traduzione italiana di: *Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields*
Health Physics 96(4):504-514 (2009)

Il rapido sviluppo nell'industria e in medicina di tecnologie che usano campi magnetici statici ha prodotto un aumento dell'esposizione umana a questi campi ed ha portato a numerosi studi scientifici sui loro possibili effetti. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) ha recentemente prodotto un documento di criteri sanitari relativamente ai campi elettrici e magnetici statici, nell'ambito dell'Environmental Health Criteria Programme (OMS 2006). Il documento contiene una rassegna degli effetti biologici dell'esposizione a campi statici riportati in letteratura e, assieme ad altre pubblicazioni recenti (principalmente ICNIRP 2003, McKinlay et al 2004, Noble et al 2005), serve come base di dati scientifici per lo sviluppo delle basi delle linee guida che vengono descritte nel presente documento e che sostituiscono quelle pubblicate dall'ICNIRP nel 1994 (ICNIRP 1994).

CAMPO DI APPLICAZIONE E FINALITÀ

Queste linee guida si applicano all'esposizione professionale e a quella del pubblico a campi magnetici statici. Esse non si applicano all'esposizione di pazienti sottoposti a indagini diagnostiche o a cure mediche. La protezione dei pazienti viene considerata in dettaglio in un documento dell'ICNIRP sulla protezione di pazienti sottoposti ad indagini di risonanza magnetica per immagini (ICNIRP 2004). Tenendo conto di queste linee guida, è stato ora approntato un commento al rapporto relativo alla risonanza magnetica (ICNIRP in preparazione).

GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA

Mentre i campi elettrici sono associati alla presenza di cariche, i campi magnetici sono prodotti dal movimento fisico delle cariche elettriche (corrente elettrica). Anche i campi magnetici possono esercitare forze fisiche sulle cariche elettriche, ma soltanto quando tali cariche sono in movimento. Un campo magnetico può essere rappresentato come un vettore e può essere espresso in due modi: come induzione magnetica \mathbf{B} o come intensità di campo magnetico \mathbf{H} . \mathbf{B} ed \mathbf{H} sono espressi rispettivamente in tesla (T) e in ampere al metro (A m^{-1}).

Nel vuoto, e con buona approssimazione nell'aria, \mathbf{B} e \mathbf{H} sono collegati dall'espressione

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1)$$

La costante di proporzionalità μ_0 nell'equazione (1) è chiamata permeabilità dello spazio libero ed ha il valore numerico di $4\pi \times 10^{-7}$, espresso in henry al metro (H m^{-1}). Quindi, per descrivere con adeguata approssimazione un campo magnetico in aria o in mezzi non magnetici (compresi i materiali biologici) basta specificare soltanto una della quantità \mathbf{B} o \mathbf{H} .

L'intensità della forza \mathbf{F} che agisce su una carica elettrica q che si muove con una velocità \mathbf{v} in una direzione perpendicolare a un'induzione magnetica \mathbf{B} è data dall'espressione

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

La direzione della forza (forza di Lorentz) è determinata dal prodotto vettoriale della velocità della carica per l'induzione magnetica ed è perciò sempre perpendicolare alla direzione del moto della carica elettrica. Di conseguenza, l'interazione di un campo magnetico con una carica elettrica produrrà un cambiamento di direzione del moto della carica, ma mai un cambiamento di velocità. I campi magnetici statici non depositano energia nei tessuti.

* ICNIRP, c/o BfS – G. Ziegelberger, Ingolstaedter Landstr. 1, 85764 Oberschleissheim, Germania.
Per corrispondenza o ristampe, contattare: G. Ziegelberger all'indirizzo di sopra o tramite e-mail a info@icnirp.org.
(Manoscritto accettato il 4 dicembre 2008)

L'induzione magnetica, misurata in tesla (T), viene accettata come la più appropriata quantità da collegare agli effetti dei campi magnetici. Il flusso d'induzione magnetica attraverso una determinata superficie è uguale al prodotto dell'area di quest'ultima per la componente del vettore induzione magnetica normale alla superficie stessa. Nella Tabella 1 vengono riassunte le grandezze fisiche relative ai campi magnetici e le loro unità di misura.

Tabella 1. Grandezze relative ai campi magnetici statici e corrispondenti unità SI

Grandezza	Simbolo	Unità
Corrente	<i>I</i>	ampere (A)
Densità di corrente	<i>J</i>	ampere al metro quadrato (A m ⁻²)
Intensità di campo magnetico	<i>H</i>	ampere al metro (A m ⁻¹)
Flusso magnetico	Φ	weber (Wb or T m ²)
Induzione magnetica	<i>B</i>	tesla (T)
Permeabilità	μ	henry al metro (H m ⁻¹)
Permeabilità dello spazio libero	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ H m ⁻¹

Le unità SI sono le unità di misura internazionalmente accettate per esprimere le grandezze fisiche nella letteratura scientifica. Per una lista più completa e per una discussione dei concetti, delle grandezze, delle unità di misura e della terminologia relativamente alla protezione dalle radiazioni non ionizzanti, il lettore può fare riferimento alla relativa pubblicazione dell'ICNIRP (ICNIRP 2003).

SORGENTI DI ESPOSIZIONE

Il campo magnetico statico naturale della terra è di circa 50 μ T e, secondo la posizione geografica, varia circa da 30 μ T a 70 μ T. Livelli di induzione magnetica dell'ordine di 20 μ T si producono sotto le linee di trasmissione ad alta tensione. In futuro, sono potenzialmente possibili esposizioni a densità di flusso magnetico più alte a seguito dello sviluppo di nuove tecnologie di trasporto. I treni passeggeri ad alta velocità basati sulla levitazione magnetica producono densità di flusso magnetico relativamente alte in vicinanza del motore. Sia per i treni a levitazione magnetica che per quelli elettrici convenzionali, i campi all'interno delle carrozze passeggeri sono però relativamente bassi, al di sotto di 100 μ T, anche se a livello del pavimento campi magnetici localizzati di diversi millitesla possono derivare dalla presenza di induttori sotto il pianale (OMS 2006, ICNIRP 2008). Altre sorgenti di campi magnetici statici in ambienti residenziali e professionali includono piccoli magneti permanenti in clip e accessori (come borse, bottoni, collane e braccialetti magnetici, cinture, giocattoli magnetici, ecc), che generano campi statici locali superiori a 0,5 mT.

La più alta esposizione professionale si verifica per pazienti sottoposti a indagini diagnostiche con risonanza magnetica (RM), una tecnica utilizzata per ottenere informazioni diagnostiche e, sempre più spesso, per guidare interventi chirurgici all'interno del corpo. La tecnica si basa sul fenomeno della risonanza magnetica nucleare ed è alla base della risonanza magnetica per immagini e della spettroscopia a risonanza magnetica. Nelle procedure di risonanza magnetica, le densità di flusso variano tipicamente da 0,15 a 3 T e l'esposizione viene di solito limitata a meno di un'ora, ma può durare anche alcune ore (Gowland 2005). Le procedure di intervento medico con controllo diretto in tempo reale mediante risonanza magnetica stanno diventando sempre più comuni. Queste procedure portano anche a un aumento dell'esposizione professionale, specialmente per il personale sanitario (chirurghi, radiologi, infermieri e tecnici). Durante tali procedure, lo staff medico può trovarsi nella zona di più alto campo magnetico per un periodo di tempo prolungato, fino ad alcune ore. Un aumento dell'esposizione del personale può verificarsi anche in situazioni di emergenza, in cui gli operatori devono intervenire molto vicino al paziente. Inoltre, brevi esposizioni del personale si verificano mentre si portano i pazienti dentro e fuori i sistemi a risonanza magnetica. Infine, il personale coinvolto nella fabbricazione o nella manutenzione di questi sistemi è anch'esso esposto professionalmente a elevati campi magnetici statici.

La risonanza magnetica funzionale viene oggi largamente usata in ricerche accademiche e mediche sulle funzioni del cervello umano. Sistemi che impiegano campi magnetici elevati, fino a 10 T, vengono attualmente utilizzati per la ricerca in diverse strutture nel mondo, ed operano previa specifica approvazione da parte di un comitato, o di un'altra istituzione equivalente, istituito localmente. Esposizioni possono verificarsi anche per altre applicazioni mediche dei campi magnetici statici, come l'uso di magneti per mantenere in posizione varie protesi o la navigazione magnetica, in cui si usano magneti permanenti per guidare la punta dei cateteri cardiaci. Questi dispositivi producono però solo campi localizzati.

