

Tomografi NMR a 1.5 e 3T: misura e valutazione della esposizione professionale

¹ S. Valbonesi, ²M. Barbiroli, ¹M. Frullone, ³E. Papotti, ⁴A. Vanore

⁽¹⁾Consorzio Elettra 2000, Pontecchio Marconi, Italy

⁽²⁾Department of Electronics, Computer Sciences and Systems – DEIS – University of Bologna, Bologna, Italy

⁽³⁾Health Physics Service, University of Parma, Parma, Italy,

⁽⁴⁾ Prevention and Protection Office – Arcispedale Santa Maria Nuova, Reggio Emilia, Italy

Obiettivi

Negli ultimi anni il tema della esposizione professionale ai campi elettromagnetici è stato oggetto di crescente attenzione. Nel 2004 l'Unione Europea ha emesso la Direttiva 2004/40/CE [1] che prevede l'inserimento dei campi elettromagnetici tra gli agenti fisici da limitare per proteggere la salute dei lavoratori.

Per quanto concerne il personale operante in ambiente NMR, le preoccupazioni riguardano l'esposizione a campi magnetici statici ad elevata intensità, a campi a radiofrequenza e a gradienti non sinusoidali di campo magnetico lentamente variabili nel tempo. Il gruppo di lavoratori professionalmente esposto è nutrito e composto in primo luogo da infermieri e tecnici sanitari di radiologia medica, chirurghi e anestesisti che utilizzano apparati portatili in sala operatoria, tecnici addetti a montaggio e manutenzione degli impianti e personale deputato alla pulizia.

Lo scopo di questo lavoro è la definizione di una procedura standard per la misurazione e la valutazione, attraverso parametri specifici, della esposizione ai campi elettrici, magnetici, ed elettromagnetici a cui risultano sottoposti i lavoratori che operano in risonanza magnetica nucleare. Questa procedura, applicabile indipendentemente dal modello di tomografo e dai parametri di funzionamento, verrà definita attraverso lo studio dettagliato dell'ambiente lavorativo, la misurazione dei livelli di campo in punti strategici, la valutazione di parametri fisici e dosimetrici rilevanti ed infine validata attraverso un confronto con le simulazioni numeriche. La procedura si estende a tutte e tre le tipologie di campo che caratterizzano l'ambiente MRI.

Materiali e metodi

Per effettuare uno studio completo ed una valutazione della esposizione professionale, occorre considerare separatamente le tre tipologie di campo che caratterizzano l'ambiente e per ciascuna procedere nel modo seguente:

- a) identificare le zone ad elevato impatto espositivo
- b) scegliere strumenti di misura e modelli numerici adatti
- c) definire le quantità fisiche e i parametri dosimetrici di interesse
- d) implementare protocolli specifici di misura
- e) eseguire le misure secondo i protocolli specifici
- f) valutare i parametri dosimetrici
- g) effettuare le simulazioni numeriche
- h) confrontare i risultati delle misure con le simulazioni numeriche
- i) confrontare i risultati trovati con i limiti ed i valori di azione riportati nelle normative

Data la specificità dei campi presenti nell'ambiente, si è deciso di trattare le tre componenti in modo separato per maggior chiarezza.

Campo magnetico statico

Per le misure di campo magnetico statico è stato utilizzato il misuratore di campi dotato di sonda isotropica ad effetto Hall Metrolab THM1176, in grado di rilevare campi statici di intensità compresa tra 0 e 1.999 T con una accuratezza pari al 2% della lettura. Sono stati registrati i valori massimi, stabilizzati dallo strumento (max hold), entro il tempo di un minuto.

La stanza contenente il tomografo è stata suddivisa in quattro quadranti tra di loro simmetrici rispetto all'asse x e all'asse z. Nella zona prescelta è stata tracciata una griglia a caratterizzare microaree di lato 50 cm; lo strumento di misura è stato posizionato ai vertici di ogni singola microarea, in modo tale da ottenere una ricostruzione precisa della geometria del campo statico attorno al tomografo da confrontare con le linee di isocampo fornite dalla casa costruttrice e con le simulazioni numeriche.

Nella scelta delle altezze a cui eseguire le misure sono state fatte considerazioni riguardo alle caratteristiche intrinseche del campo. Le Linee Guida CEI 211-6 "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 0Hz-10kHz, con riferimento alla esposizione umana" [2] suggeriscono di effettuare, nelle zone in cui il campo magnetico statico presenta caratteristiche di minore uniformità, come ad esempio la zona bordeline all'apertura del gantry, misure a più altezze, indicando come standard 100 – 150 – 190 cm dal piano di calpestio.

