

Studio dell'esposizione lavorativa ai campi magnetici degli operatori presso i siti di Risonanza Magnetica dell'Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII di Bergamo

FABIOLA CRETTI*, A. GAMBIRASIO*, **

* Servizio di Fisica Sanitaria, Dipartimento Immagini, Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII

** Dipartimento di Radioterapia, Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII, Bergamo

KEY WORDS

MR static magnetic field; staff exposure; Italian and EU physical agents directive

PAROLE CHIAVE

Campo magnetico statico; risonanza magnetica; esposizione dei lavoratori; direttive italiane ed europee sui rischi da esposizione ad agenti fisici

SUMMARY

«Study of occupational static magnetic field exposure among magnetic resonance scanning operators at the Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII (Bergamo)». Background: In this study occupational exposure to static magnetic fields of 1T and 1.5 T MR scanners installed at Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII, Bergamo, Italy, was assessed and the results were compared with the limits for worker's exposure to static magnetic field currently applicable in Italy (Attachment 1 of D.M. 02/08/91). Objectives: The aim of the study was to assess current occupational exposure to static magnetic fields at 1T and 1.5 T MRI scanner sites and to predict exposure using the new 3 T MR equipment due to come into operation shortly. Methods: Measurements were performed sampling the static magnetic field experienced by workers while carrying out their tasks by means of a Hall effect probe. All together, 167 measurements were obtained for 29 workers (11 healthcare assistants, 14 radiography technicians and 4 anaesthesiologists). Results: The results showed wide variations of occupational exposure parameters according to the worker's job, type of procedure and patient's state. Nevertheless, it was possible to confirm that the regulatory limits were observed in all cases: the time spent by workers in the zone of the magnet room where $B > 200 \text{ mT}$ was much shorter than the limit of 1 hour a day prescribed by Italian law (D.M 02/08/91) and the maximum time variation of B (dB/dt) was at least 4 times lower than the value of 6 T/s taken as the health safety threshold in DM 3/8/93. Conclusions: The data collected suggest that compliance with exposure limits prescribed by Italian law will also be met with the new 3 T MR.

RIASSUNTO

Introduzione: Nel presente lavoro sono state valutate le esposizioni ai campi magnetici statici degli operatori in servizio presso i siti di risonanza magnetica da 1 T e 1.5 T dell'Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII di

Pervenuto il 13.8.2014 - Revisione pervenuta il 3.11.2014 - Accettato il 6.11.2014

Corrispondenza: Fabiola Cretti Servizio di Fisica Sanitaria, Dipartimento Immagini, Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII, Bergamo - Tel. 035 2674282 - Fax 035 2674798 - E-mail fabiolacretti@gmail.com

Bergamo. Obiettivi: Lo scopo è stato quello di quantificare l'esposizione dei lavoratori ai campi magnetici statici nei siti funzionanti e di fare delle valutazioni su come tale esposizione aumenterà presso il nuovo sito, in fase di completamento, che funzionerà con un magnete da 3 T. Metodi: La valutazione è stata fatta registrando i valori di campo magnetico attraverso cui l'operatore si muove quando svolge le mansioni di competenza, utilizzando una sonda ad effetto Hall. Sono stati effettuati 167 monitoraggi su 29 operatori (11 infermieri, 14 tecnici sanitari di radiologia medica e 4 medici anestesisti). Risultati: I risultati ottenuti mostrano una notevole variabilità dei parametri che descrivono l'esposizione dei lavoratori. Tale variazioni sono dovute al tipo di operazione, alla mansione e allo stato del paziente. Tuttavia si è verificato che i parametri soggetti a vincoli di legge rispettano i limiti per tutte le figure professionali considerate: i tempi di permanenza nella zona in cui $B > 200 \text{ mT}$ è ampiamente minore del valore di un'ora/giorno fissato dall'allegato 1 del DM 2/8/91 e inoltre il valore della derivata temporale di B (dB/dt) è almeno 4 volte inferiore al valore di 6 T/s , adottato come livello di sicurezza nel DM 3/8/93. Conclusioni: Sulla base di questi dati non si prevede nessun rischio di superamento dei limiti neppure presso il nuovo sito da 3 T.

INTRODUZIONE

La metodica di imaging basata sul fenomeno della risonanza magnetica, richiede l'utilizzo di campi magnetici statici ad alta intensità attraverso i quali si ottiene l'allineamento dei momenti magnetici microscopici associati agli spin dei protoni delle molecole d'acqua e un moto precessionale degli stessi alla frequenza di Larmor. L'allineamento degli spin dà luogo a una magnetizzazione macroscopica nel campione da analizzare, da cui, a seguito di interazione con impulsi a radiofrequenza (RF), nelle condizioni di risonanza, si origina il segnale utilizzato per ricostruire l'immagine. Per la codifica spaziale del segnale sono impiegati gradienti di campo magnetico, a rapida accensione (14, 15).

Pertanto, i pazienti sottoposti a indagini RM, sono esposti al campo statico, agli impulsi a RF e ai gradienti di campo (1, 10, 20). Nel contesto di procedure interventistiche sotto guida RM, anche gli operatori, sono suscettibili di esposizione ai tre tipi di campo sopra menzionati (13). Diversamente, gli operatori sono esposti al solo campo magnetico statico disperso, sempre presente, durante le fasi di preparazione, posizionamento nello scanner e allontanamento dallo scanner del paziente o durante effettuazione di operazioni quali somministrazione di farmaci (anestetici o mezzi di contrasto), cambio bobine e controllo.

A differenza dei campi elettrici, che possono causare danni molto seri ai tessuti e condurre anche

a morte, i campi magnetici, anche a intensità molto elevate, producono solo effetti relativamente deboli. Infatti, il rapporto tra la suscettività magnetica e la suscettività elettrica dei tessuti è $10^{-6} - 10^{-5}$. Questo fattore rende conto della diversa risposta dei tessuti ai campi magnetici e ai campi elettrici in termini di polarizzazione magnetica e polarizzazione elettrica rispettivamente. Effetti legati alla suscettività magnetica comportano l'orientamento di molecole e la magnetizzazione. La maggior parte dei tessuti ha caratteristiche diamagnetiche, con valori di suscettività magnetica χ compresa tra -1 e 0; in particolare tali valori si collocano intorno a $\pm 20\%$ del valore della suscettività magnetica dell'acqua $\chi_{\text{acqua}} = -9.05 \times 10^{-6}$ (SI). Le forze che agiscono sulle molecole per effetti di suscettività magnetica, sono dell'ordine di 10^{-6} pN, trascurabili rispetto a forze riconducibili a effetti termici o di viscosità, dell'ordine di 500 pN (20).

Oltre agli effetti di suscettività magnetica, i campi magnetici statici interagiscono con la materia vivente attraverso meccanismi di natura elettrodinamica con elettroliti in movimento e l'induzione di correnti elettriche.

La forza di Lorentz esercitata dal campo magnetico statico sulle cariche ioniche in movimento è alla base di potenziali indotti, associati al flusso sanguigno. E' stato stimato che per un campo magnetico statico di 5 Tesla, la densità di corrente indotta nel nodo senoatriale del cuore sia di circa 100 mA m^{-2} , corrispondente a circa il 10 % della massima

corrente endogena derivante dall'attività elettrica del cuore (11).

Il movimento lineare lungo un gradiente di campo o il movimento di rotazione sia in un campo uniforme che in un gradiente di campo, causano una variazione di flusso concatenato, che, per la legge di Faraday, è responsabile dell'induzione di corrente e di campi elettrici associati (9, 20, 11). In letteratura sono descritte misure e calcoli di campi elettrici e correnti elettriche indotte dal movimento all'interno di campi magnetici statici (3, 16). Tali campi elettrici sono apprezzabili durante il normale movimento attorno o dentro campi magnetici superiori a 2 – 3 Tesla e possono spiegare le segnalazioni di nausea e fosfeni magnetici (2, 20, 11).