Intensi campi magnetici sono prodotti anche nelle tecnologie delle alte energie, come reattori termonucleari, sistemi magnetoidrodinamici e generatori superconduttivi. Apparati di ricerca che utilizzano camere a bolle, acceleratori di particelle, spettrometri superconduttivi e sistemi per la separazione isotopica danno anch'essi luogo, nel loro intorno, a zone aree con alta densità di flusso magnetico. Altre attività industriali dove si verificano esposizioni a campi magnetici intensi sono quelle che coinvolgono processi elettrolitici, come la produzione di cloro o di alluminio, in cui le esposizioni tipiche per la maggior parte della giornata lavorativa sono di pochi millitesla, con picchi fino a diverse decine di millitesla, nonché la fabbricazione di magneti permanenti e di materiali magnetici.

RASSEGNA DEI DATI SCIENTIFICI

Meccanismi di interazione

I tre meccanismi fisici accertati mediante cui i campi magnetici statici interagiscono con la materia vivente sono l'induzione magnetica, l'azione magnetomeccanica, e le interazioni elettroniche.

Induzione magnetica. Questo meccanismo si origina attraverso i seguenti tipi di interazione:

- *Interazioni elettrodinamiche con elettroliti in movimento.* I campi statici esercitano forze di Lorentz sulle cariche ioniche in moto e danno così origine a campi elettrici indotti e a correnti indotte. Questa interazione è alla base di potenziali indotti associati al flusso sanguigno, che sono stati analizzati teoricamente (Kinouchi et al 1996). Gli autori suggeriscono che il nodo senoatriale del cuore, che controlla il ritmo cardiaco, possa essere la regione più sensibile alla corrente e calcolano che, per un campo di 5 T, la densità di corrente in questa regione sia di circa 100 mA m^{-2} , corrispondente a circa il 10% della massima corrente endogena derivante dall'attività elettrica del cuore, e che la stessa possa salire fino a circa il 20% per un campo di 10 T. Un'accurata valutazione degli effetti dei campi elettrici sulla funzione cardiaca mediante modelli di calcolo dell'elettrofisiologia cardiaca hanno indicato che, mentre campi fino a 8 T verosimilmente non alterano il ritmo cardiaco, lo stesso non sarebbe necessariamente vero per campi più elevati (Holden 2005).
- *Campi elettrici indotti e correnti indotte.* I campi magnetici variabili nel tempo inducono correnti elettriche nei tessuti viventi secondo la legge di induzione di Faraday. Correnti elettriche possono essere anche indotte dal movimento in un campo magnetico statico. In particolare, il movimento lungo un gradiente di campo o il movimento di rotazione, tanto in un campo uniforme quanto in un gradiente di campo, producono una variazione nel flusso concatenato, che a sua volta induce una corrente elettrica, a differenza di un movimento lineare del corpo all'interno di un campo statico uniforme. Per quanto riguarda il movimento lineare in un gradiente di campo, l'intensità delle correnti indotte e dei campi elettrici associati aumenta con la velocità del movimento e con l'ampiezza del gradiente. I calcoli suggeriscono che tali campi elettrici indotti siano apprezzabili durante il normale movimento attorno o dentro a campi maggiori di 2-3 T (Crozier e Liu 2005) e possono spiegare le numerose segnalazioni di nausea e fosfeni magnetici sperimentati da pazienti, volontari e lavoratori che si muovevano all'interno di tali campi (Schenck et al 1992; Chakeres e de Vocht 2005, de Vocht et al 2006b). Misure di campi elettrici superficiali *in situ*, indotti da tipici movimenti del corpo come camminare o girarsi entro i campi magnetici che esistono attorno a un tomografo di risonanza magnetica di 3 T per la scansione del corpo intero, hanno fornito valori rispettivamente di 0,15, 0,077 e 0,015 V m^{-1} per la parte superiore dell'addome, per la testa, e attraverso la lingua (Glover e Bowtell 2008). Un picco di campo elettrico di 0,30 V m^{-1} è stato misurato sul torace. Si deve notare che in questo studio non era specificata la velocità dei movimenti. Per un corpo che si muova a una velocità costante di 0,5 m s^{-1} verso un magnete da 4 T, Crozier e Liu (2005) stimano che la massima intensità di campo elettrico indotto nel corpo sia di circa 2 V m^{-1} , pressoché uguale al valore che si presenta come soglia per la stimolazione del sistema nervoso periferico nell'intervallo di frequenza 10 Hz – 1 kHz (OMS 2007). Si deve però notare che le frequenze associate ai movimenti del corpo sono probabilmente minori di 10 Hz, frequenza al di sotto della quale l'adattamento riduce l'eccitabilità elettrica dei tessuti nervosi, a causa della lenta disattivazione dei canali dello ione sodio, controllati dalla tensione (Bezanilla 2000). Le frequenze associate alle traslazioni e alle rotazioni della testa quando si cammina variano, ad esempio, tra 0,4 e 4 Hz (Grossman et al 1988; Pozzo et al 1990; MacDougall e Moore 2005).

Effetti magneto-meccanici. I due tipi di effetti meccanici che un campo magnetico statico può esercitare sui sistemi biologici sono i seguenti:

- *Orientamento magnetico.* In un campo statico, le molecole paramagnetiche sperimentano una torsione che le orienta secondo una configurazione tale da minimizzare la loro energia libera nel campo. Questo effetto è stato ben studiato anche per aggregati di macromolecole diamagnetiche con diversa suscettibilità magnetica lungo l'asse principale di simmetria. Generalmente, si considera che queste forze siano troppo deboli per alterare del materiale biologico *in vivo*, dati i piccolissimi valori ($\sim 10^{-5}$) della sensibilità magnetica (Schenck 2000). Tuttavia, il campo geomagnetico è stato chiamato in causa nell'individuazione dei segnali che dirigono l'orientamento e la

migrazione di alcune specie animali (es. Kirschvink et al, OMS 2006). Inoltre, è stato dimostrato che intensi campi magnetici statici (>17 T) inducono un riorientamento dell'apparato mitotico, cioè variazioni di orientamento dei piani di clivaggio degli embrioni di rana tra il primo e il terzo ciclo

- **Traslazione magneto-meccanica.** In presenza di gradienti, i campi magnetici statici producono una forza netta di traslazione su materiali sia diamagnetici, sia paramagnetici. La direzione della forza è quella del gradiente di campo oppure quella opposta, rispettivamente per i materiali paramagnetici e per quelli diamagnetici. La forza è proporzionale al prodotto dell'induzione magnetica (B) per il suo gradiente (dB/dx). La forza esercitata su oggetti ferromagnetici come strumenti metallici ad alta suscettibilità magnetica (>1 per il ferro o per alcuni tipi di acciaio) rappresenta un pericolo a causa dell'accelerazione di tali oggetti in forti gradienti di campo magnetico. Per i materiali biologici, la forza equivale a quella di gravità quando $B \cdot dB/dx > 1000 \text{ T}^2 \text{ m}^{-1}$ (OMS 2006). È stato dimostrato che un magnete di 8 T con un gradiente di 50 T m^{-1} può far diminuire l'altezza dell'acqua in un condotto orizzontale passante attraverso il magnete, spostando l'acqua mediante una spinta verso le due estremità del condotto che si trovano al di fuori del magnete (Ueno e Iwasaka 1994). L'effetto a 10 T corrisponde a una differenza di pressione, tra l'interno e l'esterno del magnete, di meno di 40 mm di acqua, che si ritiene insufficiente per alterare il flusso sanguigno sistemico in esseri umani (Schenck 2005). Ichioka et al (2000) hanno però osservato una riduzione del flusso sanguigno nella pelle quando si applicava un campo magnetico statico di 8 T al corpo intero di ratti; il prodotto dell'induzione magnetica per il suo gradiente variava da 200 a $400 \text{ T}^2 \text{ m}^{-1}$ lungo l'asse longitudinale del corpo dei ratti.

Interazioni di spin elettronico.

