Università degli Studi
di Parma

Esposizione simultanea a campo magnetico statico e gradienti: valutazione della corrente indotta al cuore

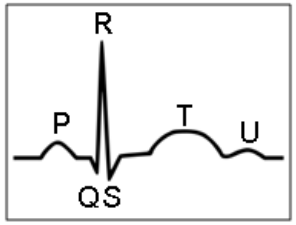
Simona Valbonesi
Ermanno Papotti
Roberto Sghedoni
Matteo Tiberti
Andrea Vanore
Paolo Zanichelli

Prospetto presentazione

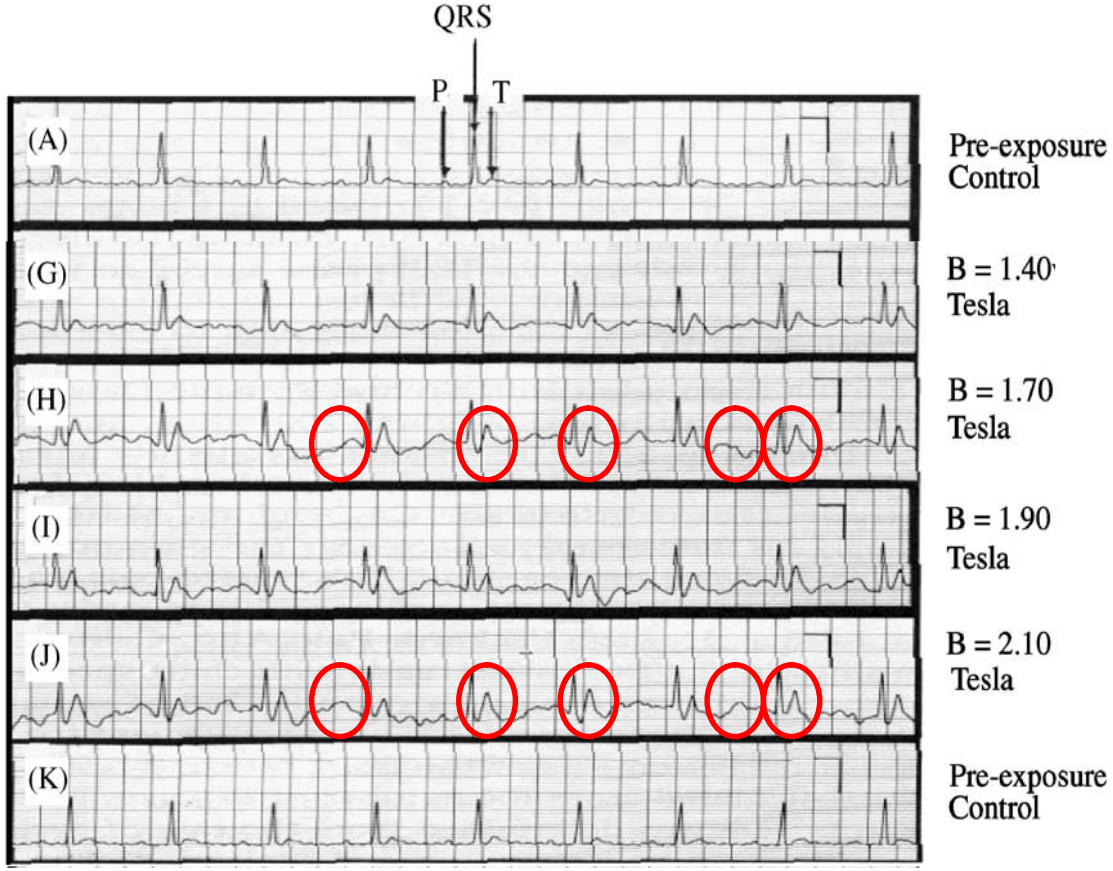
- Letteratura scientifica e sintomatologie descritte
- Obiettivi del lavoro
- L'ambiente MRI
- Modellizzazione del cuore
  - *calcolo corrente indotta da campo magnetico statico*
  - *calcolo correnti indotte da campo gradiente*
  - *calcolo corrente indotta totale*
- Misure strumentali
  - *misura di campo magnetico statico*
  - *misura e valutazione campi gradienti*
  - *applicazione dei valori misurati al modello*
- Risultati
  - *Calcolo corrente indotta da campo magnetico statico*
  - *Calcolo corrente indotta totale*
  - *Calcolo corrente massima indotta al nodosenoatriale in vari scenari*
- Conclusioni

