

Tomografia a risonanza magnetica: valutazione di SAR in e out of bore

S. Valbonesi¹, M.Barbiroli², M.Frullone¹, E. Papotti³ and A.Vanore⁴

¹Consorzio Elettra 2000, via Celestini, 1 – Pontecchio Marconi - Italy, simona@mail.elettra2000.it

²DEIS – University of Bologna – Italy

³University of Parma – Health Physics Service - Italy

⁴Prevention and Protection Office – Arcispedale S. Maria Nuova, Reggio Emilia - Italy



1 INTRODUZIONE

I recenti progressi fatti in materia di imaging MRI hanno portato ad un utilizzo sempre più elevato di queste tecnologie anche per effettuare controlli nel corso di interventi chirurgici, grazie alla possibilità di avere una buona risoluzione sia spaziale che temporale, un elevatissimo contrasto e capacità di effettuare imaging multiplanare. La valutazione della esposizione a campi a radiofrequenza in questi casi è estremamente complessa, dal momento che le uniche grandezze direttamente misurabili sono il campo elettrico e l'induzione magnetica; la quantità dosimetrica caratterizzante è il SAR. Nel corso di questo lavoro sono state effettuate misure dirette di campo a radiofrequenza, simulazioni numeriche ed una stima in prima approssimazione del SAR a corpo intero per le zone in e out of bore. Quello che emerge è che, nelle zone out of bore non ci sono superamenti dei limiti e dei valori di azione riportati nel Testo Unico, situazioni che invece possono verificarsi in caso di inserimento di un arto o di tutto il corpo all'interno del bore.

Background

I tomografi a risonanza magnetica utilizzano impulsi a radiofrequenza per eccitare i nuclei i quali, terminata la perturbazione, ritornano alla condizione di equilibrio (che corrisponde ad un allineamento nella direzione del campo statico applicato) restituendo l'energia sottoforma di radiofrequenza.

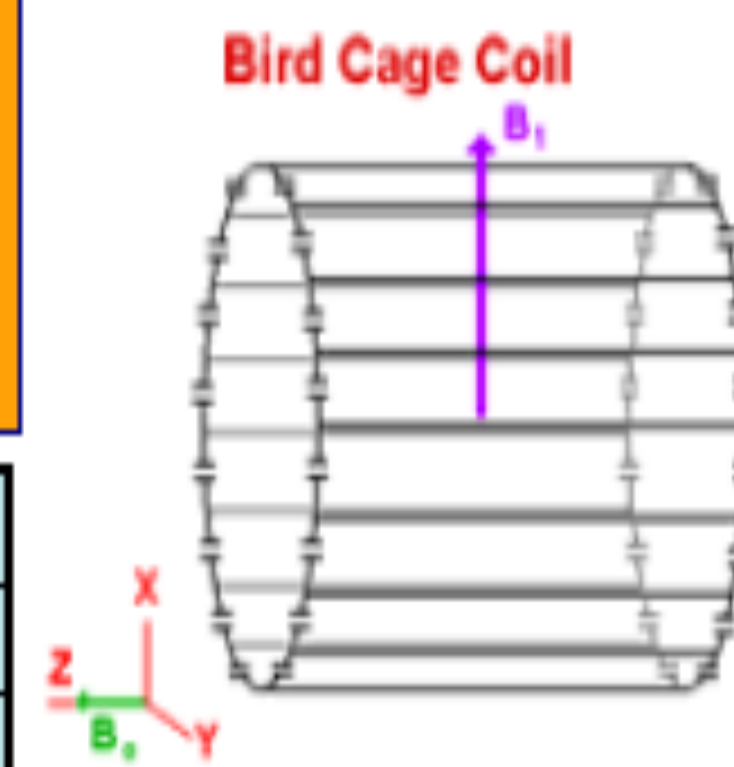
La frequenza di risonanza è definita dall'equazione di Larmor $\omega_0 = \gamma B_0$, dove γ è il rapporto giromagnetico, caratteristico della sostanza oggetto di indagine.

Il campo a radiofrequenza viene generato da un sistema di bobine, generalmente si tratta di birdcage coils integrate nello scanner che producono un campo B1 polarizzato circolarmente all'interno del bore, con caratteristiche di uniformità spaziale in corrispondenza dell'isocentro del tomografo. Il campo prodotto idealmente dovrebbe essere massimo all'interno del bore e nullo nelle zone esterne.