Alcune reazioni metaboliche comportano uno stadio intermedio che comporta una coppia di radicali, di solito in uno stato di singoletto, con lo spin di un elettrone spaiato orientato in senso antiparallelo allo spin dell'altro (Schulten 1982; McLauchlan e Steiner 1991; Grissom 1995; Nagakura et al 1998; Hore 2005; OMS 2006). Queste coppie di radicali si ricombinano per formare prodotti di reazione; un campo magnetico applicato altera la velocità e la misura in cui la coppia di radicali passa ad uno stato di tripletto (spin paralleli), in cui la ricombinazione non è più possibile. Sebbene sia stata riportata un'evidenza sperimentale di tali effetti in sistemi biochimici (Eveson et al; Liu et al; 2005), il loro significato biologico non è attualmente chiaro. Il "meccanismo delle coppie di radicali" è stato proposto (Ritz et al 2005) come uno mediante il quale gli animali, in particolare gli uccelli, possono sfruttare il campo magnetico terrestre come fonte di informazione per navigare durante le migrazioni e questa opinione trova qualche supporto sperimentale (Ritz et al 2004).

STUDI IN VIVO E IN VITRO

Sono stati condotti numerosi studi per rilevare le risposte biologiche a campi magnetici statici, con densità di flusso variabili da qualche millitesla a diversi tesla. Una rassegna globale di questi studi è stata effettuata da ICNIRP (2003), McKinlay et al (2004), Miyakoshi (2005), Noble et al (2005) e OMS (2006). Quello che segue è un breve sommario delle principali conclusioni.

Studi di laboratorio con sistemi *in vitro*

Sono stati investigati diversi livelli di organizzazione biologica a livello cellulare, compresi sistemi *cell-free* (impiegando membrane isolate, enzimi o reazioni biochimiche) e vari modelli cellulari (usando sia cellule di batteri che di mammiferi). Gli *endpoint* studiati comprendevano anche la crescita cellulare, l'attività metabolica della cellula, la fisiologia della membrana cellulare e l'espressione genica.

Per tutti questi *endpoint* sono stati riportati risultati positivi e negativi. Gli effetti osservati sono piuttosto diversi e sono stati riscontrati dopo esposizioni ad una vasta gamma di livelli di induzione magnetica, fino a 8 T. Per qualcuno di questi effetti sono state riportate delle soglie, ma altri studi hanno indicato risposte non lineari, senza chiari valori di soglia. Comunque, queste risposte non sono state ben accertate. L'effetto sull'apparato mitotico sopra menzionato (Valles et al 2002) fornisce un quadro di evidenze più coerente ed ha confermato precedenti osservazioni dello stesso gruppo (Denegare et al 1998).

Riguardo agli effetti su reazioni metaboliche mediate da radicali, i risultati degli studi condotti finora suggeriscono che non siano verosimili grossi effetti con conseguenze fisiologiche o effetti mutagenici a lungo termine, a seguito di variazioni della concentrazione o del flusso di radicali liberi indotte da campi magnetici (Hore 2005).

Sono stati condotti solo pochi studi sulla genotossicità (Miyakoshi 2005). Non è stato mostrato alcun effetto genotossico o epigenetico di esposizioni a campi magnetici statici fino a 9 T, fatta eccezione per uno studio su ceppi di batteri con deficit di riparazione (Zhang et al 2003). Gli studi con esposizione combinata a mutageni e a campi magnetici statici hanno indicato alcune modificazioni degli effetti di alcuni dei mutageni provati, ma senza indicazioni di una dipendenza dal campo.

Nel complesso, ci sono poche evidenze convincenti, da modelli cellulari e *cell free*, di effetti biologicamente nocivi di esposizioni a campi magnetici con densità di flusso fino a diversi tesla.

Studi di laboratorio su animali

Sono stati condotti molti studi su animali riguardanti gli effetti dei campi magnetici statici (Saunders 2005). Le risposte più coerenti osservate in studi sul comportamento suggeriscono che il movimento delle cavie da laboratorio all'interno di campi di circa 4 T e oltre possono portare, come risposta condizionata, ad allontanarsi dal campo o evitarlo (Weiss et al 1992; Nolte et al 1998; Houpt et al 2003). Si pensa che questi effetti derivino da interazioni con l'apparato vestibolare (Synder et al 2000). A livelli di campo dell'ordine di 2 T e inferiori, gli studi di laboratorio forniscono per poca evidenza convincente di effetti dell'esposizione sull'apprendimento o su risposte comportamentali, condizionate o incondizionate, a diversi stimoli (Trzeciak et al 1993). Coerentemente con questi risultati, gli studi sperimentali sull'eccitabilità dei tessuti nervosi esposti a campi magnetici statici non hanno dimostrato alcun effetto robusto a livelli di campo fino a 2 T (Gaffey and Tenforde 1983; Hong et al 1986).

Un effetto ben accertato dell'esposizione di animali a campi magnetici statici superiori a circa 0,1 T è l'induzione di potenziali di flusso sanguigno dentro e intorno al cuore e ad altri vasi principali del sistema circolatorio centrale (Gaffey e Tenforde 1981; Tenforde et al 1983). Questi potenziali sono ben documentati anche nell'uomo (vedi in seguito), ma non sono stati associati ad alcun effetto nocivo in studi su volontari. La presenza di queste tensioni indotte è stata dimostrata con studi sull'elettrocardiogramma (ECG) di roditori, cani, babbuini e scimmie, condotti durante esposizioni della durata di diverse ore per diversi giorni, con intensità fino a 2 T (Tenforde 2005). Il loro significato per la salute resta però poco chiaro. Ampie misure su cani e scimmie eseguite durante esposizioni a campi di 1,5 T non hanno fornito evidenza di variazioni nella velocità del flusso sanguigno, nella pressione sanguigna, o nelle dinamiche cardiovascolari (Tenforde et al 1983). Esposizioni di diverse ore a un campo di 8 T non hanno effetti sulla funzionalità cardiovascolare di maiali (Kangarlu et al 1999). Diversi altri studi su roditori esposti a livelli di campo variabili da qualche millitesla a 10 T hanno segnalato variazioni di poco conto dei parametri cardiovascolari, come la pressione sanguigna e la velocità di flusso (Ichioka et al 2000; Okano et al 2005; Okano e Okhubo 2006). Gli *endpoint* sperimentali di questi studi erano però generalmente piuttosto labili e sensibili a fattori di confondimento come l'anestesia, e non si può giungere a nessuna conclusione definitiva senza una replicazione indipendente degli effetti riportati.

Non è stato dimostrato che l'esposizione a campi statici fino a 1 T abbia effetti sulla crescita fetale o sullo sviluppo post-natale nei topi (Sikov et al 1979; Konermann e Monig 1986). Altri studi riportano mancanza di effetti sullo sviluppo fetale del topo a seguito di esposizioni brevi (2-7 giorni) durante l'organogenesi a un campo di 4,7 T (Okazaki et al 2001) o di 6,3 T (Murakami et al 1992).

Ci sono pochi studi su possibili effetti genotossici o cancerogeni dei campi magnetici statici su animali da laboratorio (Bellossi 1984, 1986; Mevissen et al 1993). Fino ad oggi, non sono stati condotti studi con esposizioni per l'intera vita, per valutare l'induzione o la promozione del cancro da parte di campi magnetici statici. Non è possibile trarre alcuna conclusione dagli studi su animali relativi a questi particolari *endpoint* e più in generale su conseguenze a lungo termine sulla salute.

Diversi altri *endpoint* studiati, tra cui il sistema ematopoietico, il sistema endocrino e parametri chimici del sangue, non hanno fornito indicazioni convincenti di alcun effetto nocivo (WHO 2006).

Studi di laboratorio sull'uomo

Dopo la pubblicazione delle linee guida ICNIRP del 1994 (ICNIRP 1994), ci sono stati numerosi studi sull'uomo per valutare l'influenza sulla fisiologia e sul neurocomportamento di soggetti esposti a campi magnetici statici superiori a 8 T.