LA NORMATIVA

L'installazione e uso delle apparecchiature a risonanza magnetica è disciplinato in Italia dal DPR 542/94 (5). L'articolo 2 di tale decreto stabilisce che gli standard di sicurezza per le apparecchiature R.M. sono quelli previsti dal decreto ministeriale 2 agosto 1991 allegati 1 e 4 (6) e dal relativo aggiornamento di cui al decreto ministeriale 3 agosto 1993, allegati A e B (7). Per quanto riguarda l'esposizione dei lavoratori ai campi statici, i limiti stabiliti nei citati decreti, sono espressi in tempo di permanenza massimo giornaliero a determinati livelli di intensità di campo (tabella 1).

Per quanto riguarda le variazioni temporali di campo magnetico (dB/dt), il DM 3/8/93 riporta, in linea con le raccomandazioni della FDA (USA 1988), che un valore di dB/dt pari a 6T/s non costituisce un rischio per la salute del paziente. Tale valore è ampiamente al di sotto dei valori soglia per

effetti fisiopatologici quali l'alterazione dei potenziali di cellule eccitabili, le stimolazioni neuromuscolari; la fibrillazione cardiaca (10, 18).

Il DM 3/8/93 stabilisce inoltre le condizioni per l'estensione dell'esposizione dei pazienti a variazioni temporali di campo magnetico entro i limiti specificati nell'allegato B del Decreto stesso.

Il tema dell'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici (CEM) è affrontato anche dal D. Lgs 81/08 (4), che ha come oggetto la tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. In particolare la protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione a campi elettromagnetici è trattata nel capo IV del titolo VIII e relativo allegato XXXVI, in cui sono definite le grandezze fisiche di interesse e riportati i valori limite di esposizione e i livelli di azione, definiti tenendo conto delle norme armonizzate europee elaborate dal CENELEC, delle linee guida della Commissione Internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti e della raccomandazione 519/CE del Consiglio del 12 luglio 1999.

La direttiva europea 2004/40/CE, avente come oggetto le esposizioni ai CEM da 0 a 300 GHz, definisce i limiti di esposizione per le persone, esprimendoli in termini di correnti indotte dalle variazioni temporali di CEM. Tali limiti sono stati adottati nel D. Lgs 81/08 (Allegato XXXVI -Tabella 1 del Decreto).

Il recepimento di tale direttiva, stabilito in prima istanza per il 30 aprile 2008, è stato successivamente prorogato al 31 ottobre 2013. Nel frattempo è stata emanata una nuova direttiva, la "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)" (8), che abroga quella del 2004. Questa nuova direttiva, che si basa sulle linee guida della commissione internazionale IC-NIRP del 2010 (12), ha come campo di applicazione gli effetti biofisici diretti e indiretti noti provocati dai campi elettromagnetici e stabilisce prescrizioni minime di protezione dei lavoratori. Sono stabiliti i valori limite di esposizione (VLE) riguardanti relazioni scientificamente accertate tra effetti biofisici diretti a breve termine e esposizione ai

Tabella 1 - Limiti di permanenza giornaliera in campi magnetici statici (DM 2/8/91 Allegato 1 art. 1)

Table 1 - Limits of daily permanence in magnetic static fields (DM 2/8/91 Allegato 1 art. 1)

Parte esposta	Intensità di campo	Tempo di esposizione
Corpo	200 mT	1 ora/giorno
Corpo	2 T	15 minuti/giorno
Arti	2 T	1 ora/giorno

campi elettromagnetici. Vengono distinti i VLE per gli effetti sanitari (quali il riscaldamento e l'elettrostimolazione), e, i VLE per gli effetti sensoriali. Ai VLE sono connessi i relativi livelli di azione (LA) (Tabelle dell'allegato II della Direttiva 2013/35/EU).

In attesa di recepire la nuova direttiva, i limiti di legge a cui si fa riferimento localmente, sono quelli riportati negli allegati 1 del DM 2/8/91 e B del DM 3/8/93, come indicato dal vigente DPR 542/94.

Tali limiti, espressi in termini di tempo di permanenza all'interno di campi statici, appaiono obsoleti se si considerano i limiti introdotti dall'ICNIRP successivamente al 1991 e in particolare quelli adottati nelle linee guida del 2010 (12) in materia di limitazione delle esposizioni ai campi elettrici e magnetici nell'intervallo spettrale delle basse frequenze. Sono qui utilizzate le restrizioni di base e i livelli di riferimento per fornire protezione contro tutti gli effetti nocivi accertati. Le restrizioni di base sono riferite alla grandezza fisica direttamente collegata all'effetto sanitario, ovvero l'intensità del campo elettrico interno. Tali restrizioni sono il risultato di una accurata revisione della letteratura scientifica che contempla gli studi condotti sugli effetti sia diretti che indiretti e si basano sull'evidenza accertata di effetti acuti, quali la stimolazione diretta dei tessuti nervosi e muscolari e l'induzione di fosfeni nella retina. Tengono inoltre conto di effetti transitori che possono interessare alcune funzioni cerebrali, tra cui i processi visivi, per i quali vi è una evidenza scientifica indiretta e che sono riconducibili alle correnti indotte all'interno del corpo. Tutti questi effetti presentano delle soglie, al di sotto delle quali non si verificano, e possono essere evitati rispettando idonee restrizioni di base sui campi elettrici indotti nel corpo. Nella derivazione delle restrizioni, l'ICNIRP adotta un approccio conservativo e tiene conto dell'incertezza insita nelle conoscenze mediante l'applicazione di fattori di riduzione. Ad esempio la restrizione di base per il campo elettrico interno (espresso in V/m) per gli effetti sul sistema nervoso centrale nell'intervallo di frequenza tra 1 e 10 Hz è $0.5/f$ – essendo f la frequenza – nelle esposizioni professionali. Essendo l'intensità del campo elettrico interno

una grandezza di difficile determinazione, per scopi pratici vengono forniti i livelli di riferimento, derivati nella maggior parte dei casi dalle pertinenti restrizioni di base per mezzo di misure o calcoli. Le grandezze derivate sono l'intensità del campo elettrico (E), l'intensità del campo magnetico (H), l'induzione magnetica (B) e la corrente che fluisce attraverso gli arti (IL). I livelli di riferimento per queste grandezze sono una funzione della frequenza. Alle restrizioni di base e ai valori di riferimento sono riconducibili i VLE e LA della direttiva 2013/35 che dovrebbe essere recepita dagli stati membri nel 2016. Alla luce dell'orientamento della ICNIRP, si evidenzia l'inadeguatezza dei limiti della vigente normativa italiana nella formulazione del 1991.

SCOPO

Scopo del presente lavoro è la valutazione delle esposizioni ai campi magnetici statici per gli operatori dell'area radiologica che prestano servizio presso i siti di risonanza magnetica (RM) dell'azienda ospedaliera Papa Giovanni XXIII, dove attualmente sono in uso due scanner, Panorama HFO da 1 Tesla (Philips The Netherlands.) e Optima da 1.5 Tesla (GE Medical System, Milwaukee, WI, USA). Nell'immediato futuro entrerà in funzione uno scanner GE Discovery 750 w da 3 T.

METODO

In questo studio sono state acquisite ed analizzate 167 registrazioni del valore dell'induzione magnetica B in funzione del tempo, durante le operazioni svolte da 29 operatori coinvolti nella attività sulle due risonanze magnetiche installate presso l'Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII, Bergamo. Le misure hanno riguardato operazioni condotte durante la normale attività lavorativa su pazienti di diversa tipologia e in diverse condizioni: deambulanti e collaboranti, in barella e pediatrici. Le rilevazioni hanno coinvolto 11 infermieri (Inf; per un totale di 84 misure), 14 tecnici sanitari di radiologia medica (TSRM; per un totale di 67 mi-

sure) e 4 medici anestesisti (per un totale di 16 misure). Le misure sugli infermieri e sui TSRM sono state eseguite sia durante fase iniziale dell'esame, che prevede il posizionamento e la centratura del paziente (PosPz) sia durante la fase finale con la rimozione delle bobine e l'accompagnamento del paziente fuori dalla sala magnete (DimPz). Inoltre sono state monitorate le operazioni di cambio della bobina tra un esame e l'altro condotte dal TSRM (Prep) e quelle di somministrazione del mezzo di contrasto, durante l'esame, da parte degli infermieri (SomF). Queste due ultime operazioni non avvengono necessariamente per ogni paziente.

