

VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE DEGLI OPERATORI IN RISONANZA MAGNETICA¹

Introduzione

I tomografi a risonanza magnetica (RM; un esempio in Figura 1) si vanno sempre più diffondendo nelle strutture sanitarie pubbliche e private. La presenza di questi apparati diagnostici pone problemi rilevanti per chi si occupa di protezione dalle esposizioni ai campi elettromagnetici, a causa della complessità dei campi dispersi e della loro rilevante intensità. Di fatto, l'esposizione occupazionale nei reparti di RM ha rappresentato uno degli aspetti cruciali nel processo di sospensione e successiva revisione della Direttiva Europea 2004/40 [1], che si è concluso con la pubblicazione della nuova Direttiva 2013/35 [2].



Figura 1: tomografo a risonanza magnetica da 1.5 T.

Un tomografo RM produce tre diverse tipologie di campi elettromagnetici.

1. Un campo magnetostatico (CMS) molto intenso (i tomografi a corpo intero attualmente più diffusi in Italia lavorano a 1.5 T, ma già da tempo sono stati introdotti tomografi a 3 T, mentre valori ancora più elevati iniziano ad essere utilizzati nelle applicazioni di ricerca, soprattutto in ambito funzionale). L'intensità di questo campo determina la frequenza di risonanza magnetica dei nuclei di idrogeno (protoni), in ragione di circa 42 MHz per ogni tesla. Il CMS è confinato principalmente all'interno di un'apposita struttura cilindrica (il *bore*) in cui viene posizionato il paziente, ma valori considerevoli (progressivamente più bassi allontanandosi dal *bore*) sono dispersi in tutto lo spazio circostante. Il campo magnetostatico, per motivi tecnologici, non viene mai spento, neppure quando l'apparato è inutilizzato per lungo tempo, ed è quindi sempre presente nei locali adibiti alla risonanza.
2. Un campo elettromagnetico a radiofrequenza (CRF) attivato ad impulsi, utilizzato per eccitare i nuclei di idrogeno alla frequenza di risonanza; il rilassamento che ne consegue quando il CRF viene disattivato genera il segnale alla base della produzione dell'immagine tomografica.
3. Un campo magnetico di gradiente (CMG) a frequenza intermedia, che modifica localmente il campo magnetostatico e quindi la frequenza di risonanza dei protoni, in modo da codificare spazialmente il segnale prodotto. Il CMG viene attivato e disattivato

¹ Estratto e adattato dal testo "Risonanza magnetica: problematiche di sicurezza e livelli di esposizione degli operatori", di D.Andreuccetti, G.M.Contessa, R.Lodato e R.Pinto, pubblicato negli Atti del XXIV Congresso Nazionale AIRM "Rischio Radiologico e Sorveglianza Medica in Ospedale" svoltosi a Firenze dal 28 al 30 maggio 2015.

seguendo opportune sequenze (dipendenti dal tipo di esame che si vuole eseguire), producendo così un campo magnetico variabile nel tempo in modo complesso.

Nella maggior parte delle situazioni, il personale sanitario è esposto solo al CMS e alle conseguenze dei movimenti in esso. Il personale, infatti, lascia il locale del tomografo durante l'esecuzione degli esami, quando vengono attivati il CMG e il CRF. Vi sono però alcune eccezioni, come la risonanza magnetica interventistica (ossia l'esecuzione di interventi chirurgici sotto continuo monitoraggio RM, che per altro non risulta essere praticata in Italia), oppure il caso di esami su soggetti sedati, per i quali è necessaria la presenza di un anestesista accanto al paziente, come talvolta accade in cardiologia pediatrica.

Un primo studio sull'argomento, finanziato nel 2008 dalla Commissione Europea [3], aveva indicato che – sebbene il 90% delle procedure esaminate sembrassero conformi alle disposizioni della direttiva 2004/40 – potevano restare fuori alcune situazioni particolari ma importanti, come appunto la RM interventistica e i casi di movimenti molto rapidi nelle aree più vicine al tomografo.