Studi dettagliati di valutazione dei parametri fisiologici, tra cui la temperatura corporea (sub-linguale), il ritmo respiratorio, la frequenza delle pulsazioni, la pressione sanguigna ed i livelli di ossigenazione delle dita, non hanno mostrato alcun effetto pronunciato per esposizioni a campi magnetici fino a 8 T (Chakeres et al 2003a). Si è osservata la distorsione del segnale ECG, causata dai potenziali di flusso indotti intorno al cuore (vedi sopra). A 8 T, la loro ampiezza era sufficiente a rendere l'ECG non interpretabile, ma il ritmo cardiaco non ne risentiva. L'unico parametro fisiologico che mostrava una variazione statisticamente significativa era un piccolo aumento di meno del 4% nella pressione sistolica del sangue, un valore che rientra nell'intervallo previsto per la resistenza al flusso sanguigno a seguito di effetti magnetoidrodinamici. Sulla base di una modellizzazione di questi effetti, si prevede una riduzione significativa del flusso sanguigno, superiore al 10%, soltanto a livelli di campo superiori a 15 T (Kinouchi et al 1996). La variazione di pressione sanguigna registrata non rappresentava un'alterazione clinicamente significativa o sintomatica per soggetti sani ed è ben all'interno delle normali variazioni fisiologiche. Non c'è alcuna evidenza nell'uomo di effetti dei campi magnetici statici su altri aspetti delle funzioni cardiovascolari. È stato anche riportato che l'esposizione di volontari a campi magnetici statici fino a 8 T non dà luogo a variazioni della temperatura corporea (Shellock e Cruess 1987; Chakeres et al 2003a). Questi risultati sono stati confermati in un recente studio con risonanza magnetica per immagini, in cui la componente statica del campo era di 9,4 T (Atkinson et al 2007), ma non vi era alcuna variazione del ritmo cardiaco o della pressione sistolica. Si deve però notare che in questo studio erano presenti anche campi gradiente e campi a radiofrequenza.

Recenti studi su effetti neurocomportamentali in soggetti fermi, esposti a livelli di campo fino a 8 T, non hanno dimostrato variazioni significative in molti parametri diversi, tra cui memoria a breve termine, memoria funzionale, linguaggio e tempo di reazione motorio-uditiva (Kangarlu et al 1999; Chakeres et al 2003b; Chakeres e de Vocht 2005).

Studi sul comportamento condotti su soggetti situati in prossimità di sistemi a risonanza magnetica fino a 7 T hanno suggerito la possibilità di una temporanea influenza negativa dell'esposizione sulle funzioni di coordinamento occhio-mano e sulla sensibilità al contrasto visivo, associate al movimento della testa entro il campo (de Vocht et al 2003; de Vocht et al 2006a, 2007a). De Vocht ed i suoi colleghi descrivono diminuzioni della capacità di controllo e delle funzioni di coordinamento occhio-mano, che sono entrambe misure specifiche del riflesso vestibolo-oculare, come risposta immediata a una serie standardizzata di movimenti del capo in campi statici compresi tra 0,5 T e 1,6 T, i quali danno luogo a velocità di variazione del campo di oltre $0,3 \text{ T s}^{-1}$ (a $1,6 \text{ T}$). L'entità dell'effetto sembrava dipendere dal flusso d'induzione magnetica variabile nel tempo per effetto del movimento del capo.

Diversi studi hanno riportato che individui esposti a campi magnetici statici superiori a 2-3 T sperimentano effetti sensoriali transitori associati al movimento in un gradiente di campo statico, come vertigini, nausea, gusto metallico e fosfeni magnetici, durante il movimento degli occhi o del capo (Schenck et al 1992; de Vocht et al 2006, 2006b; Atkinson et al 2007). Si possono comunque ridurre l'incidenza e la gravità di questi sintomi rallentando il movimento di un individuo nel campo magnetico di gradiente (Chakeres e de Vocht 2005).

Le basi teoriche e sperimentali delle vertigini indotte da un campo magnetico, sperimentate da persone che lavorano entro intensi campi magnetici statici o nella loro prossimità, sono state investigate in dettaglio da Glover et al (2007). Il movimento di volontari entro la cavità di un magnete da 7 T per corpo intero a una velocità di $0,1 \text{ m s}^{-1}$ si traduceva in una sensazione di ondeggiamento (in avanti o all'indietro) in alcuni soggetti, ma non in tutti. La direzione di rotazione apparente si invertiva quando si invertiva l'orientamento del soggetto rispetto al campo, ad esempio spostandolo da una posizione supina ad una prona, suggerendo così un effetto della corrente indotta sulla risposta neurale del sistema vestibolare. Il movimento del capo all'interno del campo omogeneo (gradiente zero) al centro del magnete dava luogo ad effetti simili a vertigini, da blandi a gravi, con due soggetti che hanno provato una nausea grave. Tali sensazioni persistevano fino a 30 minuti.

A differenza degli effetti indotti dal movimento, aumentavano significativamente gli sbandamenti in alcuni soggetti (meno del 50%) fermi in piedi in un campo di circa $0,8 \text{ T}$ vicino a un tomografo a risonanza magnetica. Si pensa che l'effetto sia coerente con differenze di suscettibilità magnetica tra i cristalli di calcite, che comprendono gli otoliti dell'organo vestibolare, e il fluido circostante.

E' chiaro che la sensibilità a questi effetti varia considerevolmente tra individui. Si è stimato che la soglia per vertigini indotte dal movimento in persone sensibili sia dell'ordine di 1 T s^{-1} per tempi maggiori di 1 s e che quella per lo sbandamento sia di $1 \text{ T}^2 \text{ m}^{-1}$ per il prodotto tra campo e gradiente. I lunghi tempi di integrazione richiesti affinché tali effetti diventino evidenti sono indicativi della risposta a frequenza relativamente a bassa ($0,4 - 4 \text{ Hz}$) del sistema vestibolare.

Uno studio su lavoratori addetti alla produzione di apparati di risonanza magnetica per immagini a 1,0 e 1,5 T (De Vocht et al 2006b) ha indagato l'incidenza di sintomi sensoriali, valutata attraverso un questionario alla fine di ogni turno di lavoro, e la prestazione di funzioni cognitive verificata prima e immediatamente dopo un turno di lavoro. I risultati hanno indicato che, durante il turno di lavoro, le segnalazioni occasionali di vertigini, di sapore metallico nella bocca e di problemi di concentrazione si presentavano più frequentemente nei soggetti impegnati nella produzione degli apparati rispetto ai controlli. In generale, questi sintomi si verificavano più spesso nei lavoratori che si spostavano velocemente rispetto a quelli che si muovevano più lentamente, anche se la sensibilità variava notevolmente tra individui. Non vi era comunque nessuna diminuzione significativa della prestazione cognitiva al termine di ogni turno di lavoro rispetto ai valori valutati prima del lavoro. I risultati sostengono l'idea che gli effetti indotti da un campo magnetico sulla funzione cognitiva, riportati in altri studi, siano transitori.

In conclusione, le informazioni attuali non indicano alcun rischio grave per la salute a seguito di un'esposizione acuta di individui fermi a campi magnetici statici fino a 8 T. Si deve però notare che tali esposizioni possono condurre a effetti sensoriali potenzialmente spiacevoli, come vertigini e diminuzioni temporanee della prestazione di alcune funzioni comportamentali durante il movimento della testa o del corpo.

Studi epidemiologici

I pochi studi epidemiologici disponibili sono stati per lo più condotti su soggetti esposti a campi magnetici statici modesti, fino a diverse decine di millitesla, che lavoravano in fonderie di alluminio, o in impianti di produzione di cloroalcali o come saldatori. Questo lavoro comporta però verosimilmente anche l'esposizione a svariate sostanze potenzialmente pericolose, come tracce di catrame e idrocarburi policiclici arilici che possono confondere i risultati. Inoltre, i campi statici utilizzati in processi industriali come l'elettrolisi sono prodotti da alimentatori rettificati con un livellamento imperfetto, cosicché sono presenti anche campi ELF. La valutazione dell'esposizione al campo magnetico statico è stata scarsa o inesistente e in qualche studio il numero dei partecipanti era molto piccolo. Gli *endpoint* sanitari studiati comprendono incidenza di cancro, variazioni ematologiche ed effetti collegati, aberrazioni cromosomiche, riproduzione e alterazioni muscolo-scheletriche.