I campi a radiofrequenza prodotti dai tre tomografi (1 T, 1.5 T e 3 T di campo statico nominale) sono caratterizzati da frequenze comprese tra 42 e 128 MHz. A queste frequenze gli effetti predominanti sono di natura termica, i meccanismi di interazione sono noti e gli effetti biologici sono correlati con la densità di potenza assorbita.

Goals

- 1) Implementazione di una procedura per la valutazione tramite misura strumentale del campo a RF all'interno della sala tomografo e nelle adiacenze
- 2) Caratterizzazione dell'ambiente in e out of bore sulla base di misure combinate con simulazioni numeriche
- 3) Valutazione del SAR a corpo intero per punti di interesse specifico



Grandezze fisiche oggetto di indagine	Parametri dosimetrici valutati
Campo elettrico - E	SAR a corpo intero
Andamento del segnale RF nel tempo	SAR localizzato agli arti

2 METODI

Protocollo per la misurazione del campo a RF	
Strumento utilizzato	Broadband EMF measurer PMM8053A
Sonda	EP 330 probe range 100 kHz – 3 GHz
Grandezza misurata	Electric field E (V/m)
Logger	1 s Fix
Filter	40 Hz
Risoluzione	0.01 V/m
Sensibilità	0.3 V/m
Errore	± 0.8 dB
Mode	Min-MAX RMS
Altezze	120 – 150 cm da terra
Durata	2 o 4 minuti a seconda della sequenza
Sequenza	Spin Echo

Il protocollo prevede la misura dei livelli di campo elettrico E in alcuni punti specifici posti all'interno della sala esami e nelle pertinenze esterne; le misure vengono effettuate con sequenze standard spin echo operative. Tali sequenze, per le loro caratteristiche specifiche massimizzano l'esposizione a campi a radiofrequenza. Per le valutazioni del campo elettrico all'interno del bore sono state utilizzate misure spot effettuate in combinazioni con simulazioni numeriche di campo elettrico effettuate con il programma Semcad X.

Sono stati poi calcolati il SAR a corpo intero ed il SAR localizzato agli arti senza tenere in considerazione le anisotropie dovute alla differenziazione dei tessuti. Per la valutazione del SAR il corpo è stato approssimato ad una serie di cilindri composti di tessuto ad alto contenuto di acqua quale il tessuto muscolare. Il parametro SAR esprime la potenza per unità di massa ed è definito come:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{2\rho}$$

dove σ è la conducibilità elettrica, dipendente dall'acqua contenuta nel tessuto, dalla architettura cellulare e dalla frequenza del segnale RF.

σ è stato posto pari a 0.628 S/m estrapolandolo dal modello interattivo sviluppato dall'IFAC CNR sulla base del fantoccio Gabriel ρ è stato posto pari a 1.050 g/cm³, sulla base dei dati riferiti al fantoccio Golem