Come conseguenza di questa situazione, anche in Italia si sono avute iniziative di ricerca volte a fornire elementi utili alla valutazione dell'esposizione degli operatori sanitari nei reparti di RM, sia sul piano metodologico (messa a punto di catene strumentali e di procedure di misura e di analisi), sia sul piano conoscitivo (acquisizione di informazioni sugli effettivi livelli di esposizione). L'ISPESL (confluito nell'INAIL alla fine del 2010) ha varato nel 2008 e nel 2010 due specifici progetti di ricerca sull'argomento che, inoltre, ha trovato spazio anche nel programma strategico "Sicurezza e tecnologie sanitarie" del Ministero della Salute (bando 2008) e in un progetto di ricerca finalizzata dello stesso Ministero (bando 2009), dedicato allo "Studio ex vivo e in vitro degli effetti dei campi elettromagnetici sulle cellule staminali e valutazione del rischio degli operatori sanitari".

Quadro normativo

La Direttiva 2013/35 sopra citata stabilisce un insieme completo di criteri per la valutazione dell'esposizione occupazionale ai campi elettromagnetici. Per quanto riguarda i valori limite, essa si rifà alle linee guida rilasciate dall'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) nel 1998 sui campi ad alta frequenza [4]², nel 2009 sui campi statici [5] e nel 2010 sui campi a bassa frequenza [6]. L'ICNIRP ha inoltre pubblicato nel 2014 le linee guida concernenti il movimento di un individuo in un campo magnetostatico e l'esposizione ai campi magnetici lentissimamente variabili nel tempo [7]; queste però, al momento, non sono state inserite in atti legislativi formali.

Le linee guida ICNIRP del 1998 [4] costituiscono anche il riferimento scientifico della Raccomandazione Europea 1999/519 [8] per la limitazione dell'esposizione della popolazione tanto alle basse, quanto alle alte frequenze. Per vari motivi, gli aspetti normativi pertinenti la protezione della popolazione sono di interesse anche per chi si occupa di esposizioni occupazionali.

Nel seguito, ci riferiremo pertanto all'insieme delle linee guida ICNIRP [4], [5], [6] e [7] per confrontare e discutere i livelli di esposizione che si incontrano in RM.

² Le linee guida ICNIRP del 1998 disciplinano con continuità tutto l'intervallo di frequenze da 0 Hz a 300 GHz, ma solo la parte relativa agli effetti termici (con frequenze maggiori di 100 kHz) è stata recepita dalla direttiva 2013/35, che fa invece riferimento alle più recenti linee guida del 2010 per gli effetti di stimolazione del sistema nervoso alle basse frequenze.

Materiali e metodi

Il metodo del picco ponderato

Le normative di radioprotezione specificano valori limite che variano in funzione della frequenza: esse pertanto sono applicabili in modo semplice solo ai segnali sinusoidali. In presenza di segnali con forma d'onda complessa, le normative propongono dei metodi di elaborazione che consentono di pesare opportunamente i contributi alle varie frequenze presenti nello spettro del campo, tenendo conto che a ciascuno di essi si deve applicare in genere un valore limite diverso.

Il metodo più adatto a trattare le forme d'onda che si incontrano in RM è il "metodo del picco ponderato" (o metodo WP, dall'inglese *weighted-peak*) [9]. Questo metodo consiste nel calcolare un indice, il cui valore deve essere inferiore a 1 per garantire la conformità, attraverso una elaborazione che tiene conto sia delle ampiezze dei contributi spettrali presenti nel segnale considerato (rapportate ai valori di riferimento normativi alle frequenze corrispondenti), sia delle rispettive fasi. Il valore assoluto massimo della forma d'onda così elaborata costituisce l'indice cercato. In formule, per la componente X del campo magnetico avremo:

$$WP_x(t) = \sum_i \frac{B_x(f_i)}{B_L(f_i)\sqrt{2}} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \phi_i) \quad (1)$$

dove $B_x(f_i)$ e θ_i sono ampiezza di picco e fase del contributo spettrale alla frequenza f_i della componente X del campo e $B_L(f_i)$ è il livello di riferimento ICNIRP alla stessa frequenza (in valore efficace); ϕ_i è lo sfasamento che verrebbe introdotto, alla frequenza f_i , da una catena di filtri analogici del primo ordine, che simula la risposta di una cellula nervosa ed è progettata per fornire una funzione di trasferimento uguale, in ampiezza, al termine $1/B_L(f_i)\sqrt{2}$. Espressioni analoghe valgono per $WP_y(t)$ e $WP_z(t)$. Una volta calcolati gli indici in funzione del tempo per le tre componenti cartesiane del campo, l'indice WP complessivo si trova prendendo il valore massimo della radice quadratica della somma istantanea dei quadrati delle tre componenti:

$$Indice WP = \text{Max} \sqrt{WP_x^2(t) + WP_y^2(t) + WP_z^2(t)} \quad (2)$$

dove il massimo si intende preso su tutto l'arco temporale di durata dell'esposizione.