Rockette ed Arena (1983) hanno studiato un'ampia coorte di lavoratori maschi dell'alluminio, mettendo a confronto la mortalità tra i lavoratori dell'alluminio con quella della popolazione maschile generale degli Stati Uniti. Hanno riportato una mortalità leggermente più alta rispetto a quella attesa, dovuta a tumori del pancreas, degli apparati genitali e urinari e linfo-emapoietici, anche se non statisticamente significativi. I campi magnetici statici non erano stati misurati e non potevano essere separati da altre esposizioni nell'ambiente di lavoro. Spinelli et al

(1991) hanno riportato un significativo aumento del rischio di mortalità per tumore cerebrale (il rateo standardizzato di mortalità era di 2,2 con un intervallo di confidenza al 90% pari a 1,2 - 3,7) e un aumento non significativo della mortalità (ma non dell'incidenza) per leucemia, che non sembrava spiegabile con l'esposizione a tracce volatili di catrame di carbone, in una coorte di lavoratori dell'alluminio (vi erano anche aumenti di altri tumori correlati all'esposizione al catrame di carbone). Gli autori non hanno trovato alcun aumento di rischio associato con l'esposizione cumulativa a campi magnetici statici. Due piccoli studi norvegesi su lavoratori dell'alluminio non hanno riportato alcun aumento di rischio di cancro associato con le stime dell'esposizione a campi magnetici statici (Rønneberg e Andersen 1995; Rønneberg et al 1999). In uno studio su lavoratori francesi dell'alluminio, condotto da Mur et al (1987), non si è trovato che la mortalità per cancro e quella per tutte le cause differissero significativamente dai livelli osservati per la popolazione generale maschile francese.

Studi su lavoratori di cloroalcali in Svezia ed in Norvegia (Ellingsen et al. 1993) hanno riportato aumenti di rischio di cancro al polmone al limite della significatività statistica, ma non cercavano di stimare l'esposizione a campi magnetici. Questi lavoratori erano stati anche esposti ad altri agenti, come il vapore di mercurio. Non era stato eseguito alcun controllo su un possibile confondimento dovuto al fumo. Bårregard et al (1985) hanno condotto uno studio su una coorte di lavoratori di un impianto di cloroalcali in cui le correnti continue di 100 kA utilizzate nella produzione elettrolitica di cloro davano luogo, nelle postazioni di lavoro, a livelli di induzione magnetica variabili tra 4 e 29 mT. L'incidenza di cancro osservata tra questi lavoratori in un periodo di 25 anni non era significativamente diversa da quella attesa.

Effetti sanitari diversi dal cancro sono stati considerati ancor meno frequentemente. La maggior parte di questi studi si basava su numeri molto piccoli e aveva numerosi limiti metodologici. Uno degli studi più grandi ha esaminato le conseguenze sulla fertilità e sulla gravidanza in 1.915 operatrici di sistemi a risonanza magnetica per immagini (Kanal et al 1993) che potevano comportare esposizioni a campi fino a circa 1 T. Il rischio di aborto per gravidanze condotte durante il lavoro con risonanza magnetica era leggermente aumentato (in misura non statisticamente significativa) rispetto ad altri lavori e notevolmente più alto del rischio per le casalinghe. Si sono trovate piccole differenze nei parti prematuri e nelle nascite di bambini sotto peso rispetto alle casalinghe, ma non rispetto ad altre lavoratrici. Nell'analisi non è stata controllata l'età. Le lavoratrici addette a risonanza magnetica erano considerevolmente più anziane di quelle degli altri gruppi e la distorsione di selezione può aver alterato questo studio trasversale.

Nel complesso, i pochi studi epidemiologici disponibili hanno limiti metodologici e lasciano irrisolte numerose questioni relative alla possibilità di tumori e di altri effetti dell'esposizione di lungo termine a campi magnetici statici. Questi studi non indicano forti effetti dell'esposizione a campi magnetici statici dell'ordine di decine di millitesla sulle diverse patologie studiate, ma non sarebbero in grado di rilevare effetti piccoli o di media entità. Altre occupazioni con potenziali esposizioni a campi magnetici elevati, ad esempio negli operatori di risonanza magnetica, non sono stati adeguatamente valutati.

LIMITI DI ESPOSIZIONE

Vengono fornite indicazioni separate per le esposizioni professionali e per l'esposizione del pubblico in generale. Si raccomanda che i limiti per esposizioni professionali di queste linee guida vengano applicati a coloro che sono esposti a campi magnetici statici per l'esecuzione delle loro normali attività lavorative o per compiti loro assegnati. Il termine "pubblico in generale" si riferisce all'intera popolazione.

Esposizioni professionali

Limiti di esposizione. Si raccomanda che l'esposizione professionale della testa e del tronco non superi un valore di picco spaziale dell'induzione magnetica pari a 2 T, tranne nella seguente circostanza: per attività lavorative per cui si rendano necessarie esposizioni al di sopra di 2 T, si possono consentire esposizioni fino a 8 T se l'ambiente è controllato e se vengono messe in atto adeguate procedure di lavoro che controllino gli effetti indotti dal movimento. Gli effetti sensoriali dovuti al movimento all'interno del campo possono essere evitati rispettando le restrizioni di base fissate nelle linee guida per i campi ELF. Se limitate alle estremità, sono accettabili esposizioni massime fino a 8 T.

Spiegazione. Lo sviluppo di linee guida per i campi statici pone due difficili problemi. In primo luogo se, e in quale misura, le linee guida debbano consentire la possibilità che, in alcuni lavoratori esposti, si manifestino effetti sensoriali temporanei, senza conseguenze note a lungo termine o patologiche. In secondo luogo, quanto le restrizioni debbano proibire livelli di esposizione superiori a quelli a cui arrivano le esperienze sull'uomo e per i quali quindi non vi siano effetti nocivi noti, ma interrogativi dovuti alla mancanza di conoscenze. Riguardo al primo problema l'ICNIRP ritiene che esistano situazioni professionali in cui, con adeguate informazioni e addestramento, è ragionevole che i lavoratori accettino volontariamente e consapevolmente la possibilità di effetti sensoriali transitori come la nausea, perché non si ritiene che questi portino a effetti sanitari a lungo termine o patologici. Riguardo al secondo aspetto, l'ICNIRP ritiene che le esposizioni consentite dalle linee guida debbano basarsi su

livelli per i quali vi sia un'evidenza apprezzabile sull'uomo e che non si dovrebbe oltre questi semplicemente per mancanza di evidenze di effetti nocivi.

Nota: Si riconosce che, a scopo di ricerca, si possa voler indagare gli effetti di questi livelli più alti; queste esposizioni sperimentali sono però materia per i comitati etici (strutture di controllo istituzionali).

Dopo la pubblicazione delle linee guida del 1994, ci sono stati diversi studi su soggetti esposti a campi magnetici statici fino a 8 T (Kangarlu et al 1999; Chakeres et al 2003a, 2003b; Glover et al 2007). Al di sopra di 2 T sono stati occasionalmente osservati, in qualche persona, effetti transitori come vertigini, nausea e fosfeni, ma non si è trovata alcuna evidenza di effetti sanitari irreversibili o gravi. Poiché il sistema vestibolare è stimolato in modo ottimale da campi elettrici indotti e da correnti indotte di bassa frequenza (attorno a 1 Hz) (Stephen et al 2005) a livelli inferiori alle soglie per la stimolazione nervosa (Glover et al, 2007), si considera che la protezione da vertigini e nausea fornisca un'adeguata protezione anche dagli altri effetti delle correnti indotte nella testa e nel tronco, come la stimolazione dei nervi periferici.

In studi su animali si sono osservate tra 4 T e 14 T risposte di avversione al campo, che possono derivare da effetti del genere. Non c'è però evidenza, fino a 8 T, di effetti cardiovascolari o neurologici clinicamente significativi, effetti che costituiscono il maggior problema potenziale per quanto riguarda la limitazione dell'esposizione a campi magnetici statici. Pertanto, nei luoghi di lavoro in generale, il limite di esposizione è fissato a 2 T per prevenire vertigini, nausea ed altre sensazioni; tuttavia, per specifiche applicazioni professionali, quando l'ambiente è controllato e sono messe in atto adeguate procedure di lavoro, è accettabile l'esposizione fino a 8 T. Il grado di queste sensazioni dipende molto da fattori individuali come la propensione personale a malesseri dovuti al moto e la velocità di movimento nel campo; quindi, se un individuo sperimenta tali effetti, può evitarli o ridurli al minimo muovendosi il più lentamente possibile. Le raccomandazioni non si basano sull'esposizione media nel tempo perché, oltre all'esperienza acquisita grazie all'uso in tutto il mondo di sistemi a risonanza magnetica e di altre sorgenti di campi statici negli ultimi 20 anni, anche considerazioni meccanicistiche indicano che qualunque effetto debba verosimilmente essere acuto.