Letteratura di partenza (1)

T.S. Tenforde: Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system, *Prog. Biophys. Molec. Bio.l n.87 , pp. 279-288, 2005.*



- Aumento ampiezza dell'onda P
- Aumento ampiezza dell'onda T
- Leggera riduzione pressione
- Calo dei battiti cardiaci
- Nessuna modificazione del complesso QRS



Tutti gli effetti risultano transitori: una volta terminata l'esposizione i parametri del soggetto si riportano alle condizioni di pre-esposizione.

Sintomatologie

N.J. Shah: Advances in ultra-high field MRI at 9.4T and hybrid 3 T MR-PET

Relazione generale al XCVII Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica – L'Aquila 28 settembre 2011.

Sintomi lamentati dai pazienti sottoposti a campi statici 9.4 T:

- Sudorazione,
- Difficoltà respiratorie,
- Tachicardia,
- Aritmia,
- Svenimento.

L'autore si è limitato a descrivere la sintomatologia.

Non sono stati effettuati monitoraggi tramite ECG sui pazienti per verificare la presenza di disturbi transitori nella conduzione elettrica del muscolo cardiaco.

Obiettivi del lavoro

Immediati

•Valutazione della corrente indotta a punti sensibili del cuore per effetto di esposizione simultanea ad intenso campo magnetico statico e gradienti di campo magnetico

•Confronto dei valori ottenuti con i valori fisiologici

•Calcolo numerico dei livelli massimi di corrente indotta al cuore per esposizione simultanea a campi statici fino a 20 T e gradienti di campo magnetico

•Confronto dei valori ottenuti con i valori soglia per induzione di extrasistole e fibrillazione ventricolare

Successivi

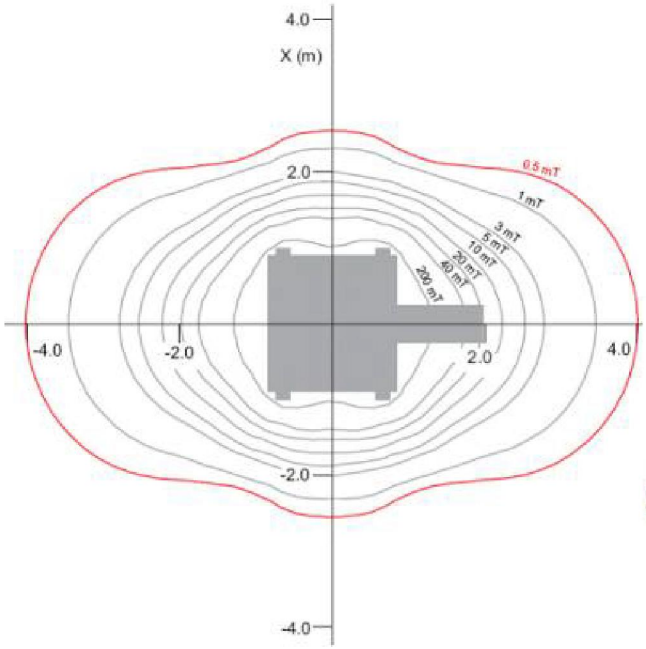
- Verifica degli effetti del campo magnetico statico e gradiente su onda P e onda T
- Verifica della assenza di effetti di variazione del complesso QRS
- Miglioramento del modello con calcolo degli effetti dovuti al ciclo sistole/diastole

Ambiente di ricerca

Come ambiente per l'effettuazione delle indagini abbiamo scelto la risonanza magnetica nucleare in quanto i campi statici prodotti dai tomografi sono tra i campi più elevati presenti negli ambienti di lavoro.