L'equazione (2) può essere applicata sia con soluzioni in *hardware*, mediante una catena di opportuni filtri analogici, sia per via *software*, mediante procedure numeriche in grado di emulare, nel dominio del tempo o della frequenza, il comportamento dei filtri stessi.

Campo magnetico di gradiente

All'interno del *bore* di un apparato RM, il campo magnetico di gradiente è diretto prevalentemente lungo l'asse principale; il CMG si annulla nel centro del *bore* stesso e varia linearmente nello spazio allontanandosene lungo le tre direzioni di un sistema di riferimento cartesiano ortogonale predeterminato. All'esterno del *bore*, la direzione del campo e la sua intensità variano invece in modo complesso nello spazio. Inoltre, i gradienti lungo le tre direzioni sono attivati, indipendentemente uno dall'altro, per brevi periodi secondo un'opportuna temporizzazione, sincronizzata anche con l'attivazione del campo a radiofrequenza, in modo da selezionare i punti da cui si vuole ricevere il segnale con cui

ricostruire l'immagine tomografica; di conseguenza, il CMG ha un andamento molto complesso anche nel tempo (con frequenze caratteristiche dell'ordine dei kilohertz), che richiede una scelta adeguata sia per la strumentazione, sia per la procedura di elaborazione, al fine di eseguire una valutazione dell'esposizione corretta dal punto di vista radioprotezionistico.

La catena di misura adottata per la misura del CMG e l'acquisizione dei segnali su cui applicare, in un secondo tempo, il metodo del picco ponderato, è illustrata in Figura 2. Essa comprende: (1) una sonda di campo magnetico Narda ELT-400 (Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, Germany) equipaggiata con un sensore isotropico triassiale da 100 cm² e in grado di lavorare nell'intervallo di frequenze da 1 Hz a 400 kHz; (2) un sistema di acquisizione e digitalizzazione (DAQ) Agilent U2531A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA 95051, USA); (3) un comune personal computer portatile con funzioni di immagazzinamento dei dati e controllo remoto; (4) una procedura *software* originale, sviluppata in Labview 2009 (National Instruments Corporation, Austin, TX 78759, USA), che controlla l'intero sistema.

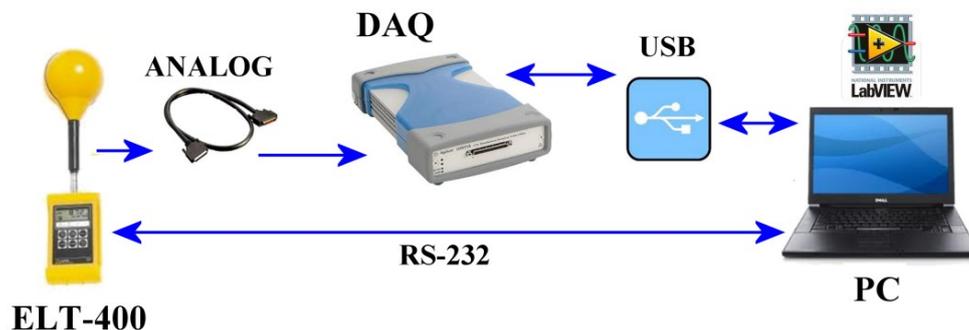


Figura 2: schema della catena strumentale per la misura dei campi di gradiente.

La sonda ELT-400, impostata nella modalità denominata "Field Strength" (FS), mette a disposizione sulle uscite analogiche tre segnali di tensione istantaneamente proporzionali all'intensità delle tre componenti cartesiane del campo magnetico in cui è immerso il sensore. La risposta in frequenza è piatta a partire da un limite inferiore impostabile a scelta tra 1, 10 o 30 Hz, fino al limite superiore di 400 kHz.