Sulla base di modelli del flusso sanguigno in vasi più di quelli della testa e del tronco, nonché dell'esperienza fornita dalle sorgenti esistenti, non si prevedono effetti nocivi nelle estremità a seguito di esposizioni fino a 8 T. Non vi sono dati su cui poter basare, per le estremità, un limite di esposizione più alto.

Esposizioni del pubblico in generale

Limiti di esposizione. Sulla base delle conoscenze scientifiche relative agli effetti diretti dei campi statici sull'uomo, l'esposizione acuta del pubblico non dovrebbe superare 400 mT (in qualunque parte del corpo). L'ICNIRP riconosce però che, a causa di potenziali effetti nocivi indiretti, si debbano adottare provvedimenti pratici per impedire pericolose esposizioni inconsapevoli di persone con dispositivi medici elettronici impiantati o con impianti che contengano materiali ferromagnetici, nonché ferite dovute ad oggetti ferromagnetici volanti. Queste considerazioni possono portare a restrizioni a livelli molto più bassi, come 0,5 mT (IEC 2002). La fissazione di limiti di esposizione riguardo a questi effetti non biologici non sono però compito dell'ICNIRP.

Spiegazione. Queste linee guida ICNIRP si basano sugli effetti biologici diretti dell'esposizione a campi magnetici statici. Vi sono però altri rischi non direttamente biologici dei campi statici, che non sono quindi di competenza dell'ICNIRP ma sono tuttavia importanti per la protezione della salute (si veda la sezione sulle misure protettive).

Sulla base dei dati scientifici disponibili al di sopra di 2 T, si deriva il limite di esposizione per il pubblico (per qualunque parte del corpo) applicando un fattore di riduzione di 5 rispetto al limite professionale per la testa ed il tronco. Questo fattore di riduzione tiene conto di tutti i membri della popolazione.

I limiti raccomandati per le esposizioni professionali e del pubblico a campi magnetici statici vengono riassunti nella Tabella 2.

Tabella 2. Limiti di esposizione^a a campi magnetici statici

Caratteristiche dell'esposizione	Induzione magnetica
Professionale ^b	
Esposizione della testa e del tronco	2 T
Esposizione delle estremità ^c	8 T
Pubblico in generale ^d	
Esposizione di qualunque parte del corpo	400 mT

^aL'ICNIRP raccomanda che questi limiti siano operativamente considerati come limiti di esposizione di picco spaziale.

^bPer specifiche applicazioni professionali può essere giustificata l'esposizione fino a 8 T se l'ambiente è controllato e se si applicano adeguate procedure di lavoro per controllare effetti indotti dal movimento.

^cNon sono disponibili informazioni sufficienti su cui basare limiti di esposizione oltre 8 T.

^dA causa di potenziali effetti indiretti avversi, l'ICNIRP riconosce che si debbano adottare provvedimenti pratici per impedire pericolose esposizioni inconsapevoli di persone con dispositivi medici elettronici impiantati o con impianti contenenti materiale ferromagnetico, nonché pericoli dovuti a oggetti volanti, che possono portare a restrizioni a livelli molto più bassi, come 0,5 mT

MISURE PROTETTIVE

L'ICNIRP raccomanda che l'uso di queste linee guida sia accompagnato da appropriate misure protettive. Tali misure devono essere considerate separatamente per i posti pubblici, dove le esposizioni a campi magnetici statici sono verosimilmente molto basse e rare, e per i luoghi di lavoro, dove in alcune situazioni lavorative si possono regolarmente incontrare campi statici intensi.

Vi sono tre aree di particolare attenzione. Per quanto riguarda i membri del pubblico, si devono proteggere le persone con dispositivi medici impiantati da possibili interferenze e da forze esercitate su impianti che contengono materiale ferromagnetico. Inoltre, in alcune situazioni specifiche ci sono rischi derivanti da oggetti ferromagnetici volanti come gli utensili. In terzo luogo, in situazioni professionali che comportano l'esposizione a campi molto intensi, occorre un insieme di procedure di lavoro, specifiche per ogni sito, volte a minimizzare l'impatto di sintomi transitori come vertigini e nausea.

Effetti su dispositivi medici impiantati

Le autorità responsabili della sicurezza devono assicurare che vi siano restrizioni per proteggere i soggetti portatori di dispositivi medici impiantati, ferromagnetici o elettronici, sensibili ai campi magnetici. Vi sono molti individui che portano tali dispositivi, senza essere talvolta consapevoli di averli (ad esempio per le clip chirurgiche).

Si è osservato che l'interferenza elettromagnetica dovuta a campi magnetici statici di bassa intensità altera il funzionamento dei pacemaker, particolarmente di quelli con interruttori magnetici, e di altri tipi di dispositivi medici elettronici tra cui defibrillatori cardiaci, pompe per infusione di ormoni (ad es. l'insulina), apparati per la stimolazione neuromuscolare (ad es. il muscolo dello sfintere della vescica), neurostimolatori e protesi attivate elettricamente (ad esempio per gli arti e per l'orecchio interno). In generale, il funzionamento di questi dispositivi non è influenzato negativamente da campi magnetici statici inferiori a 0,5 mT.

Oltre a potenziali problemi dovuti a interferenza elettromagnetica, molti dispositivi medici impiantati contengono materiali ferromagnetici che li rendono suscettibili a forze e torsioni in campi magnetici statici. Questi effetti meccanici possono portare a movimenti e anche a spostamenti degli impianti ferromagnetici impiantati, specialmente quelli di grandi dimensioni come le protesi d'anca. Altri dispositivi ferromagnetici che potrebbero esserne affetti comprendono clip per aneurismi, clip chirurgiche e stent metallici, protesi di valvole cardiache e cerchiaggi per annuloplastica, contraccettivi impiantati, involucri di dispositivi elettronici e impianti dentali metallici, anche se la maggior parte degli impianti moderni non è ferromagnetica. Gli aspetti di sicurezza dell'esposizione di questi dispositivi ai campi utilizzati nella risonanza magnetica per immagini sono stati ampiamente studiati (New et al 1983; Kanal et al 1990; Shellock e Cruess 2004). Dagli studi condotti finora non emergono evidenze che campi magnetici statici al livello di 0,5 mT o inferiori esercitino su tali dispositivi forze o torsioni sufficienti per creare rischi per la salute.

Di conseguenza, si pongono segnali di avvertimento o si tracciano linee attorno a siti con livelli di induzione magnetica superiori a 0,5 mT, ad esempio attorno a sistemi di risonanza magnetica per immagini, per demarcare le zone di esclusione del pubblico,

Movimento di oggetti metallici

Si deve fornire protezione da oggetti metallici volanti, mossi dalle forze del campo magnetico. Tali rischi si verificano in campi dell'ordine di diversi millitesla. Il limite raccomandato di 400 mT si basa soltanto sugli effetti

biologici diretti del campo, ed è molto superiore al livello a cui possono verificarsi incidenti dovuti a forze meccaniche su oggetti metallici; quindi le autorità competenti per la sicurezza devono salvaguardare il pubblico da questi rischi meccanici.

Un limite di 0,5 mT per la protezione dei dispositivi medici è in linea con quello per la protezione da oggetti metallici volanti, che sperimentano notevoli forze meccaniche in campi magnetici statici. L'intensità della forza esercitata su tali oggetti dipende dalla loro dimensione e dal contenuto di materiali ferromagnetici, ma campi di intensità superiori a pochi millitesla provocare un significativo, rapido movimento di molti strumenti e di altri oggetti metallici comuni.

Sintomi transitori

Per alcune attività lavorative, come ad esempio per i chirurghi che operino all'interno di un dispositivo di risonanza magnetico aperto, sintomi acuti dovuti all'esposizione, come la nausea, potrebbero influenzare le prestazioni e quindi la sicurezza dei pazienti sui quali stanno operando. Analogamente, questi sintomi acuti potrebbero influenzare la possibilità di incidenti per un lavoratore. Ognuno di questi luoghi di lavoro dovrebbe disporre di un complesso di procedure e pratiche di lavoro, specifiche per le diverse situazioni professionali, che riducano al minimo le conseguenze negativa dell'esposizione.

Ringrazimenti - Durante la preparazione di questo documento, l'ICNIRP era composta dai seguenti membri:

P. Vecchia, Presidente, Italia; M. Hietanen, Vice-Presidente, Finlandia; A. Ahlbom, Svezia; L.E. Anderson, USA (fino al 2006); E. Breitbart, Germania; F.R. de Gruijl, Paesi Bassi; J.C. Lin, USA; R. Matthes, Germania; A.P. Peralta, Filippine; P. Söderberg, Svezia; B.E. Stuck, USA; A.J. Swerdlow, Regno Unito; M. Taki, Giappone; R. Saunders, Regno Unito; B. Veyret, Francia.