Infine sono state monitorate le operazioni condotte da quattro medici anestesisti in esami che hanno interessato pazienti pediatriche. In questi casi, può accadere che il medico entri in sala magnete per dei controlli sul paziente (Ctrl) tra un'acquisizione e l'altra oltre che durante le operazioni di PosPz, DimPz e SomF. I dati relativi alla suddivisione delle misure tra figure professionali e tra i due tomografi RM sono riportati in tabella 2.

Analogamente a quanto fatto da altri autori (17), per le rilevazioni è stato utilizzato un teslametro THM1176-PDA (MetroLabs Instruments SA, Ginevra, CH) dotato di sonde isotropiche a effetto Hall che fornisce, in funzione del tempo, i valori del campo magnetico lungo tre direzioni ortogonali, nonché il valore dell'intensità di campo risultante. La frequenza di acquisizione è stata fissata 250 Hz per assicurare un accurato campionamento del

gradiente di B atteso nelle operazioni considerate. Le misure sono state salvate su un palmare collegato alla sonda da un cavo lungo circa tre metri e successivamente trasferite a un computer e analizzate utilizzando fogli elettronici e il software MatLab (MathWorks Natick, Massachusetts, USA).

Dalle curve di B in funzione del tempo, di cui in figura 1 sono riportati alcuni esempi significativi, sono stati calcolati i parametri d'interesse per quantificare l'esposizione ai campi magnetici statici degli operatori coinvolti. In particolare sono stati valutati il tempo di permanenza nella zona controllata (ZC) - definita come la zona in cui il campo B è superiore a 0.5 mT- e il tempo di permanenza nella zona in cui il campo è superiore a 200 mT, per il quale vi sono vincoli stabiliti dalla normativa (si veda la Tabella 1). Tale zona verrà chiamata zona a rischio (ZR). In particolare, per quanto riguarda l'analisi dell'esposizione a intensità di campo statico B superiori a 200 mT, sono stati considerati i tassi di sconfinamento nella ZR per quattro gruppi di misure definiti sulla base del tipo di scanner e delle figure professionali (TSRM e infermiere) e sono stati effettuati dei test statistici (chi-quadro) per individuare dipendenze che possano mettere in evidenza eventuali situazioni di rischio per gli operatori stessi. Sono state infine calcolate le derivate temporali del campo magnetico misurato in ciascuna procedura allo scopo di valutare la massima variazione temporale a cui sono sottoposti i lavoratori. Queste variazioni temporali sono responsabili

Tabella 2 - Numero di misure e di operatori presi in considerazione nelle rilevazioni condotte sui due tomografi RM attualmente in funzione presso l'Azienda Ospedaliera Papa Giovanni XXIII di Bergamo

Table 2 - Number of measurements and operators involved in the monitoring programme at the two MRI sites operating at Papa Giovanni XXIII Hospital in Bergamo

Macchina Funzione/Operatore	Philips Panorama 1T			GE Optima 450 1.5T		
	TSRM	Infermiere	Anestesista	TSRM	Infermiere	Anestesista
Numero misure	37	42	11	30	42	5
Posizionamento paziente (PosPz)	12	14	1	14	20	1
Dimissione paziente (DimPz)	11	10	4	8	12	1
Somministrazione mezzo di contrasto o anestetico (SomF)		18	4		10	2
Preparazione nuovo paziente (Prep)	14			8		
Controllo (Ctrl)			2			1

dell'induzione di potenziali e correnti elettriche nei tessuti, come menzionato nella parte introduttiva.

Durante le misure, la sonda è stata applicata anteriormente agli operatori; nella maggior parte dei casi all'altezza del torace nel taschino della divisa da lavoro e solo in alcuni casi in uno dei taschini a livello del fianco, allo scopo di evidenziare un'eventuale dipendenza dall'altezza del punto di misura dell'esposizione al campo magnetico. Il posizionamento della sonda sul lato destro o sinistro dell'operatore influisce poco sull'esito della misure poiché nella maggior parte delle operazioni monitorate l'operatore si è spostato da un lato all'altro del lettino portando alternativamente un lato del proprio corpo nella zona a più alto campo magnetico. La scarsa numerosità dei dati acquisiti posizionando la sonda nel taschino posto in corrispondenza dell'ad-

dome, non consente di evidenziare una dipendenza dei risultati dall'altezza della sonda. D'altra parte, visto il numero limitato di misure realizzabili, si è preferito privilegiare il posizionamento all'altezza del torace perché più cautelativo per la maggiore vicinanza a cuore e cervello, organi notoriamente più sensibili all'interazione con i CEM.

RISULTATI

Come già riportato da altri autori (17) le misure mostrano una notevole variabilità, che in questo studio è enfatizzata dalla scelta di aver monitorato operazioni eseguite con pazienti in differenti condizioni, come mostrato dal confronto in figura 1 dove vengono riportate le acquisizioni fatte su in-

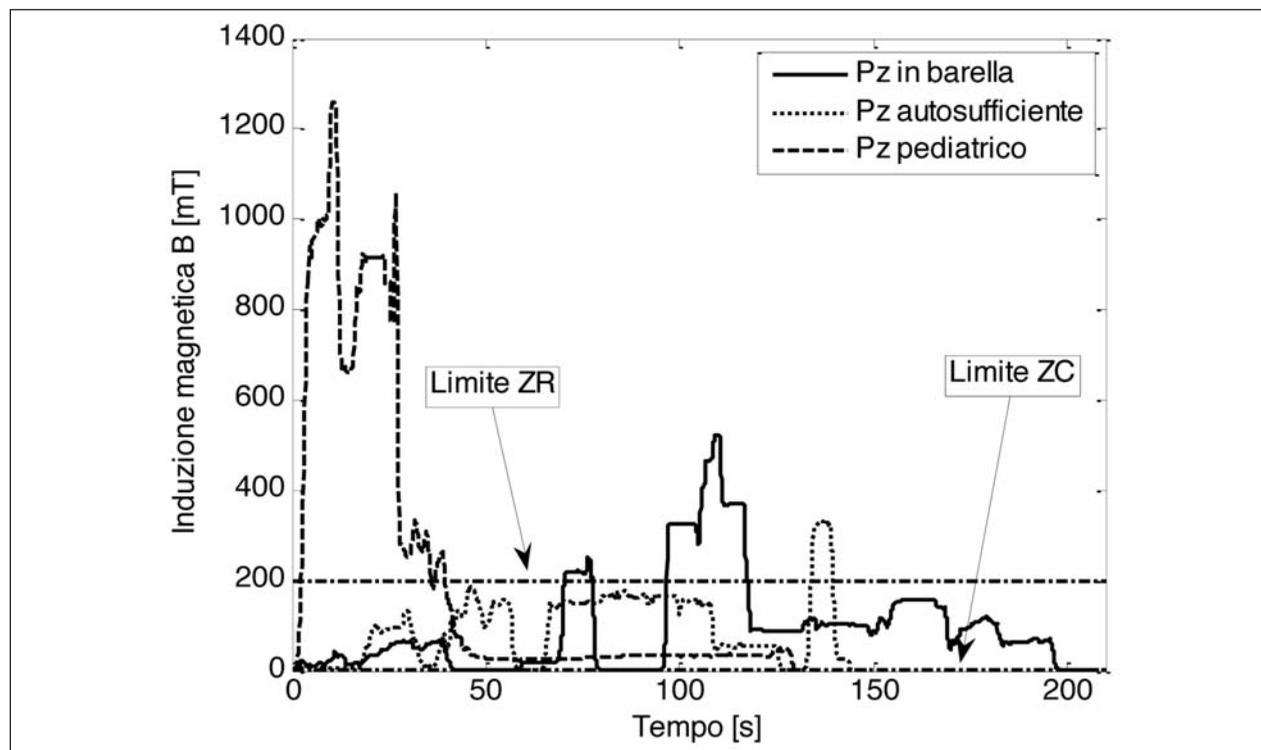


Figura 1 - Campo di induzione magnetica B [mT] misurato in funzione del tempo [s] per operazioni di posizionamento di pazienti in diverse condizioni: paziente in barella (linea continua) paziente autosufficiente (linea punteggiata) e paziente pediatrico (linea tratteggiata), effettuate da infermieri presso il tomografo Optima 450 da 1.5 T. I limiti inferiori di valore di B per la zona controllata (ZC) e a rischio (ZR) sono 0.5 mT e 200 mT rispettivamente