Il sistema di acquisizione (DAQ) Agilent U2531A è un dispositivo dotato di interfaccia USB2.0 e di quattro ingressi analogici, che vengono digitalizzati in tempo reale con una risoluzione di 14 bit ed una velocità di campionamento sincrona massima di 2×10^6 campioni al secondo per canale. Tre degli ingressi del sistema di acquisizione sono collegati alle tre uscite analogiche dell'ELT-400. Quest'ultimo è collegato anche al personal computer mediante un'interfaccia RS-232. Lo stesso personal computer provvede, mediante l'interfaccia USB, a controllare il DAQ e a trasferire sulla propria memoria di massa i dati acquisiti. Tutte le funzioni svolte dal computer di controllo sono gestite attraverso una applicazione Labview appositamente sviluppata.

Le misure dei campi di gradiente sono state eseguite utilizzando una frequenza di campionamento di 50×10^3 campioni al secondo per canale ed acquisendo segmenti temporali di 10 ÷ 20 s. La sonda ELT-400 è stata impostata in modalità FS, selezionando i valori più adeguati per la sensibilità e per la frequenza di taglio inferiore della banda passante (nella maggior parte dei casi, quest'ultima è stata regolata a 30 Hz per minimizzare

il rumore). I campioni acquisiti, trasferiti sul personal computer, sono stati successivamente elaborati per ricavare gli indici radioprotezionistici WP a cui si è fatto cenno sopra; a questo fine si sono sviluppate procedure *software* in grado di svolgere tale compito operando nel dominio del tempo oppure nel dominio della frequenza.

Per completezza, occorre dire che la sonda ELT-400 dispone, oltre che della citata modalità FS, anche di una modalità di funzionamento denominata "Shaped Time Domain" (STD), nella quale essa stessa è in grado di mostrare a display l'indice di picco ponderato, determinato autonomamente in *hardware* sulla base dei limiti normativi preimpostati dal fabbricante. Rispetto all'approccio – sicuramente comodo e rapido – basato su questa funzionalità della sonda, quello da noi adottato (campionamento, memorizzazione e successiva elaborazione fuori linea) ha il vantaggio di permettere di applicare qualsiasi metrica di valutazione oltre al picco ponderato e di riferirsi a qualsiasi sistema di valori limite si voglia considerare: una possibilità certamente preziosa in un contesto di ricerca e messa a punto metodologica.

Campo elettromagnetico a radiofrequenza

In un sistema RM, il campo elettromagnetico a radiofrequenza è l'agente fisico meno rilevante dal punto di vista radioprotezionistico, perché i livelli di campo elettromagnetico a cui potrebbe essere eventualmente esposto il personale risulterebbero in ogni caso molto bassi, grazie alla conformazione delle bobine utilizzate per generarli, che tende a confinare la presenza del CRF nella sola regione occupata dal paziente.

Questo non significa, per altro, che l'accertamento dei livelli di esposizione al CRF sia privo di difficoltà: l'andamento temporale intrinsecamente impulsivo pone infatti problemi di misura che possono risultare non banali, sia che si utilizzino sonde a rivelazione diretta, sia che si operi con strumentazione a banda stretta.

Per le misure che riporteremo nella sezione dedicata ai risultati, è stato utilizzato un analizzatore di spettro Narda SRM-3000 Selective Radiation Meter (100 kHz-3 GHz; Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, Germany) equipaggiato con sonde di campo elettrico 3531/02 e di campo magnetico 3551/01, entrambe ad asse singolo e in grado di coprire la banda 100 kHz - 300 MHz (Figura 3).



Figura 3: analizzatore Narda SRM-3000 e sonde unidirezionali di campo elettrico 3531/02 (sopra) e di campo magnetico 3551/01 (sotto).