Si è deciso pertanto di procedere con misure a diverse altezze scegliendo le posizioni standard a 100 e 150 cm ed aggiungendo una terza posizione a 120 cm, come indicato nelle linee guida Pr EN 50499 del CENELEC, in virtù del fatto che, a questa altezza, gli effetti sanitari possono riguardare la formazione di correnti indotte nella sezione dei polsi del lavoratore in movimento all'interno di un intenso campo magnetico statico, dunque massimizzare l'esposizione [3]. Nei punti periferici le misure sono state invece effettuate unicamente a 120 cm dal piano di calpestio.

Protocollo per misurazioni interno sala tomografo – posizioni e condizioni al contorno

<i>Posizione</i>	<i>Altezza dal piano di calpestio</i>
Riferimento a griglia in fig. 1	100 cm - 120 cm – 150 cm
Prossimità quadro elettrico generale e quadro comandi gas medicali	150 cm

Condizioni al contorno: nessuna sequenza clinica operativa

Tabella I. Protocollo per misurazioni campo statico in sala tomografo

Per quello che riguarda invece le zone immediatamente vicine alla sala esami le indagini da effettuare per la caratterizzazione sono:

- Verifica strumentale della posizione dell'isolinea 0.5 mT;
- Andamento dell'induzione magnetica in alcuni punti strategici posti vicino alla postazione operatori, nell'area comune in cui si trova l'accettazione e la zona di preparazione pazienti e nella sala quadri generale.

I parametri dosimetrici da considerare, oltre al valore nominale del campo statico sono:

- Densità di corrente indotta al nodo aortico per effetto dello stazionamento entro il campo magnetico statico;
- Densità di corrente indotta a livello di testa e tronco per effetto del movimento entro

il campo magnetico statico

Il calcolo della densità di corrente indotta al nodo aortico non rientra nei protocolli standard di valutazione dell'esposizione professionale, tuttavia, essendo questa esposizione impossibile da evitare ed in virtù del fatto che il cuore è un organo molto sensibile alle variazioni di corrente si è ritenuto opportuno procedere al calcolo. Sfruttando le due relazioni:

$$F=qv \wedge B \quad e \quad J=\sigma_s E \quad (1)$$

viene valutata, in prima approssimazione, a partire dai risultati dei rilievi strumentali, la densità di corrente di vortice a livello dell'arco aortico, considerando la velocità del sangue quasi perpendicolare alla direzione del campo magnetico statico e pari a 0.42 m/s. Il parametro σ_s è la conducibilità del sangue ed è pari a 0.52 S/m.

In mancanza di un limite specifico per la densità di corrente a livello di nodo aortico, i valori ottenuti da questo calcolo sono stati confrontati con il limite di esposizione per la densità di corrente a livello di capo e tronco per campi fino ad 1 Hz, riportati nella Direttiva 2004/40/CE.

Il calcolo della densità di corrente indotta a livello di testa e tronco per effetto del movimento di un corpo entro il campo magnetico statico viene effettuato scegliendo le traiettorie maggiormente utilizzate dai lavoratori per gli spostamenti in sala tomografo durante le attività routinarie.

Il modello analitico utilizzato per il calcolo della corrente indotta prevede che ogni sezione del corpo umano sia modellata come un disco omogeneo (spira uomo) di conducibilità costante, tralasciando quindi le proprietà di anisotropia dei diversi tessuti e di raggio R. Sotto queste condizioni, dalla legge dell'induzione magnetica scritta in forma integrale

$$\oint_L E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot u_n \cdot ds \quad (2)$$

dove L è la circonferenza ed S la superficie della spira uomo, segue

$$J(r) = \frac{\sigma_t r}{2} \left| \frac{dB_{ave}}{dt} \right| \quad \text{con} \quad \left| \frac{dB_{ave}}{dt} \right| = \left| \frac{dB_{ave}}{dx} \right| \left| \frac{dx}{dt} \right| \quad (3)$$

ne deriva che la densità di corrente indotta nella spira uomo può essere calcolata come:

$$J(r) = \frac{\sigma_t}{2} R v \left| \frac{dB_{ave}}{dx} \right| \quad (4)$$

σ_t è la conducibilità del tessuto, assunta mediamente pari a 0.2 S/m e B_{ave} è il valore del campo magnetico medio che attraversa la spira uomo ottenuto tramite misura strumentale. R viene assunto pari a 0.1 m per la testa e 0.3 m per il tronco, una stima media delle dimensioni di un individuo adulto. La velocità dell'operatore che si sposta all'interno della sala tomografo per raggiungere le posizioni di operatività può essere stimata pari ad 1 m/s, in direzione radiale, ortogonale all'asse del magnete.