In ambiente di risonanza magnetica si deve tenere conto di quattro possibili fonti di esposizione:

- Campo Magnetico Statico,
- Gradienti di Campo Magnetico,
- Campo Elettromagnetico RF,
- Rumore.



Nel lavoro abbiamo considerato:

- esposizioni del paziente
- esposizioni professionali

Peculiarità delle esposizioni

Esposizioni professionali:

- I livelli di campo magnetico statico a cui sono sottoposti gli operatori sono estremamente inferiori rispetto ai livelli di esposizione a cui sono sottoposti i pazienti.
- Gli operatori però nel corso della loro attività standard compiono movimenti, a volte rapidi, all'interno del campo magnetico statico, per cui occorre effettuare un monitoraggio anche su questi soggetti.

Esposizione del paziente:

- Il paziente è sottoposto a campi magnetici statici molto superiori rispetto a quelli a cui sono sottoposti gli operatori.
- L'esposizione è continuativa per un periodo di almeno 15 minuti.
- Il paziente nel corso della indagine clinica è sottoposto anche ad intensi gradienti di campo magnetico generati nel corso delle sequenze utilizzate nella acquisizione dell'immagine.

Generazione di correnti

In presenza di campo magnetico statico le correnti vengono generate per effetto del movimento del corpo:

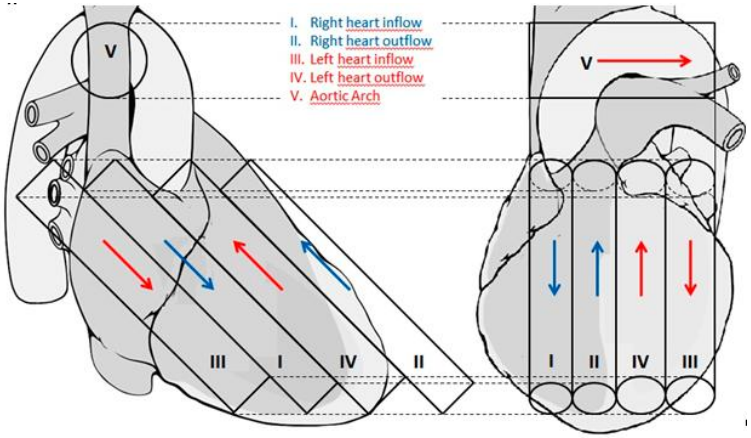
- Movimento traslazionale o rotazionale del corpo
- Movimento anche involontario di alcune parti del corpo (es. rotazione degli occhi, battito delle palpebre) – ineliminabile.
- Movimento del sangue all'interno delle arterie, delle vene e delle camere cardiache in soggetto fermo – ineliminabile.

I gradienti di campo magnetico per loro natura generano correnti indotte su soggetti fermi o in movimento secondo due meccanismi di seguito descritti.

La corrente totale localmente indotta sarà data dalla somma vettoriale delle singole correnti.

Modellizzazione del cuore

Modello semplificato del cuore



Il cuore è stato rappresentato tramite un modello a dotti tra loro paralleli posizionati in modo tale da rispecchiare la situazione fisiologica reale.