Figure 1 - Static magnetic field B [mT] measured as a function of time [s] during healthcare assistant operations of patient positioning, in different conditions : patient from a stretcher (continuous line); patient self-sufficient (dotted line) and pediatric patient (sketched line). The values of the lower limits of the static magnetic field B intensity are 0.5 mT and 200 mT for the controlled zone (ZC) and the risk zone (ZR) respectively

fermieri durante operazioni di PosPz, svolte presso il tomografo GE Optima 450 W da 1.5 T, con tre pazienti in diverse condizioni: un soggetto barellato, uno autosufficiente ed uno in età pediatrica.

Le particolari condizioni del paziente influiscono sull'esposizione degli operatori al campo magnetico statico: nel caso di pazienti non autosufficienti si osserva una permanenza più lunga in ZR e un'esposizione a gradienti temporali più elevati, riconducibili al fatto che l'operatore viene a trovarsi in zone ad elevato B ma anche alla necessità di dover compiere movimenti più bruschi per aiutare il paziente stesso.

Con riferimento alla classificazione delle aree adottata dal DM 02/08/91, si ritiene opportuno far coincidere la durata di ciascuna operazione con il tempo di permanenza in ZC (τ_{zc}) definito con il

tempo che intercorre da quando l'operatore attraversa la curva isomagnetica $B = 0.5$ mT all'inizio dell'operazione a quando la riattraversa uscendo definitivamente dalla stanza del magnete. Suddividendo le operazioni in quattro gruppi secondo il tipo di scanner (Philips Panorama HFO 1 T e GE Optima 450 1.5 T) e secondo la figura professionale (TSRM e infermiere) si ottengono quattro distribuzioni di τ_{zc} caratterizzate da un ampio intervallo di valori e asimmetriche con code verso valori alti (figura 2).

Nonostante in numero relativamente basso di dati (si veda tabella 2), i valori della moda, mediana, e media di ciascun gruppo possono essere ottenuti da una distribuzione log-normale del tipo:

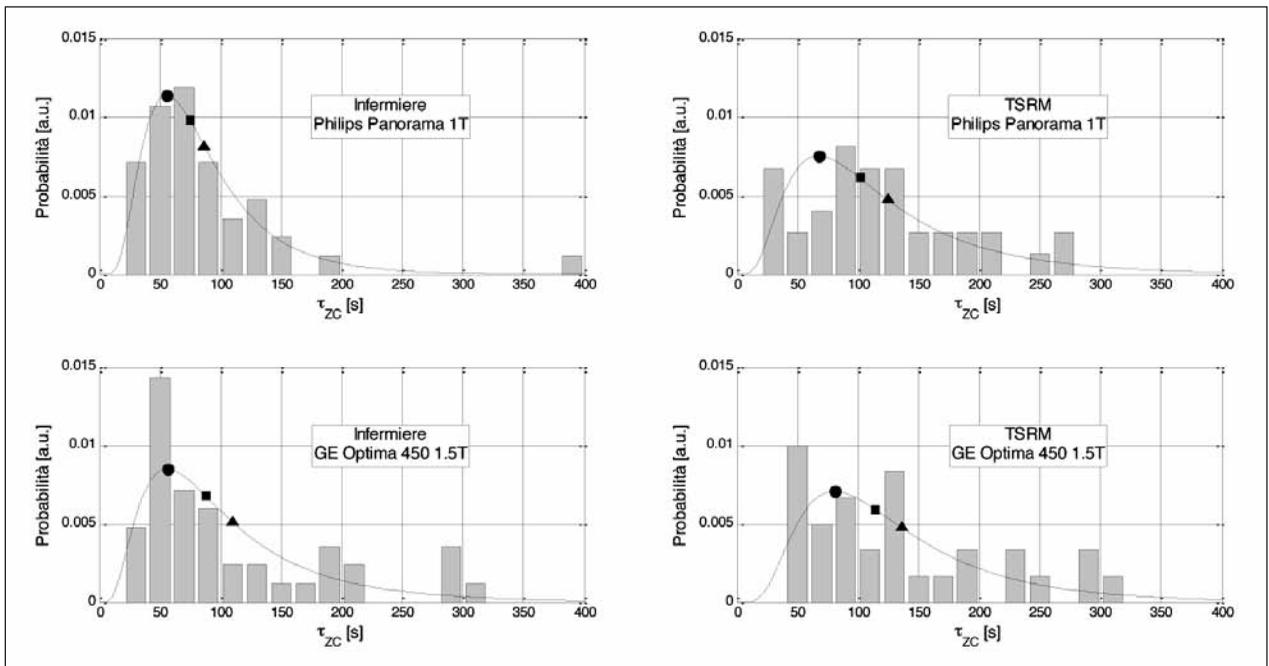


Figura 2 - Distribuzione dei τ_{zc} per le operazioni condotte sul tomografo Panorama 1T (prima riga) e sul tomografo Optima 450 1.5 T (seconda riga) da infermieri (prima colonna) e TSRM (seconda colonna). In ciascun caso sono state considerate tutte le operazioni che competono alle rispettive figure professionali. I tre indicatori (cerchio, quadrato e triangolo) indicano rispettivamente la posizione della moda, mediana e media sulla distribuzione log-normale (linea continua). I corrispondenti valori numerici sono riportati in tabella 3

Figure 2 - Distribution of τ_{zc} values for operations carried out in the Panorama 1 T (upper row) and Optima 450 1.5 T (lower row) scanner rooms respectively. In both cases all the operations performed by all professional figures were considered. The three indicators (circle, square and triangle) show the position of mode, median and average on the log-normal fitting function (continuous line). The corresponding values are shown in table 3

$$P_{\mu,\sigma}(\tau) = \frac{1}{\tau\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(\tau)-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \tau > 0 \quad [1]$$

Dove $P_{\mu,\sigma}(\tau) dt$ rappresenta la probabilità che la variabile aleatoria τ_{zC} assuma un valore compreso tra τ e $\tau+d\tau$. I valori medi (moda, mediana e media) corrispondenti alle distribuzioni sono riportati in tabella 3. Il fatto che le distribuzioni relative ai TSRM siano caratterizzate da valori medi più alti rispetto agli infermieri è essenzialmente dovuto alla diversa durata delle operazioni non comuni alle due figure professionali: le operazioni di SomF condotte dagli infermieri hanno una durata media di circa 65 s e 90 s, rispettivamente al Philips Panorama HFO 1 T e GE Optima 450 1.5 T, mentre le Prep

condotte dai TSRM hanno durate medie di circa 120 s e 210 s, per gli stessi scanners.

Un altro parametro importante per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori ai campi magnetici è la permanenza nella zona ZR ($B > 200$ mT). Dai dati raccolti si osserva che in molte procedure gli operatori non entrano in ZR. Raggruppando, al solito le acquisizioni per apparecchiatura e figura professionale, si è analizzato il tasso di sconfinamento in ZR, definito come numero di procedure in cui l'operatore ha oltrepassato l'isomagnetica 200 mT rispetto al numero di misure del gruppo considerato. I risultati sono raccolti nella tabella di contingenza 4. Come atteso, il tasso di sconfinamento in ZR è più alto al tomografo GE Optima 1.5 T rispetto al tomografo Philips Panorama HFO 1 T.