Il gruppo di lavoro che ha preparato la prima bozza del presente documento era composto dai seguenti membri: A.J. Swerdlow, Presidente; D.W. Chakeres, USA; M. Feychting, Svezia; J. Hennig, Germania; T.S. Tenforde, USA; E. van Rongen, Olanda.

L'ICNIRP ringrazia per gli utili commenti ricevuti da molti scienziati, attraverso il suo processo di revisione esterna.

Per il supporto economico ricevuto dall'ICNIRP si ringraziano l'Associazione Internazionale di Radioprotezione (IRPA), l'Organizzazione Mondiale della Sanità, la Commissione Europea e il Ministero Federale per l'Ambiente della Germania.

RIFERIMENTI

- Atkinson IC, Renteria L, Burd H, Pliskin N H, Thulborn KR. Safety of human MRI at static fields above the FDA 8 T guideline: sodium imaging at 9.4 T does not affect vital signs or cognitive ability. *J Magn Reson Imaging* 26(5):1222-7, 2007.
- Bårregard L, Jarvholm B, Ungethum E. Cancer among workers exposed to strong static magnetic fields. *Lancet* 2:892, 1985.
- Bellossi A. The effect of a static uniform magnetic field on mice: a study of methylcholanthren carcinogenesis. *Radiat Environ Biophys* 23(2):107-109, 1984.
- Bezanilla F. The voltage sensor in voltage-dependent ion channels. *Physiol Rev* 80(2):555-92, 2000.
- Bellossi A. Effect of static magnetic fields on survival of leukaemia-prone AKR mice. *Radiat Environ Biophys* 25(1):75-80, 1986.
- Chadwick PJ, Lowes FI. Magnetic fields on British trains. *Ann Occup Hyg* 42:331-335, 1998.
- Chakeres DW, Kangarlu A, Boudoulas H, Young DC. Effect of static magnetic field exposure of up to 8 tesla on sequential human vital sign measurements. *J Magn Reson Imaging* 18:346-352, 2003a.
- Chakeres DW, Bornstein R, Kangarlu A. Randomized comparison of cognitive function in humans at 0 and 8 tesla. *J Magn Reson Imaging* 18:342-345, 2003b.
- Chakeres DW, de Vocht R. Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems. *Prog Biophys Mol Biol* 87(2-3):255-265, 2005.
- Crozier S, Liu F. Numerical evaluation of the fields induced by body motion in or near high-field MRI scanners. *Prog Biophys Mol Biol* 87(2-3):267-278, 2005.
- Denegre JM, Valles JM Jr, Lin K, Jordan WB, Mowry KL. Cleavage planes in frog eggs are altered by strong magnetic fields. *Proc Natl Acad Sci USA* 95(25):14729-14732, 1998.
- de Vocht F, van Wendelde-Joode B, Engels H, Kromhout H. Neurobehavioral effects among subjects exposed to high static and gradient magnetic fields from a 1.5 tesla magnetic resonance imaging system – a case-crossover pilot study. *Magn Reson Med* 50:67-674, 2003.
- de Vocht F, Stevens T, van Wendelde-Joode B, Engels H.; Kromhout H. Acute neurobehavioural effects of exposure to static magnetic fields: analysis of exposure-response relations. *J Magn Reson Imaging* 23(3):291-297, 2006a.

- de Vocht F, van Drooge H, Engels H, Kromhout H. Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. *J Magn Reson Imaging* 23(2):197-204, 2006b.
- de Vocht F, Stevens T, Glover P, Sunderland A, Gowland P and Kromhout H. Cognitive effects of head-movement in stray fields generated by a 7 Tesla whole-body MRI magnet. *Bioelectromagnetics* 28:247-255, 2007a.
- de Vocht F, Glover P, Engels H, Kromhout H. Pooled analyses of effects on visual and visuomotor performance from exposure to magnetic stray fields from MRI scanners: application of the Bayesian framework. *J Magn Reson Imaging* 26(5):1255-60, 2007b.
- Ellingsen DG, Andersen A, Nordhagen HP, Efskind J, Kjuus H. Incidence of cancer and mortality among workers exposed to mercury vapor in the Norwegian chloralkali industry. *Br J Ind Med* 50:875-880, 1993.
- Eveson RW, Timmel CR, Brocklehurst B, Hore P J, McLauchlan KA. The effects of weak magnetic fields on radical recombination reactions in micelles. *Int J Radiat Biol* 76(11):1509-22, 2000.
- Gaffey CT, Tenforde TS. Alterations in the rat electrocardiogram induced by stationary magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 2:357-370, 1981.
- Gaffey CT, Tenforde, TS. Frog sciatic nerve bioelectric activity during exposure to stationary magnetic fields. *Radiat Envir Biophys* 22:61-73, 1983.
- Glover PM, Bowtell R. Measurement of electric fields induced in a human subject due to natural movements in static magnetic fields or exposure to alternating magnetic field gradients. *Phys Med Biol* 53: 361–373, 2008.
- Glover PM, Cavin I, Qian R, Bowtell R, Gowland PA. Magnetic-field-induced vertigo: a theoretical and experimental investigation. *Bioelectromagnetics*, 28(5):349-61, 2007.
- Gowland PA. Present and future magnetic resonance sources of exposure to static fields. *Prog Biophys Mol Biol* 87(2-3):175-83, 2005.
- Grissom CB. Magnetic field effects in biology - a survey of possible mechanisms with emphasis on radical-pair recombination. *Chemical Reviews* 95:3-24,1995.
- Grossman GE, Leigh RJ, Abel LA, Lanska DJ, Thurston SE. Frequency and velocity of rotational head perturbations during locomotion. *Exp Brain Res* 70: 470-476, 1988.
- Holden AV. The sensitivity of the heart to static magnetic fields. *Prog Biophys Mol Biol* 87 (2-3):289-320, 2005
- Hong CZ, Harmon D, Yu J. Static magnetic field influence on rat tail nerve function. *Arch Phys Med Rehabil* 67(10):746-749, 1986.
- Hore PJ. Rapporteur's report: sources and interaction mechanisms. *Prog Biophys Mol Biol* 87(2-3):205-212, 2005.
- Haupt TA, Pittman DW, Barranco JM, Brooks EH, Smith JC. Behavioural effects of high-strength static magnetic fields on rats. *J Neurosci* 23(4):1489-1505, 2003.
- Ichioka S, Minegishi M, Iwasaka M, Shibata M, Nakatsuka T, Harii K, Kamiya A, Ueno S. High-intensity static magnetic fields modulate skin microcirculation and temperature in vivo. *Bioelectromagnetics* 21:183-188, 2000.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 66:100-106; 1994.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0-100 kHz). Matthes R., McKinlay AF, Bernhardt JH, Vecchia P, Veyret, B, eds. Oberschleissheim, Germany: Publication ICNIRP 13/2003.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Medical magnetic resonance (MR) procedures: Protection of patients. *Health Phys* 87:197-216; 2004.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). EMF-emitting new technologies (in prep) 2008. (?)
- International Electrotechnical Commission (IEC). Safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. IEC 60601-2-33, Geneva, Switzerland, 2002
- Kanal E, Shellock FG, Talagala L. Safety considerations in MR imaging. *Radiol* 176:593-606, 1990.
- Kanal E, Gillen J, Evans JA., Savitz DA., Shellock FG. Survey of reproductive health among female MR workers. *Radiol* 187:395-399, 1993.
- Kangarlu A, Burgess RE, Zhu H, Nakayama T, Hamlin RI, Abduljalh AM, Robitaille PM. Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultrahigh field magnetic resonance imaging. *Magn Reson Imaging* 17:1407-1416, 1999.
- Kinouchi Y, Yamaguchi Y, Tenforde TS. Theoretical analysis of magnetic field interactions with aortic blood flow. *Bioelectromagnetics* 17:21-32, 1996.
- Kirschvink JL, Walker MM and Diebel. Magnetite-based magnetoreception. *Curr Opin Neurobiol*, 11(4): 462-467, 2001.
- Konerman G, Monig H. Studies on the influence of static magnetic fields on prenatal development of mice. *Radiologie* 26:490-497, 1986 (in German).
- Liu Y, Edge R, Henbest K, Timmel CR, Hore PJ, Gast P. Magnetic field effect on singlet oxygen production in a biochemical system. *Chem Commun (Camb)*. 2:174-6, 2005.
- MacDougall H G and Moore S T. Marching to the beat of the same drummer: the spontaneous tempo of human locomotion. *J Appl Physiol* 99:1164–1173, 2005.