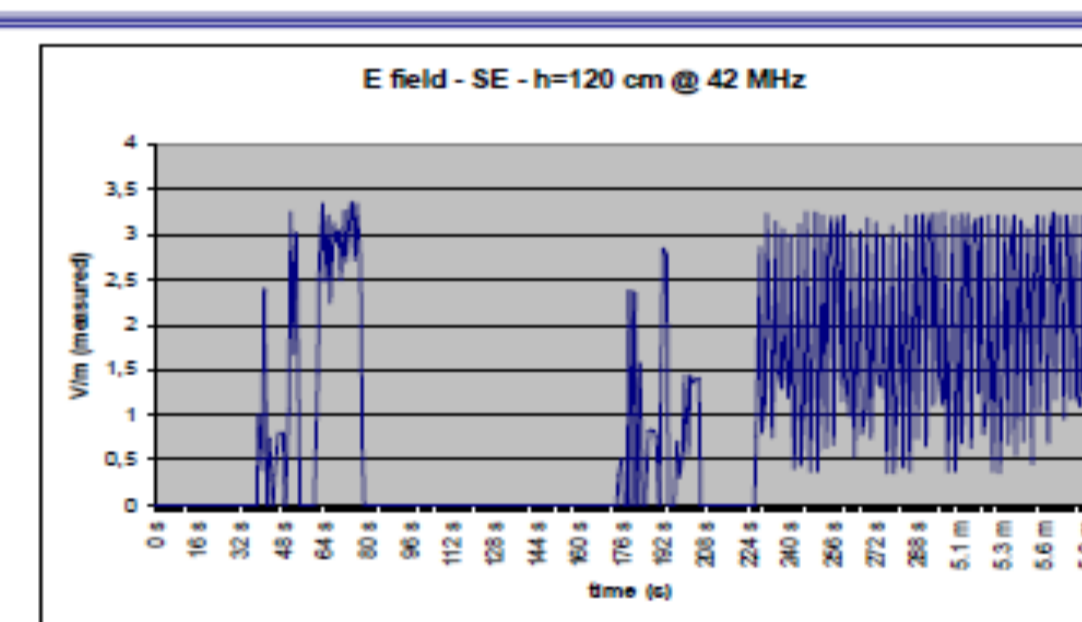
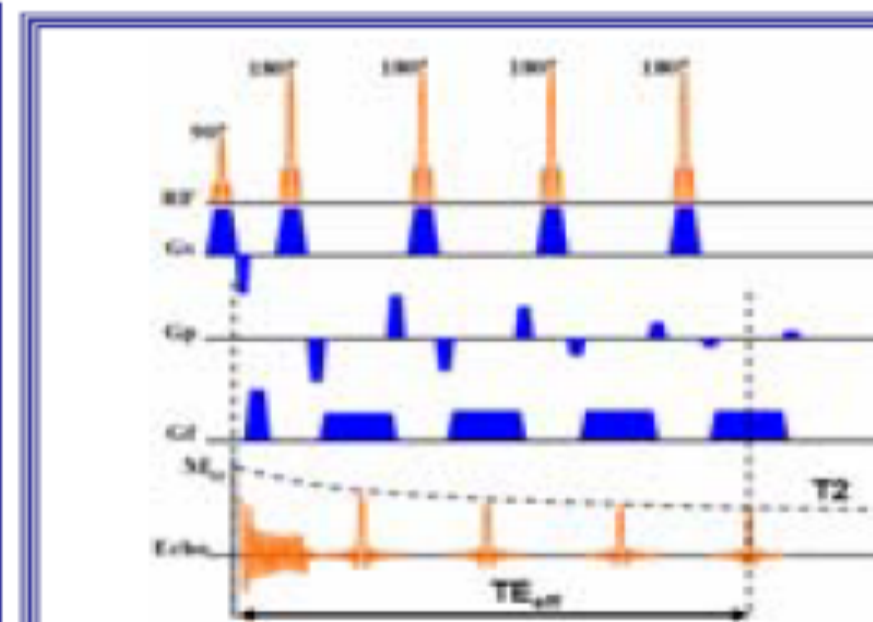
La stima del SAR a corpo intero viene effettuata inserendo nella formula i valori di campo elettrico misurato per le zone esterne al bore ed i valori ottenuti dalle simulazioni numeriche per le aree in bore.

3 RISULTATI

Valutazione SAR out of bore

Posizione sulla mappa	SAR ₄₂ (mW/kg)	SAR ₁₂₈ (mW/kg)	Confronto con il limite riportato nel Testo Unico
Posizione 4	0.050	n.v.	Inferiore
Posizione 2	3.6	1.06	Inferiore
Posizione 5	0.037	n.v.	Inferiore
Posizione 3	0.033	n.v.	Inferiore
Posizione 1	0.05	n.v.	Inferiore
Posizione 6	n.v.	0.25	Inferiore
Posizione 7	0.096	0.27	Inferiore

Il confronto è stato fatto con il limite di legge per SAR a corpo intero, dal momento che l'esposizione è dovuta alla presenza di campi a radiofrequenza dispersi nell'ambiente e di conseguenza una localizzazione della esposizione non risulta possibile. I risultati mostrano che il SAR a corpo intero nelle aree interne alla sala esami e nelle pertinenze esterne risulta inferiore (per un fattore che varia da 1.000 a 10.000) rispetto al limite riportato nel Testo Unico. Il calcolo del SAR è stato effettuato utilizzando i valori di campo elettrico misurati ad una altezza di 150 cm da terra con sequenze spin echo operative

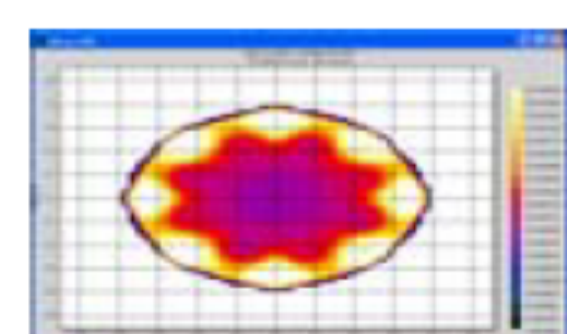
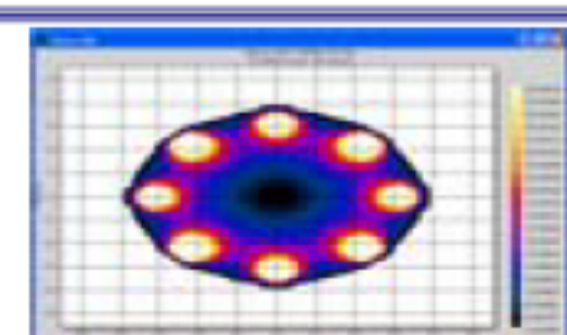