Tabella 3 - Moda, mediana e media del tempo di permanenza nella zona controllata, calcolati sulla distribuzione log-normale per gli operatori TSRM e infermiere, presso gli impianti RM da 1T e 1.5T

Table 3 - Mode, median and average values of permanence time inside the controlled zone, as calculated using the log normal distribution function, for radiographers and healthcare assistants operating at the 1 T and 1.5 T MRI scanners

Operatore	Macchina	Moda [s]	Mediana [s]	Media [s]
Infermiere	Philips Panorama 1T	55	75	86
TSRM	Philips Panorama 1T	68	102	124
Infermiere	GE Optima 450 1.5T	56	88	110
TSRM	GE Optima 450 1.5T	81	114	136

Tabella 4 - Tabelle di contingenza per il tasso di sconfinamento in ZR relative alle due mansioni degli operatori monitorati alle due macchine installate presso l'A.O. Papa Giovanni XXIII. I dati tengono conto di tutte le operazioni condotte: PosPz, DimPz e SomF per gli infermieri e PosPz, DimPz e PRep per i TSRM

Table 4 - Contingency table of the rate of passing to the risk zone ZR for the two groups of operators monitored at the two MRI sites of the Papa Giovanni XXIII Hospital. All operations performed by the operators were taken into account for both scanners: PosPz (patient positioning), DimPz (patient discharge) and SomF (drug delivery) by the healthcare assistants and PosPz, DimPz and PRep (preparation of a fresh examination with change of coil) by radiographers

Sconfinamento in zona B > 200 mT	Infermieri		
	GE Optima 450 1.5T	Philips Panorama 1T	Totale
Si	27	14	41
No	15	28	43
Totale	42	42	84
<i>Tasso di sconfinamento</i>	64%	33%	

Sconfinamento in zona B > 200 mT	TSRM		
	GE Optima 450 1.5T	Philips Panorama 1T	Totale
Si	24	8	32
No	6	29	35
Totale	30	37	67
<i>Tasso di sconfinamento</i>	80%	22%	

Tuttavia il test chi-quadrato, eseguito per verificare l'omogeneità dei gruppi di operatori (TSRM e Infermieri) impegnati sulle due macchine, relativamente al tasso di sconfinamento in ZR, indica una differenza significativa ($p < 0.10$): il rischio di sconfinare nella ZR è diverso per le due figure professionali sulle due macchine considerate. Suddividendo ulteriormente ogni gruppo di dati per il tipo di operazione si osserva che, per quanto riguarda l'operazione SomF che è eseguita dai soli infermieri, il tasso di sconfinamento in ZR diminuisce nel passare dal tomografo Philips Panorama HFO 1 T (tasso 56%) al tomografo GE Optima 1.5 T (tasso 40%). Questa circostanza può essere ricondotta alla differente geometria dei due tomografi: il fatto che il GE Optima 1.5 T sia ad anello chiuso pone una barriera fisica all'infermiere durante la somministrazione del farmaco che limita lo sconfinamento oltre i 200 mT mentre al tomografo Philips Panorama HFO 1 T, che è ad anello aperto, l'operatore può all'occorrenza avvicinarsi più facilmente all'isocentro e quindi sconfinare nella ZR. Escludendo per gli infermieri le procedure SomF e per i TSRM le procedure di Prep e quindi, valutando il tasso di sconfinamento in ZR solo per le operazioni comuni (PosPz e DimPz) le due popolazioni risultano essere statisticamente omogenee ($p > 0.10$).

Per valutare il rischio che un lavoratore, sia esso infermiere o TSRM, superi il limite giornaliero di permanenza in ZR imposto dalla legge, si deve stimare il tempo medio di permanenza in ZR (τ_{ZR}) per ogni paziente. Questo parametro può essere valutato separando i contributi delle diverse operazioni e osservando che, mentre PosPz e DimPz sono operazioni svolte per ogni esame, SomF (infermieri) e Prep (TSRM) avvengono solo saltuariamente. Il tempo medio di permanenza in ZR per paziente può essere scritto come somma dei tempi medi di permanenza caratteristici per ciascuna operazione (τ_j) pesata sulla frequenza di esecuzione della procedura (f_j):

$$(\tau_{ZR}) = \sum_j f_j (\tau_j) \quad [2]$$

dove la somma è estesa a tutte le operazioni compiute dalla figura professionale considerata.

Per come sono organizzati gli esami e i turni presso l'A.O. Papa Giovanni XXIII, è stato valutato che la somministrazione del mezzo di contrasto non da remoto è prevista all'incirca una volta ogni quattro pazienti mentre il cambio delle bobine è svolto una volta ogni due pazienti quindi per questo studio, $f_{\text{PosPz}} = f_{\text{DimPz}} = 1$, $f_{\text{SomF}} = 0.25$ e $f_{\text{Prep}} = 0.5$. I valori medi $\langle \tau_j \rangle$ sono riportati tabella 5 insieme ai valori di τ_{ZR} risultanti dell'equazione [2]. Anche assumendo cautelativamente un limite giornaliero di permanenza in ZR di 30 minuti (pari a $\frac{1}{2}$ del limite di legge) i valori medi di τ_{ZR} sono talmente bassi da non comportare alcuna limitazione al numero di pazienti giornaliero che un operatore può seguire.

Queste conclusioni potrebbero non essere altrettanto valide se gli esami venissero condotti con uno scanner con un valore di B all'isocentro più elevato. Presso l'A.O. Papa Giovanni XXIII è in fase di installazione un tomografo GE Discovery 750 W da 3 T. Confrontando le linee isomagnetiche fornite dalla ditta costruttrice della nuova macchina con quelle della GE Optima da 1.5 T già installata e su cui sono state effettuate parte delle misure presentate in questo lavoro, si osserva che la forma delle curve isomagnetiche cambia da macchina a macchina. Se si considerano le direzioni uscenti dall'isocentro a diversi angoli rispetto all'asse del lettino, la curva isomagnetica 200 mT del tomografo da 3 T, interseca curve isomagnetiche del tomografo GE Optima da 1.5 T corrispondenti a diversi valori di B. Ad esempio lungo le direzioni che formano un angolo di 30°, 45° e 60° con l'asse del lettino la curva isomagnetica 200 mT del tomografo 3T si trova rispettivamente in corrispondenza delle isomagnetiche 80 mT, 60 mT e 40 mT del GE Optima da 1.5 T.

Si può quindi assumere che il tempo di permanenza oltre l'isomagnetica 60 mT nelle operazioni compiute presso la GE Optima da 1.5 T fornisca una previsione del tempo di permanenza in ZR se l'operazione fosse stata svolta al 3T. In questo caso il tasso di sconfinamento è molto alto (superiore all'80% in tutte tipologie di procedure) e i valori medi dei τ_j aumentano sensibilmente (si veda tabella 5). In questa previsione il numero di pazienti gestibili giornalmente diminuisce considerevolmente ma resta comunque alto tanto da non rendere ne-

cessari specifici cambiamenti dell'organizzazione dei turni di lavoro per la nuova macchina.

Questa analisi trova delle conferme nei dati raccolti, con la stessa tecnica di misura, sul tomografo GE Discovery 750 MR installato presso la clinica S. Maugeri di Pavia e che hanno riguardato 38 procedure svolte dai TSRM nelle fasi di PosPz (19 procedure) e DimPz (19 procedure). Anche da questi dati si ottiene un tasso di sconfinamento oltre l'isomagnetica da 200 mT molto alto (superiore al 90%) inoltre il tempo di permanenza medio per il PosPz (τ_{PosPz}) è il linea con la previsione fatta (si veda tabella 5).