- McKinlay AF, Allen SG, Cox R, Dimbylow PJ, Mann SM, Muirhead CR, Saunders RD, Sienkiewicz ZJ, Stather JW, Wainwright PR. Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz). *Docs NRPB*, 15(3), Chilton, NRPB; 2004.
- McLauchlan KA, Steiner UE. The spin-correlated radical pair as a reaction intermediate. *Molecular Physics* 73:241-263, 1991.
- Mevissen M, Stamm A, Buntenkotter 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(2):131-143, 1993.
- Mur JM, Moulin JJ., Meyer-Bisch C, Massin N, Coulon JP, Loulergue J. Mortality of aluminum reduction plant workers in France. *Int J Epidemiology* 16:256-264, 1987.
- Murakami J, Torii Y, Masuda K. Fetal development of mice following intrauterine exposure to a static magnetic field of 6.3 T. *Magn Reson Imaging* 10:433-437, 1992.
- Miyakoshi J. Effects of static magnetic fields at the cellular level. *Prog Biophys Mol Biol* 87(2-3):213-224, 2005.
- Nagakura S, Hayashi H, Azumi T, eds. *Dynamic spin chemistry: Magnetic controls and spin dynamics of chemical reactions*. Kodansha and John Wiley, Tokyo and New York; 1998.
- New PF, Rosen BR, Brady TJ, Buonanno FS, Kistler JP, Burt CT, Hinshaw WS, Newhouse JH, Pohost GM, Tavera, JM. Potential hazards and artifacts of ferromagnetic and nonferromagnetic surgical and dental materials and devices in nuclear magnetic resonance imaging. *Radiol* 147:139-148, 1983.
- Noble D, McKinlay A, Repacholi M, eds. *Effects of static magnetic fields relevant to human health*. *Prog Biophys Mol Biol* 87(2-3):171-372, 2005.
- Nolte CM, Pittman DW, Kalevitch B, Henderson R, Smith JC. Magnetic field conditioned taste aversion in rats. *Physiol Behav* 63(4):683-688, 1998.
- Okano H, Masuda H and Ohkubo C. Effects of a 25 mT static magnetic field on blood pressure in reserpine-induced hypotensive Wistar-Kyoto rats. *Bioelectromagnetics*, 22(6): 408-418; 2005.
- Okano H, Ohkubo C. Elevated plasma nitric oxide metabolites in hypertension: Synergistic vasodepressor effects of a static magnetic field and nicardipine in spontaneously hypertensive rats. *Clinical Hemorheology and Microcirculation* 34:303-308, 2006.
- Okazaki R, Ootsuyama A, Uchida S, Norimura T. Effects of a 4.7 T static magnetic field on fetal development in ICR Mice. *J Radiat Res (Tokyo)* 42:273-283, 2001.
- Pozzo T, Berthoz A and Lefort L. Head stabilisation during various locomotor tasks in humans. *Exp Brain Res* 82:97-106, 1990.
- Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J* 78(2):707-718, 2000.
- Ritz T, Thalau P, Phillips J B, Wiltschko R, Wiltschko W. Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature* 429:177-180, 2004.
- Rockette HE, Arena VC. Mortality studies of aluminum reduction plant workers: Potroom and carbon department. *J Occup Med* 25:549-557, 1983.
- Rønneberg A, Andersen A. Mortality and cancer morbidity in workers from an aluminum smelter with prebaked carbon anodes. 2. Cancer morbidity. *Occup Environ Med* 52:250-254; 1995.
- Rønneberg A, Haldorsen R, Romundstad P, Andersen A. Occupational exposure and cancer incidence among workers from an aluminum smelter in western Norway. *Scand J Work Environ & Health* 25:207-214, 1999.
- Saunders RD. Static magnetic fields – animal studies. *Prog Biophys Mol Biol* 87(2-3):225-241, 2005.
- Schenck JF. Safety of strong, static magnetic fields. *J Magn Reson Imaging* 12(1):2-19, 2000.
- Schenck JF. Physical interactions of static magnetic fields with living tissues. *Prog Biophys Mol Biol* 87(2-3):185-204, 2005.
- Schenck JF, Dumoulin CL, Redington RW, Kressel HY, Elliott RT, McDougall IL. Human exposure to 4.0-tesla magnetic fields in a whole-body scanner. *Med Phys* 19:1089-1098, 1992.
- Schulten. K. Magnetic field effects in chemistry and biology. *Adv Solid State Phys* 22:61-83, 1982.
- Shellock FG, Crues JV. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical MR imaging at 1.5 T. *Radiol* 163:259-262, 1987.
- Shellock RG, Crues JV. MR procedures: Biologic effects, safety, and patient care. *Radiol* 232:635-652, 2004.
- Sikov MR, Mahlum DD, Montgomery LD, Decker JR. Development of mice after intrauterine exposure to direct-current magnetic fields. In: Phillips, RD, Gillis MF, Kaune WT, Mahlum DD, eds. *Biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields*, Proceedings of the 18th Hanford Life Sciences Symposium. Springfield, VA: National Technical Information Service; 1979:462-473.
- Snyder DJ, Jahng JW, Smith JC, and Houpt T A. c-Fos induction in visceral and vestibular nuclei of the rat brain stem by a 9.4 T magnetic field. *NeuroReport* 11:2681-2685, 2000.
- Spinelli JJ, Band PR., Svirchev LM, Gallagher RP. Mortality and cancer incidence in aluminum reduction plant workers. *J Occup Environ Med* 33:1150-1155, 1991.
- Stephen T, Deutschländer A, Nolte A, Schneider E, Wiesmann M, Brandt T, Dieterich M. Functional MRI of galvanic vestibular stimulation with alternating currents at different frequencies. *NeuroImage* 26:721-732, 2005.

- Tenforde TS. Biological effects of stationary magnetic fields. In: Grandolfo M, Michaelson SM; Rindi A, eds. Biological effects and dosimetry of static and ELF electromagnetic fields. Plenum Press, New York and London; 1985:93-128.
- Tenforde TS, Gaffey CT, Moyer BR, Budinger TF. Cardiovascular alterations in Macaca monkeys exposed to stationary magnetic fields: Experimental observations and theoretical analysis. Bioelectromagnetics 4:1-9, 1983.
- Tenforde TS. Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system. Prog Biophys Molec Biol 87:279-288, 2005.
- Trzeciak HI, Grzesik J, Bortel M, Kuska R, Duda D, Michnik J, Malecki A. Behavioral effects of long-term exposure to magnetic fields in rats. Bioelectromagnetics 14(4):287-297, 1993.
- Ueno S, Iwasaka M. Properties of diamagnetic fluid in high gradient fields. J Appl Phys 75(10):7177-7180; 1994.
- Valles JM Jr., Wasserman SR, Schweidenback C, Edwardson J, Denegre JM and Mowry KL Processes that occur before second cleavage determine third cleavage orientation in Xenopus. Exp Cell Res 274(1):112-118, 2002.
- World Health Organization (WHO). Environmental Health Criteria 232. Static Fields. Geneva: World Health Organization; 2006.
- Weiss J, Herrick RC, Taber KH, Contant C, Plishker GA. Bio-effects of high magnetic fields: a study using a simple animal model. Magn Reson Imaging 10(4):689-694, 1992.
- Zhang QM, Tokiwa M, Doi T, Nakahara T, Chang PW, Nakamura N, Hori M, Miyakoshi J, Yonei S. Strong static magnetic field and the induction of mutations through elevated production of reactive oxygen species in Escherichia coli soxR. Int J Radiat Biol 79(4):281-286, 2003.

*Traduzione italiana di Paolo Vecchia e Valeria Lorenzini, Istituto Superiore di Sanità, Roma
La responsabilità del testo italiano è interamente dei traduttori. In caso di difformità rispetto all'originale, fa fede il testo inglese.
L'articolo originale è disponibile sul sito dell'ICNIRP: www.icnirp.org*