Campo magnetico statico e movimento in esso

La determinazione della distribuzione dell'intensità del campo magnetico statico nello spazio circostante un tomografo per RM non presenta particolari difficoltà e viene eseguita di norma in tutte le strutture che ospitano apparati di questo tipo; a questo scopo, si impiegano sensori commerciali il cui reperimento ed utilizzo non pongono problemi. Scopo delle misure è, in particolare, quello di individuare e segnalare (di solito con indicazioni sul pavimento) le aree soggette a limitazioni secondo la normativa nazionale, come le zone cosiddette "ad accesso controllato" (con intensità di campo superiore a 0.5 mT) e "di rispetto (o ad accesso limitato)" (con intensità compresa tra 0.1 e 0.5 mT).

Gli aspetti relativi al movimento nel CMS presentano invece maggiori difficoltà per chi si occupa di radioprotezione, ma rivestono anche un interesse maggiore. A differenza di quanto avviene in un soggetto immobile, la traslazione in un campo non omogeneo o la rotazione di parti del corpo anche in campo omogeneo provocano l'induzione di tensioni e correnti nei tessuti dell'organismo esposto, a cui sono associati effetti ben noti (per quanto non ancora completamente chiariti), che hanno indotto l'ICNIRP a pubblicare una specifica linea guida in merito [7].



Figura 4: sonda di campo magnetostatico Metrolab THM-1176.

L'approccio che si è adottato per analizzare questa problematica consiste nel ricondurre il movimento nel campo statico alla misura di un campo magnetico "percepito" come variabile nel tempo (e indicato pertanto con la sigla pMFD, dall'inglese *perceived Magnetic Flux Density*) per mezzo di una sonda solidale con il corpo dell'individuo esposto. A questo fine, è stata utilizzata una sonda triassiale ad effetto Hall Metrolab THM-1176 (Metrolab Instruments SA, Geneva, Switzerland; Figura 4), che dispone di un intervallo di misura esteso da pochi microtesla fino a 20 T e di una banda passante da 0 a 1000 Hz. La sonda è stata fatta indossare da volontari che hanno mimato i movimenti tipici degli operatori sanitari, eseguendo "azioni" standardizzate corrispondenti alle

attività più comunemente svolte nelle aree circostanti un tomografo RM (Figura 5).



Figura 5: misura dell'induzione magnetica percepita (pMFD) in caso di movimento nel campo magnetostatico, nel corso dell'esecuzione di movimenti tipici per la preparazione di un esame RM.



Figura 6: dettaglio di una possibile modalità di posizionamento della sonda per la rilevazione del campo magnetico percepito (pMFD).

Durante ogni azione la sonda era mantenuta in posizione fissa, rigidamente collegata alla testa del volontario (considerata sede dei principali organi bersaglio per gli effetti dei campi magnetici a bassissima frequenza) mediante un supporto appositamente realizzato sfruttando l'interno di un caschetto da ciclista (Figura 6).

La sonda utilizzata è dotata di un proprio dispositivo di digitalizzazione con uscita su interfaccia USB, che ne consente il collegamento ad un personal computer portatile con funzioni di controllo e memorizzazione. Per la gestione delle misure si è utilizzato il *software*

fornito in dotazione con la sonda, predisponendolo per la massima velocità di campionamento consentita, pari a 10 campioni al secondo per canale, ognuno dei quali a sua volta ricavato dalla media di 10 misurazioni. Anche in questo caso è stato utilizzato il metodo del picco ponderato per elaborare, sia nel dominio del tempo sia nel dominio della frequenza, le forme d'onda acquisite.

Riepilogo

È stata presentata una metodica per la valutazione dell'esposizione occupazionale ai campi elettromagnetici del personale sanitario addetto agli apparati diagnostici a risonanza magnetica; sono state approfondite, in particolare, le problematiche relative ai campi magnetici di gradiente e al movimento nel campo magnetico statico.

La metodica fa uso di catene strumentali appositamente assemblate e si basa sul metodo del picco ponderato per l'elaborazione radioprotezionistica delle forme d'onda complesse che caratterizzano le tipologie di sorgenti coinvolte. Essa è stata applicata in situazioni reali nel corso di campagne di misura effettuate presso alcune strutture sanitarie nell'area romana.