Si osserva infine che la durata dell'operazione τ_{ZC} non fornisce alcuna indicazione sulla durata dell'esposizione dei lavoratori a campi superiori ai 200 mT: si possono evidenziare procedure come il cambio della bobina condotto dal TSRM (Prep) che sono relativamente lunghe (τ_{ZC} fino a 250 s) ma con un tasso di sconfinamento e un tempo di permanenza in ZR bassi, oppure procedure come la somministrazione del mezzo di contrasto da parte degli infermieri (SomF) che sono tipicamente di breve durata ($\tau_{\text{ZC}} < 100$ s) ma con un tasso di scon-

finamento e un tempo di permanenza in ZR relativamente alti. Nei casi presi in considerazione in figura 3 solo per l'operazione di SomF al Philips Panorama 1T τ_{ZC} e τ_{ZR} risultano essere correlati ($p < 0.012$) mentre negli altri casi i dati non risultano correlati ($p > 0.05$).

Per quanto riguarda i medici anestesisti, dalle 16 osservazioni condotte (11 per il tomografo Philips Panorama 1T e 5 per il tomografo Optima 450 1.5 T) si ottiene un tempo medio di permanenza in ZC di circa 170 s, valore decisamente superiore a quello osservato per le altre figure professionali (si veda tabella 3). D'altra parte, in un solo caso su 16 si è registrato uno sconfinamento nella ZR (per circa 50 s). In generale, tenendo conto del numero relativamente basso di procedure che richiedono l'intervento dei medici anestesisti, i dati raccolti possono essere considerati sufficienti per affermare che, per questa figura professionale, i rischi per esposizione ai campi magnetici statici sono trascurabili.

Per ogni rilevazione B(t) è infine stata calcolata la corrispondente derivata temporale, dB(t)/dt e ne è stato considerato il valore massimo. In figura 4

Tabella 5 - Tempi medi di permanenza nelle zone di interesse per la valutazione dei rischi derivanti dall'esposizione a campi magnetici statici presso le diverse installazioni considerate. Il numero di pazienti consentito è stato calcolato sul limite conservativo rispetto la normativa di un tempo di esposizione di 30 minuti al giorno. La stima del numero massimo di pazienti che possono essere trattati giornalmente con la macchina da 3T è stata fatta nell'ipotesi conservativa che la linea isomagnetica da 200 mT del nuovo scanner, corrisponda spazialmente alla linea da 60 mT sulla macchina da 1.5T. Nella stessa tabella sono riportati i dati ottenuti dai colleghi di Pavia per il loro sito da 3T

Table 5 – Mean time of permanency τ_{ZR} inside the zone of interest (ZR) in order to assess compliance with regulatory limits. The contribution to τ_{ZR} due to different operations was also assessed and is shown in separate columns. The maximum number of patients that can be managed by a single operator without exceeding the regulatory limits was calculated, using a “conservative” time limit of 30 minutes. An estimate of the daily maximum number of treatable patients was made for the future 3 T scanner under the conservative hypothesis that the 200 mT isomagnetic line of the new 3T scanner, corresponds to the 60 mT line of the 1.5T scanner. The corresponding value obtained by colleagues at the 3 T MRI site in Pavia is also shown

Infermieri	τ_{PosPz} [s]	τ_{DimPz} [s]	τ_{SomF} [s]	f_{SomF}	τ_{ZR} [s]	Pazienti/ giorno
Philips Panorama 1T (B > 200 mT)	10	0	28	0.25	17	>100
GE Optima 450 1.5T (B > 200 mT)	8	6	15	0.25	18	>100
GE Optima 450 1.5T (B > 60 mT)	38	21	40	0.25	69	26
TSRM	τ_{PosPz} [s]	τ_{DimPz} [s]	τ_{Prep} [s]	f_{Prep}	τ_{ZR} [s]	Pazienti/ giorno
Philips Panorama 1T (B > 200 mT)	1	1	2	0.50	3 >	100
GE Optima 450 1.5T (B > 200 mT)	9	10	7	0.50	23	80
GE Optima 450 1.5T (B > 60 mT)	36	33	27	0.50	83	22
3T Discovery 750 MR, Maugeri (B > 200 mT)	36	11			47	38

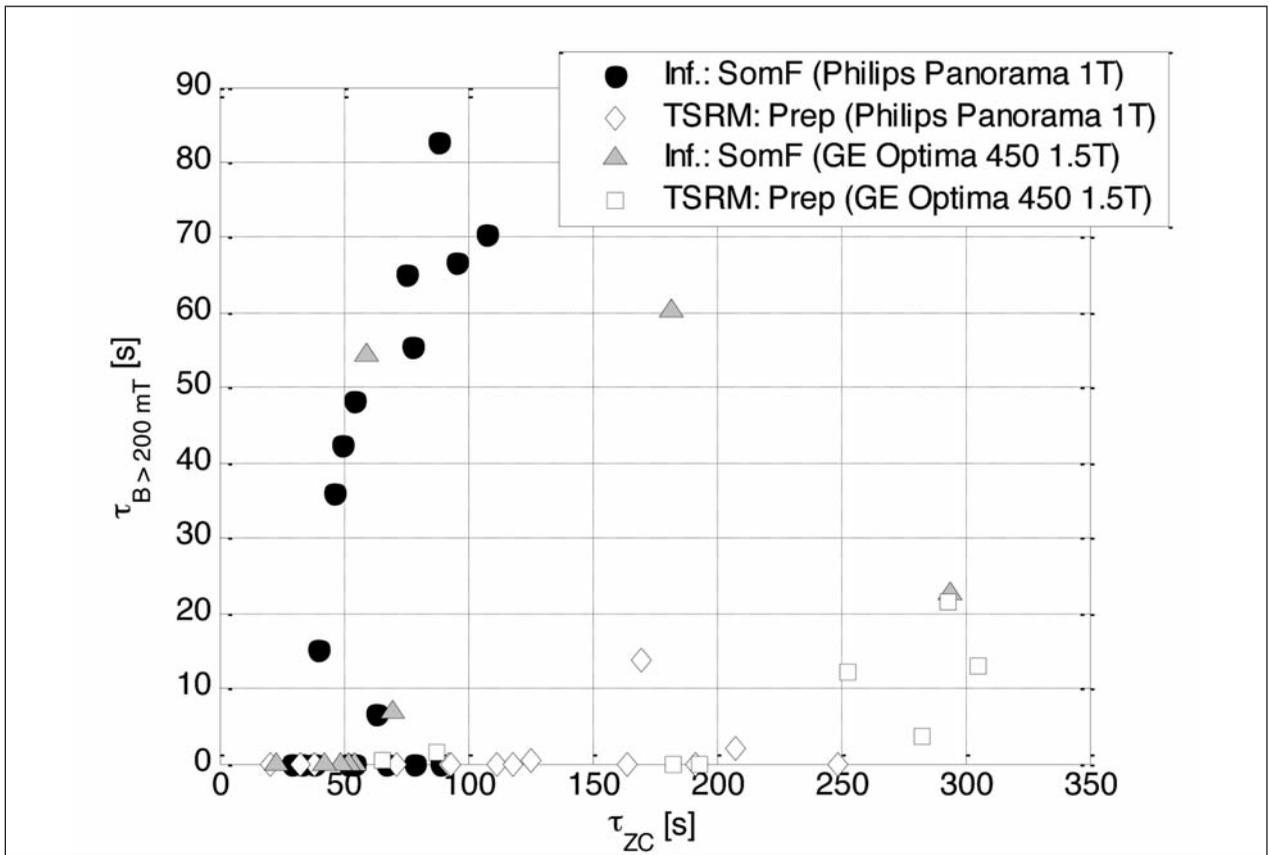


Figura 3 - Tempo di permanenza in ZR (τ_{ZR}) in funzione della durata dell'operazione (τ_{ZC}) per selezionati gruppi di operazioni: SomF da parte di infermieri e Prep da parte di TSRM su entrambe i tomografi installati presso l'A.O. Papa Giovanni XXIII
Figure 3 - Time/duration of permanence in ZR (τ_{ZR}) as a function of the duration of the operation (time/duration of permanence in ZC) (τ_{ZC}) for two selected sub-sets of operations: SomF (drug delivery) by healthcare assistants and Prep (preparation) by radiographers for both scanners installed at Papa Giovanni XXIII Hospital

sono mostrati gli andamenti di B in funzione del tempo e le relative derivate temporali per due operazioni: una SomF (riga in alto) e un PosPz (riga in basso), condotte da infermieri sul tomografo GE Optima 1.5 T. Nella prima procedura il massimo di dB/dt si ha durante la fase di avvicinamento dell'operatore al magnete mentre nella seconda procedura il valore più alto di dB/dt è registrato durante quella di allontanamento. La circostanza che il $(dB/dt)_{max}$ possa essere osservato indifferentemente durante una delle due fasi è generalizzabile, nel senso che, di tutte le 167 procedure considerate, in circa metà delle misure il $(dB/dt)_{max}$ è osservato in allontanamento (53%) mentre nei restanti casi (47%) è osservato in avvicinamento. I dati non evidenziano quindi una fase in cui sia più probabile per

gli operatori sperimentare una maggiore derivata temporale.