Andamento del campo elettrico misurato durante una sequenza spin echo con Tr = 500 ms Te = 30 ms

Il primo spike è dovuto alla sequenza scout che viene lanciata prima della sequenza vera e propria come test

Valutazione SAR in bore

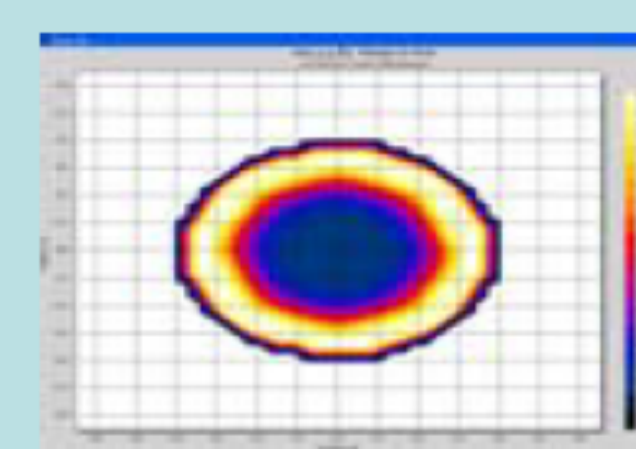
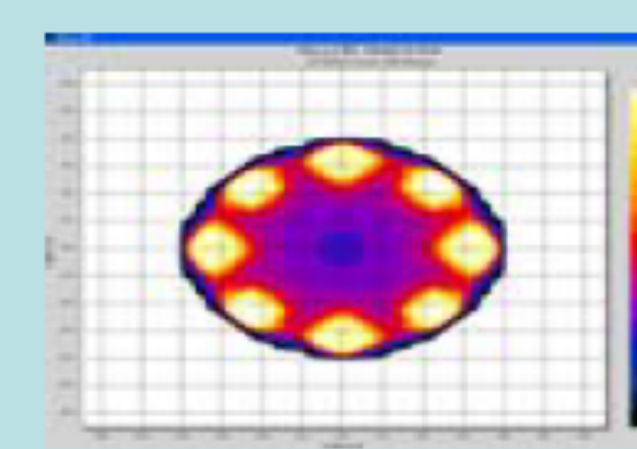
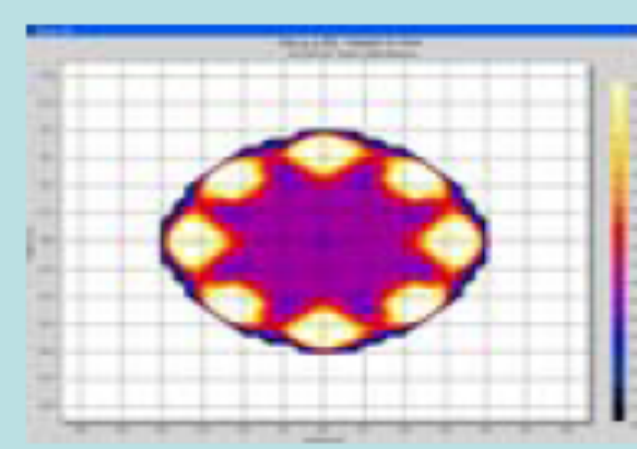
Posizione	SAR ₄₂ (W/kg)	Confronto con limite SAR agli arti	Confronto con limite SAR testa/tronco	SAR ₆₄ (W/kg)	Confronto con limite SAR agli arti	Confronto con limite SAR testa/tronco
Isocentro	0.028	Inferiore	Inferiore	0.035	Inferiore	Inferiore
0,0,10	9.56	Inferiore	Comparabile	3.61	Inferiore	Inferiore
0,0,20	28.8	Superamento	Superamento	12.7	Inferiore	Superamento
0,0,30	33.9	Superamento	Superamento	16.7	Inferiore	Superamento
0,0,40	20.0	Comparabile	Superamento	9.69	Inferiore	Comparabile
0,0,50	4.7	Inferiore	Inferiore	3.3	Inferiore	Inferiore
0,0,60	1.17	Inferiore	Inferiore	0.86	Inferiore	Inferiore
0,0,70	0.24	Inferiore	Inferiore	0.17	Inferiore	Inferiore