Campo a radiofrequenza

Per le misure di campo a radiofrequenza è stato utilizzato il misuratore a larga banda PMM8053 A equipaggiato con la sonda EP330 in grado di rilevare campi nel range 100 kHz – 3 GHz, lineare nel range 10 – 300 MHz, con sensibilità 0.3 V/m e risoluzione pari a 0.01

V/m. Le condizioni al contorno sono tipiche da campo vicino pertanto le componenti E ed H devono essere misurate separatamente.

Sono stati registrati i valori medi e massimi di campo elettrico e magnetico ed è stato effettuato uno studio dettagliato sulla forma dei segnali. Le misure sono state effettuate partendo da quanto indicato nelle Linee Guida CEI 211-7 [4] introducendo una serie di variazioni imposte dalla specificità dell'ambiente. La prima indagine è stata pertanto effettuata a 150 cm di altezza e la seconda a 120 cm che corrisponde al massimo di esposizione a campi a radiofrequenza raggiungibile in ambiente MRI [3]. Le misure devono essere effettuate in presenza di sequenze cliniche operative; in particolare la sequenza standard Turbo Spin Echo è quella che, per le caratteristiche intrinseche che prevedono l'utilizzo di un treno a quattro impulsi RF, massimizza l'esposizione a campi a radiofrequenza. La durata della singola misura deve essere adeguata alla durata del treno di sequenze. Nel nostro caso specifico, trattandosi di sequenze di 2 minuti e 16 ciascuna, abbiamo effettuato misure della durata di 4 minuti, eliminando, in fase di elaborazione dati tutti i punti registrati a sequenza off.

Per la caratterizzazione degli ambienti occorre studiare i seguenti aspetti:

- a) decadimento di E ed H lungo l'asse z sulla linea passante per l'isocentro
- b) valutazione dei livelli di campo E ed H in punti strategici, all'interno della sala esami e nella adiacente zona di rispetto
- c) studio attraverso simulazione numerica dell'andamento del campo E ed H in bore e nell'intorno della zona borderline
- d) analisi della forma del segnale a radiofrequenza
- e) valutazione del SAR

I valori ottenuti attraverso misure, simulazioni numeriche e calcoli sono stati poi confrontati con i limiti riportati nella Direttiva 2004/40/CE e nel Testo Unico.

La valutazione dosimetrica è stata effettuata attraverso il calcolo del SAR, che esprime la potenza assorbita per unità di massa ed è definito come:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{2\rho} \quad (5)$$

dove:

E è il valore di picco del campo elettrico misurato in V/m

σ è la conducibilità elettrica del tessuto biologico

ρ è la densità del tessuto biologico

Entrambi i parametri σ e ρ sono dipendenti dal tipo di tessuto oggetto di indagine, di conseguenza, preliminarmente alla valutazione della grandezza dosimetrica SAR occorre effettuare una valutazione sia della conducibilità elettrica che della densità tissutale.

Gradienti non sinusoidali a bassa frequenza

Le misure sono state effettuate utilizzando il misuratore di campi elettromagnetici a bassa frequenza Narda ELT 400, dotato di una sonda specifica per indagini su segnali pulsati con range di frequenza 1 Hz – 400 kHz. La sonda triassiale permette di ottenere un valore medio di induzione magnetica B, integrato nel tempo. Nel caso di indagini su gradienti a bassa

frequenza prodotti da tomografi a risonanza magnetica, il valore medio dell'induzione magnetica non costituisce un parametro conclusivo che è invece rappresentato dal valore dB/dt per calcolare il quale occorre conoscere periodicità ed ampiezze del treno di impulsi oggetto di indagine. Per questo motivo si è resa necessaria la creazione di una catena strumentale costituita dalla sonda ELT 400 interfacciata con l'oscilloscopio a 4 canali Tektronics TPS2014.

Studio segnali non sinusoidali a bassa frequenza

Utilizzando la catena strumentale sopra descritta sono stati registrati i valori massimi, stabilizzati dallo strumento (max hold), entro il tempo di un minuto. Le misure sono state effettuate, su diverse serie di sequenze spin echo caratterizzate da $T_r=500$ ms, $T_e=30$ ms, ma con differente spessore di slice.

I settaggi relativi all'oscilloscopio variano al variare della tipologia di segnale; in generale si è proceduto a rilevare campioni della durata di 2.5 sec su ciascun asse, si è provveduto poi a sommare in quadratura i contributi relativi ai tre assi per ottenere l'andamento delle tensioni e di conseguenza la variazione di B in funzione del tempo. Il calcolo della quantità dB/dt è stato effettuato utilizzando la tecnica sliding windows prendendo come intervallo di "finestra" un Δt pari a 0.01s.