Come riferimenti normativi, si sono considerate la Direttiva Europea 2013/35 e le linee guida ICNIRP del 1998, del 2009 e del 2010 che ne costituiscono i principali fondamenti scientifici, rispettivamente per i campi ad alta frequenza, il campo magnetostatico e i campi a bassa frequenza. Sono state prese in considerazione, almeno in parte, anche le recenti linee guida ICNIRP del 2014 relative al movimento nel campo statico, sebbene queste per il momento non siano state recepite in alcun atto legislativo. Attraverso le linee guida ICNIRP del 1998, si è infine fatto riferimento anche alla Raccomandazione Europea 1999/519 per la protezione della popolazione.

Dai risultati delle misure eseguite è emerso che l'esposizione ai campi di gradiente può violare non solo le linee guida 1998 per la popolazione ma, in molti casi, anche le corrispondenti linee guida occupazionali. Essa rispetta invece le meno restrittive linee guida del 2010 (e quindi le prescrizioni della direttiva 2013/35).

L'esposizione dovuta al movimento nel campo statico è risultata conforme alle normative occupazionali in tutte le azioni simulate relative al tomografo da 1.5 T, salvo il caso limite in cui il soggetto esposto aveva introdotto e mosso la testa proprio dentro il *bore*. Si sono invece riscontrate alcune non conformità nel caso dell'apparato da 3 T. Frequenti sono risultate, per entrambi i tomografi, le violazioni delle linee guida per la popolazione. I dati riportati permettono di dimostrare chiaramente come il rispetto delle linee guida per l'esposizione al campo magnetostatico non sia sufficiente a garantire il rispetto dei limiti posti a tutela verso gli effetti di stimolazione nervosa che possono essere associati al movimento nel campo stesso.

Crediti e ringraziamenti

Questa relazione si è basata sull'attività portata congiuntamente avanti, nell'ambito di alcuni progetti di ricerca nazionali svoltisi nel periodo 2008-2014, dalle seguenti unità operative (le affiliazioni sono quelle del periodo in cui si è svolta la ricerca): ENEA - Unità Tecnica di Biologia delle Radiazioni e Salute dell'Uomo (Rossella Lodato, Vanni Lopresto, Giorgio Lovisolo, Sergio Mancini, Caterina Merla, Rosanna Pinto), IFAC-CNR (Daniele Andreuccetti, Nicola Zoppetti) e ISPESL/INAIL Dipartimento di Igiene del Lavoro - Laboratorio Radiazioni Non Ionizzanti (Vincenzo Brugaletta, Giancarlo Burriesci, Gian Marco Contessa, Rosaria Falsaperla, Paolo Rossi, Floriana Sacco).

Un ringraziamento per l'ospitalità e la collaborazione va al personale delle strutture sanitarie coinvolte e in particolare a Luisa Begnozzi, Angela Coniglio e Stefania Teodoli dell'Ospedale San Giovanni Calibita Fatebenefratelli; a Andrea Cherubini e Umberto Sabatini della Fondazione Santa Lucia; a Vittorio Cannatà, Elisabetta Genovese, Marco Carnì e Marco Gargani dell'Ospedale Pediatrico Bambino Gesù.

Bibliografia

1. Direttiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici). Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 184/1-9, 24.5.2004.
2. Direttiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 26 giugno 2013 sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici). Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 179/1-21, 29.6.2013.
3. M.Capstick, M.McRobbie, J.Hand, A.Christ, S.Kuhn, K.Hansson et al.: "An investigation into occupational exposure to electromagnetic fields for personnel working with and around medical magnetic resonance imaging equipment". Report VT/2007/017. Brussels: European Commission, 2008.
4. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)". Health Physics, Vol.74, N.4, April 1998, pp.494-522.
5. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): "Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields". Health Physics, Vol.96, N.4, April 2009, pp.504-514.
6. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)". Health Physics, Vol.99, N.6, December 2010, pp.818-836.
7. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): "Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz". Health Physics, Vol.106, N.3, March 2014, pp.418-425.
8. Raccomandazione 1999/519/CE del Consiglio europeo del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz. Gazzetta ufficiale delle Comunità europee L 199/59-70, 30.7.1999.
9. D.Andreuccetti, G.M.Contessa, R.Falsaperla, R.Lodato, R.Pinto, N.Zoppetti and P.Rossi: "Weighted-peak assessment of occupational exposure due to MRI gradient fields and movements in a nonhomogeneous static magnetic field". Medical Physics 40, 011910 (2013); <http://dx.doi.org/10.1118/1.4771933>.