I livelli di campo elettrico all'interno del bore sono estremamente elevati (70-300 V/m). Il confronto in questo caso deve essere effettuato con il SAR a livello di testa/tronco e di arti, dal momento che l'operatore in condizioni operative standard non si verrà mai a trovare con tutto il corpo all'interno del bore, zona in cui al limite potrà inserire un arto o la testa in situazioni di emergenza che richiedono l'intervento diretto sul paziente.

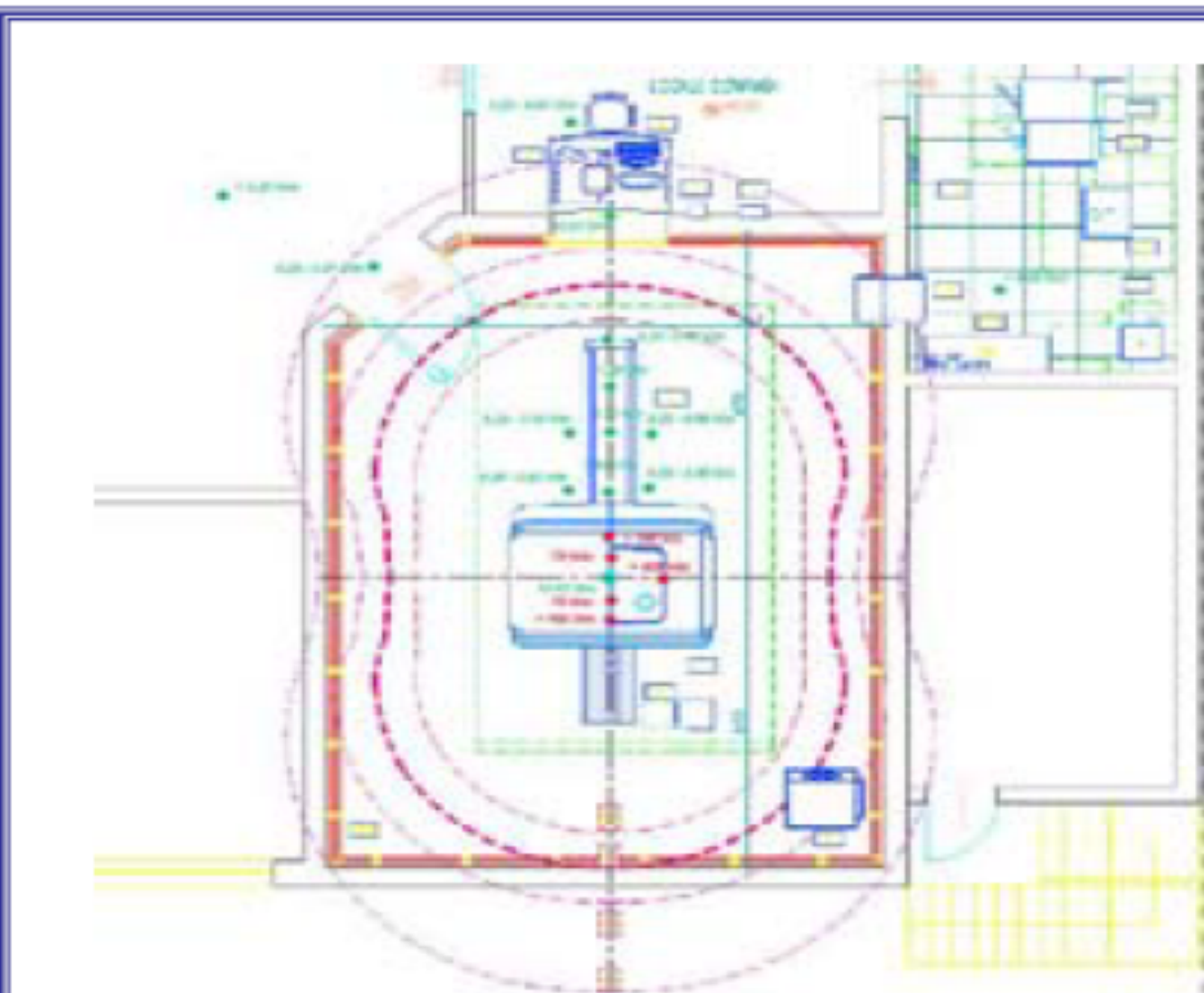
I valori di SAR sono stati calcolati applicando la formula sopra descritta ai valori di campo elettrico e magnetico ottenuti tramite simulazione numerica con Software SEMCAD X.