La variazione temporale di campo magnetico sperimentata dall'operatore in moto attraverso il gradiente di campo statico, è responsabile della generazione di potenziali e correnti elettriche indotte nei tessuti, che potrebbero rappresentare un rischio per la salute dei lavoratori. Il massimo osservato, su tutte le operazioni monitorate, è 1.4 T/s (SomF condotta su un paziente pediatrico), ampiamente al di sotto del valore pari a 6 T/s, riportato nel DM 3/8/93 come valore sicuro per i pazienti. Le distribuzioni del valore massimo di dB/dt calcolato in ogni acquisizione e suddivise, al solito, per figura professionale e scanner, sono riportate in figura 5. Si osserva una chiara differenza tra le distribuzioni

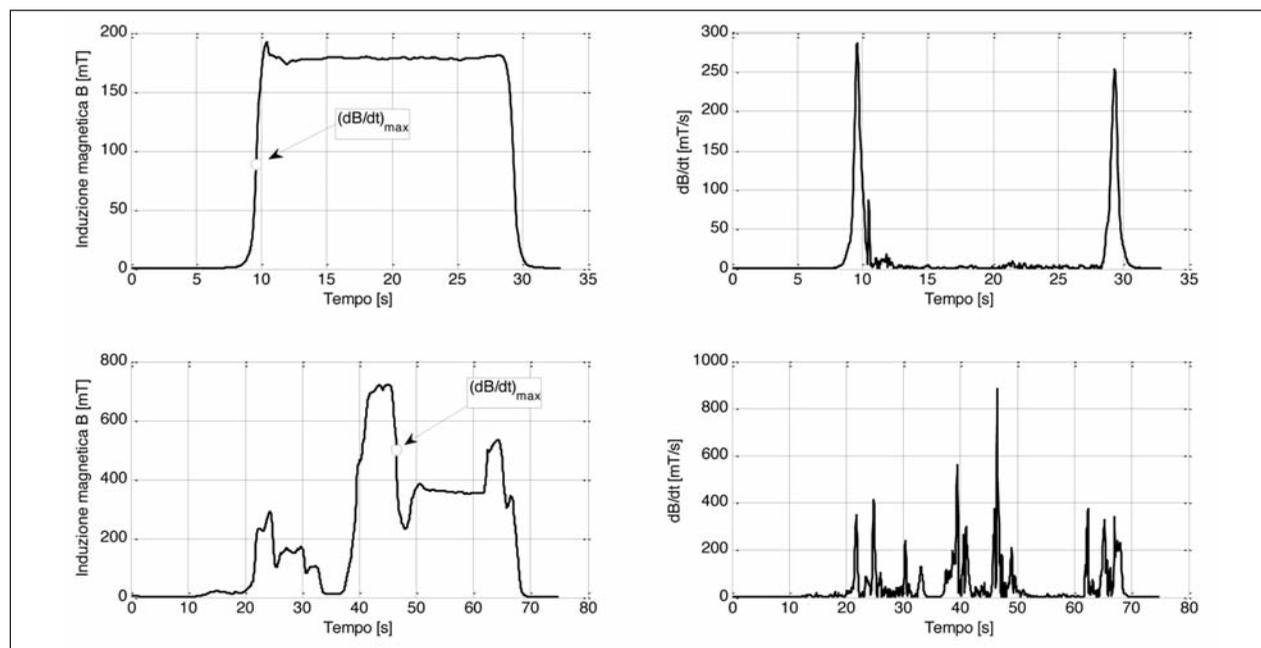


Figura 4 - Andamento del campo induzione magnetica B in funzione del tempo (a sinistra) e relativa derivata dB/dt per un'operazione di somministrazione del mezzo di contrasto (SomF, riga in alto) e durante le operazioni di posizionamento del paziente (PosPz, riga in basso) condotte da infermieri sul tomografo Optima 450 1.5 T

Figure 4 - Magnetic field intensity B as a function of time (left) and corresponding time derivative dB/dt (right) in the case of drug delivery (SomF, upper row) and patient positioning (PosPz - lower row) operations performed by healthcare assistants with the Optima 450 1.5 T scanner

relative al tomografo Panorama 1 T e quelle del GE Optima 450: mentre per lo scanner Panorama è chiaramente individuato un picco nella distribuzione, per lo scanner GE Optima si ha una maggiore dispersione dei dati.

Per spiegare questa differente situazione, si può osservare che la variazione temporale di B dipende dalla velocità dell'operatore (V_{op}) e dal gradiente spaziale di B nel punto considerato, attraverso la semplice relazione:

$$\frac{dB}{dt} = \vec{V}_{op} \cdot \vec{\nabla} B = V_{op} \frac{dB}{dr}$$

essendo r la direzione del movimento nella posizione di interesse.

Durante le misure non si sono osservati comportamenti degli operatori significativamente diversi sulle due macchine e tali da fare presumere una differente distribuzione delle loro velocità nel punto in cui la derivata temporale di B (dB/dt) assume il massimo valore. Si ritiene pertanto che il termine

che maggiormente influenza il valore della derivata temporale, sia la maggiore variazione del gradiente spaziale di B nell'area accessibile agli operatori (caratterizzata da $B \leq 500$ mT e $B \leq 1200$ mT rispettivamente per gli scanner Philips Panorama e GE Optima). Se si considerano le linee isomagnetiche fornite dalle ditte costruttrici dei due tomografi, si vede che lungo le direttrici uscenti dall'isocentro, nella zona interessata dagli spostamenti degli operatori, è possibile interpolare l'andamento del campo magnetico in funzione della distanza r dall'isocentro con una funzione del tipo:

$$B(r) = \frac{B_0}{\left[1 + \left(\frac{r}{\lambda}\right)^\beta\right]}$$

dove B_0 è il valore del campo all'isocentro, β e λ sono parametri che, come atteso dalle curve isomagnetiche fornite dalle case costruttrici e confermato dalle misure in loco, per lo scanner GE Optima di-