Per la caratterizzazione completa dell'esposizione sono stati studiati i seguenti aspetti:

- a) Forma dei segnali prodotti dai gradienti non sinusoidali a bassa frequenza all'interno del bore e nelle posizioni borderline;
- b) Calcolo del rapporto dB/dt per differenti spessori di slice e differenti posizioni in/out bore;
- c) Calcolo delle correnti indotte

I valori ottenuti attraverso misure e calcoli numerici sono state poi confrontate con i limiti di esposizione riportati nella Direttiva 2004/40/CE e nel Testo Unico.

Calcolo delle correnti indotte dalla presenza di gradienti di campo magnetico a bassa frequenza

I gradienti utilizzati in MRI per creare una dipendenza della frequenza di Larmor dalle coordinate spaziali, hanno una ampiezza variabile nel range 25-50 mT/m e frequenza centrata attorno al kHz, con componenti spettrali nel range 100 Hz – 10 KHz. La forma di questi segnali è estremamente complessa, con caratteristiche di non sinusoidalità. Frequenza ed ampiezza del segnale applicato dipendono, nell'ambito della medesima sequenza clinica, da vari fattori tra i quali in prima istanza lo spessore di strato selezionato.

Aumentando quindi lo spessore dello strato occorrerà diminuire l'intensità del gradiente per ottenere lo stesso effetto in termini di rotazione degli spin.

Il valore della corrente indotta è stato calcolato a partire dal primo termine della relazione (3) considerando le costanti pari a $0.064 \text{ Am}^{-2}\text{sT}^{-1}$ [5] ed inserendo al posto di B_{ave}/dt i risultati ottenuti tramite la tecnica sliding windows applicata ai valori misurati.

Risultati

La metodologia è stata applicata a tomografi da 1.5 e 3.0 T; per quanto concerne i campi statici il lavoro ha rilevato che i limiti imposti dalla Direttiva 2004/40/CE non vengono

superati. Per quanto concerne le correnti indotte a livello di testa e tronco per effetto del movimento entro il campo statico, se si considerano i percorsi standard seguiti dagli operatori durante lo svolgimento delle loro mansioni all'interno della sala esami, non si assistono a superamenti del limite di 40 mA/m^2 riportato nelle normative. Il valore di corrente indotta al nodo aortico per effetto dello stazionamento in campo statico è stato calcolato, ritenendo il parametro di particolare importanza e confrontato, in mancanza di altri riferimenti con il limite per la densità di corrente indotta a capo e a tronco per campi fino ad 1 Hz, dal confronto non sono emersi superamenti.

Per quanto riguarda il campo a radiofrequenza, sono state effettuate separatamente misure della componente elettrica e magnetica, sia internamente che esternamente al bore; i valori si mantengono sempre al disotto dei limiti nelle zone esterne al bore, ampi superamenti, con livelli di campo elettrico prossimi ai 300 V/m invece caratterizzano la zona interna del bore, che dovrebbe essere interdetta agli operatori, sia per ingresso a corpo intero sia per introduzione limitata agli arti o alla testa. Per quanto riguarda i gradienti non sinusoidali a bassa frequenza (100 Hz-100kHz), per una sequenza spin echo standard, a 85 cm dall'isocentro del tomografo, corrispondente in un apparato standard all'ingresso del gantry, il limite di 0.22 T/s riportato nelle linee guida ICNIRP [6] per il rapporto dB/dt, può risultare ampiamente superato.

Conclusioni

La metodologia proposta permette di sviluppare un protocollo standard applicabile in ogni caso, indipendentemente dalle caratteristiche del tomografo (campo nominale, uso specifico, localizzazione) e di eseguire, in modo rapido e ripetibile misure e valutazioni di esposizione professionale a questa tipologia di apparati clinici. Permette inoltre di ottenere una forma tabellare dei valori misurati che permette di fare immediatamente il confronto con i limiti imposti dalle normative per tutte le tipologie di esposizione che caratterizzano l'ambiente.

Bibliografia

[1] Direttiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) (diciottesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE) – 2004

[2] Comitato Elettrotecnico Italiano Linee Guida 211-6 Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 Hz- 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana

[3] Project VT/2007/017 Final Report An investigation into Occupational Exposure to Electromagnetic Fields for Personnel Working with and Around Medical Magnetic Resonance Imaging Equipment

[4] Comitato Elettrotecnico Italiano Linee Guida 211-7 Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana

[5] Guidance on Determining Compliance of Exposure to Pulsed Fields and Complex Non-Sinusoidal Waveforms below 100 kHz with ICNIRP Guidelines. Health Physics 84 (3): 383-387; 2003.

[6] Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz). Health Physics 99(6):818-836; 2011