I valori di SAR calcolati per l'esposizione agli arti possono superare il valore di 20 W/kg riportato come limite nel Testo Unico in caso di inserimento dell'arto in profondità all'interno del bore, ad una distanza di 20 cm dall'isocentro per un tomografo a 1T. Per quanto riguarda invece l'esposizione a livello di testa e tronco è possibile affermare che il limite di 10 W/kg viene superato nel caso l'operatore si ponga all'interno del bore ad una profondità di 20-30 cm dall'isocentro. Se invece si effettua il confronto con il SAR a corpo intero i valori sono ampiamente superati ovunque all'interno del bore.



Simulazione campo magnetico H a 0, 20, 40 cm dall'isocentro

4 DISCUSSIONE



L'ambiente di lavoro può essere suddiviso in safety/no safety zones sulla base di questa valutazione in prima approssimazione del parametro dosimetrico SAR.

La figura riporta una mappatura delle zone a rischio all'interno della sala esami e nelle pertinenze, ottenuta attraverso una valutazione del SAR basata su valori di campo elettrico misurati ed ottenuti tramite simulazioni numeriche.

Dalla analisi dei dati e dal confronto con i limiti riportati nel Testo Unico emergono le seguenti considerazioni:

1) All'interno della sala esami i livelli di SAR sono inferiori ai limiti riportati nel Testo Unico.

2) Nelle pertinenze esterne e nelle postazioni occupate dagli operatori nel corso delle loro attività standard (postazione PC esterna alla sala esami, locali tecnici, locali di servizio, area accettazione) i livelli di SAR sono inferiori al limite per i professionalmente esposti riportato nel Testo Unico ed anche al limite per la popolazione riportato nel DPCM 8 Luglio 2003

3) Superamenti dei limiti per SAR a corpo intero e SAR localizzato ad arti, testa e tronco si hanno all'interno del bore, zona che dovrebbe essere inibita anche agli operatori.

5 CONCLUSIONI

Il lavoro mostra come, attraverso l'implementazione della procedura e dei protocolli descritti ed utilizzando i modelli matematici sopra indicati sia possibile, attraverso l'esecuzione di poche misure semplici e non costose effettuate in alcuni punti chiave all'interno ed all'esterno della sala tomografo e la conseguente valutazione di parametri dosimetrici quali il SAR, caratterizzare, in prima approssimazione l'esposizione del personale operante in ambiente NMR a campi a radiofrequenza.

La metodologia proposta permette altresì, grazie all'ausilio delle simulazioni numeriche, di definire all'interno della sala esami e nelle pertinenze immediatamente esterne delle safety zones, ossia delle aree in cui l'esposizione del personale è al di sotto dei limiti e/o dei valori di azione riportati nel Testo Unico e delle zone alle quali l'accesso deve essere impedito anche agli operatori per superamento dei limiti.

Bibliografia

- [1] ICNIRP 2004 Statement on "Medical magnetic Resonance (MR) procedures: protection of patient" Health Phys. 87 n.2: 197-216; 2004
- [2] World Health Organization Environmental Health Criteria Document 16 Radiofrequency and Microwaves; 1981
- [3] World Health Organization Environmental Health Criteria Document 16 (Revised version), Electromagnetic fields in the range of 300 Hz to 300 GHz; 1993
- [4] D. Andreuccetti, R. Fossi, C. Petrucci, Calculation of the Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz, - Published in IFAC CNR website
- [5] C. Gabriel, S. Gabriel: "Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies", - Internet document
- [6] M. Zankl, A. Wittman, The adult male voxel Golem segmented for whole body CT patient data, Radiat. Environ. Biophys 40: 153-162; 2001

Si ringrazia l'Ospedale S.Orsola di Bologna per averci permesso di effettuare le misure sui tomografi 1.0 e 1.5 T durante l'attività di controllo di qualità sui tomografi

Si ringrazia l'Ospedale di Parma per averci permesso di effettuare le misure sul tomografo 3 T

Si ringrazia la ditta SPEAG Schmid & Partners Engineering per averci fornito una licenza gratuita di 6 mesi per il modulo MRI del programma SEMCAD X