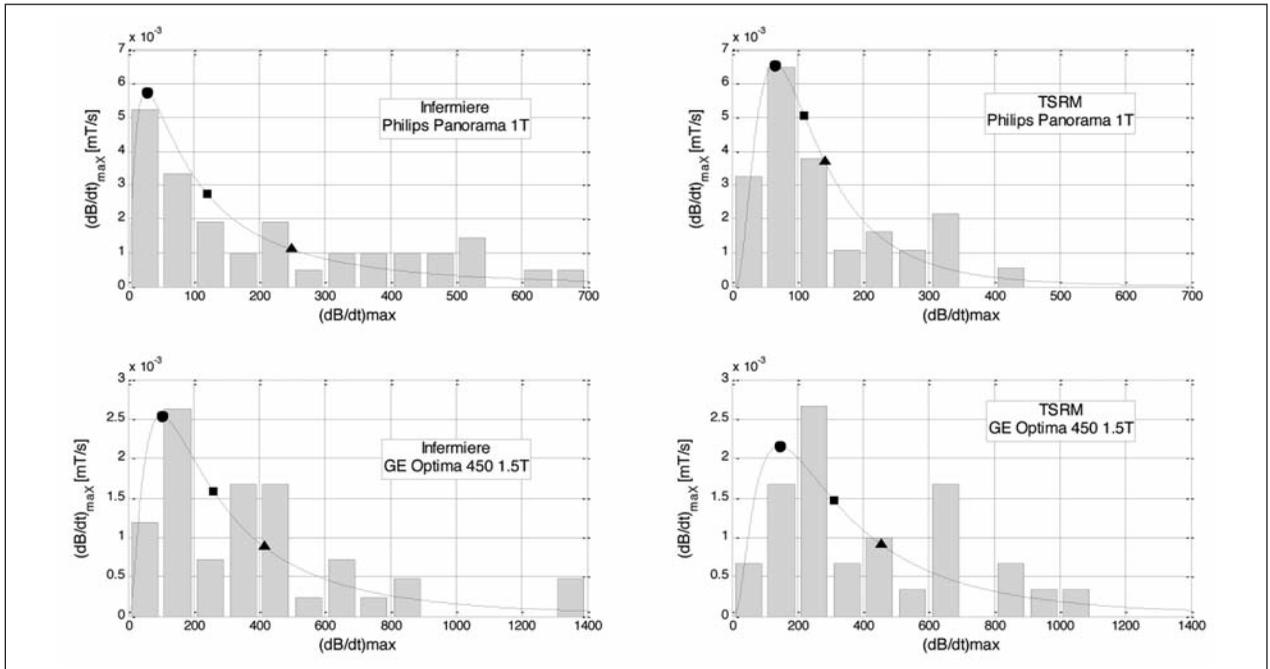


Figura 5 - Distribuzione dei valori massimi di dB/dt per le operazioni condotte sul tomografo Panorama 1T (prima riga) e sul tomografo Optima 450 1.5 T (seconda riga) da infermieri (prima colonna) e TSRM (seconda colonna). In ciascun caso sono state considerate tutte le operazioni che competono alle rispettive figure professionali. I tre indicatori (cerchio, quadrato e triangolo) indicano rispettivamente la posizione della moda, mediana e media sulla distribuzione log-normale (linea continua)

Figure 5 - *dB/dt maximum values distribution for operations performed by healthcare assistants (left column) and radiographers (right column) in the Panorama 1 T (upper row) and Optima 450 1.5 T (lower row) scanner rooms respectively. In both cases all the operations carried out by the different professional figures were considered. The three indicators (circle, square and triangle) show the position of mode, median and average on the log-normal fitting function (continuous line)*

pendono dalla direzione considerata mentre per lo scanner Philips Panorama sono indipendenti essendo, in questo caso, le linee isomagnetiche praticamente circolari. Per la RM Philips Panorama 1T si osserva un valore massimo di dB/dr di circa 15 mT/cm dove il campo è attorno ai 600 mT. Per la RM GE Optima 1.5 T, dB/dr può raggiungere quasi i 40 mT/cm, in corrispondenza di $B \sim 750$ mT ad un angolo di 60° rispetto all'asse del lettino. Si ritiene che siano proprio questi diversi andamenti i principali responsabili delle diverse distribuzioni di $(dB/dt)_{max}$ osservate sulle due macchine.

Si osserva infine che la distribuzione di $(dB/dt)_{max}$, ottenuta dalle misure svolte sui TSRM operanti al tomografo GE Discovery 750 della clinica S. Maugeri di Pavia, risulta essere molto meno dispersa (moda ~ 530 mT/s; mediana ~ 950 mT/s e media ~ 1300 mT/s) delle distribuzioni ottenute

sul GE Optima 450 da 1.5 T. Questo fatto indica che per il parametro $(dB/dt)_{max}$ non è possibile fare la stessa previsione nel passaggio da 1.5 T a 3 T fatta per i tempi di permanenza in ZR.

CONCLUSIONI

L'analisi dei dati raccolti ha mostrato una notevole variabilità dovuta alle diverse operazioni svolte, modalità operative dei lavoratori coinvolti, differenze nella struttura dei magneti ma anche alle differenti condizioni del paziente. Per tutte le figure professionali si è verificato l'ampio rispetto dei limiti di legge, sia per quanto riguarda i tempi di permanenza nella zona in cui il campo magnetico statico supera il valore di 200 mT, sia per quanto riguarda il rateo di variazione temporale di campo magnetico (dB/dt).

Anche per i medici anestesisti, prevalentemente coinvolti nelle procedure diagnostiche di pazienti pediatrici, si conferma lo stesso risultato.

NO POTENTIAL CONFLICT OF INTEREST RELEVANT TO THIS ARTICLE WAS REPORTED

BIBLIOGRAFIA

1. Bhatt B, Ramasubba MR: Theoretical Analysis of Induced Potentials due to Blood Flow under the Static Magnetic Field of MRI. *Indian Journal of Biomechanics* 2009; Special Issue (NCBM 7-8): 51-55
2. Chakeres DW, de Vocht F: Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 2005; 87: 255-265
3. Croizer S, Liu F: Numerical evaluation of the fields induced by body motion in or near high field MRI scanners. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 2005; 87: 267-278
4. Decreto Legislativo 9 Aprile 2008 N. 81 :Tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro
5. Decreto del Presidente della Repubblica n. 542 del 8 agosto 1994 "Regolamento recante norme per la semplificazione del procedimento di autorizzazione all'uso diagnostico di apparecchiature a risonanza magnetica nucleare sul territorio nazionale
6. Decreto Ministeriale 2 Agosto 1991: Autorizzazione alla installazione ed uso di apparecchiature diagnostiche a risonanza magnetica
7. Decreto Ministeriale 3 Agosto 1993: Aggiornamento di alcune norme concernenti l'autorizzazione all'installazione ed all'uso di apparecchiature a risonanza magnetica
8. Direttiva 2013/35/EU 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) (ventesima direttiva particolare ai sensi del l'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE) e che abroga la direttiva 2004/40/CE
9. Glover PM, Bowtell R: Measurement of electric fields induced in human subjects due to natural movements in static magnetic fields or exposure to alternating magnetic field gradients. *Phys Med Biol* 2008; 53: 361-373
10. Glover PM: Interaction of MRI field gradients with the human body. *Phys Med Biol* 2009; 54: R99-R115
11. ICNIRP: Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics* 2009; 6: 504-514 - Traduzione italiana
12. ICNIRP: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz) *Health Physics* 2010; 99: 818-836 - Traduzione italiana.
13. Kannala , Toivo T, Alanko T, Jokela K: Occupational exposure measurements of static and pulsed gradient magnetic fields in the vicinity of MRI scanners. *Phys Med Biol* 2009; 59: 2243-2257
14. Lauterbur P: Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance. *Nature* 1973; 242: 190-191
15. Mansfield P, Maudsley AA: Medical imaging by NMR. *British Journal of Radiology* 1977; 50: 188-194
16. Milani R, Coda S, Baccani G, et al: Indicazioni operative per la valutazione del rischio all'esposizione professionale ai campi magnetici statici nella risonanza magnetica ad alto campo. *Fisica in medicina* 2009; 3: 188-200
17. Moro L, Alabiso F, Parisoli F, Frigerio F: Valutazione sperimentale dell'esposizione lavorativa ai campi magnetici statici prodotti da una risonanza magnetica da 3 Tesla. *G Ital Med Lav Erg* 2013; 35: 26-31
18. Podo F: Limiti di esposizione e normative nazionali per la sicurezza dei pazienti nell'esame a risonanza magnetica. *Ann Ist Super Sanità* 1994; 30: 71-81
19. Shellock FG: Radiofrequency Energy-Induced Heating During MR Procedures: A Review. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 2000; 12: 30-36
20. Schenck JF: Physical interactions of static magnetic fields with living tissues. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 2005; 87: 185-204

RINGRAZIAMENTI: *Gli autori ringraziano Luca Moro e Daniele Fantinato Servizio di Fisica Sanitaria, Fondazione Salvatore Maugeri – IRCCS, Istituto Scientifico di Pavia per aver fornito la strumentazione e condiviso i dati sperimentali acquisiti presso la loro struttura*