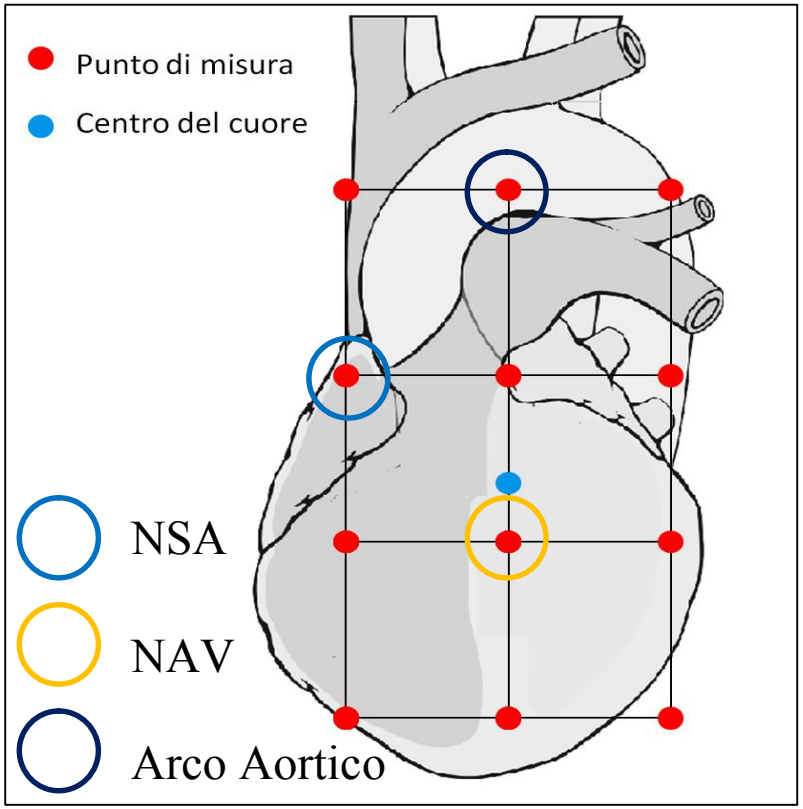
- quattro dotti di opportune dimensioni simulano le camere cardiache

- un dotto orizzontale simula l'arco aortico

Approssimazioni

- non viene tenuto conto nel calcolo del susseguirsi delle fasi di sistole/diastole
- il sangue scorre all'interno dei dotti senza resistenze interne né vorticosità
- la velocità del sangue viene considerata sempre costantemente pari alla velocità di uscita del sangue dalle valvole cardiache
- lo spessore delle valvole cardiache è stato considerato trascurabile e le valvole sempre aperte
- I diametri di arteria polmonare e valvola aortica semilunare sono stati variati leggermente per ottenere dotti cilindrici a raggio costante
- Le quattro vene polmonari sono state considerate un'unica vena con diametro corrispondente alla somma dei diametri delle quattro

Key points



Punti scelti:

- Nodo Seno Atriale (NSA)
- Nodo Atrioventricolare (NAV)
- Arco Aortico (AA)

NSA e NAV sono stati scelti in quanto rappresentano i due pacemaker (primario e secondario) del cuore.

L'Arco Aortico è stato scelto in quanto essendo il punto in cui il sangue raggiunge la velocità massima, le correnti indotte possono essere elevate

Modello per il calcolo della corrente indotta per effetto del campo magnetico statico

Il modelllo parte dal principio fisico descritto dalla forza di Lorentz:

$$F = q\mathrm{v} \times B$$

Sfruttando la forma locale della legge di Ohm è possibile ottenere per le correnti indotte la seguente espressione:

$$J = \sigma_s E = \sigma_s \mathrm{v} \times B = \sigma_s vB \sin \alpha$$

Con

- σ_s conducibilità del sangue pari a 0.52 S/m.
- v velocità del sangue, nei punti in cui è da effettuare la valutazione.
- α angolo compreso tra il vettore velocità e la direzione del campo magnetico statico

Effetti dei gradienti di campo magnetico sul cuore

La generazione di corrente elettrica nel cuore in un soggetto sottoposto a campo gradiente avviene attraverso due modalità precise e distinte:

a) la variazione temporale del campo magnetico che produce una corrente J_{GR} legata direttamente al valore del rateo dB/dt

b) la variazione spaziale del gradiente di campo magnetico dovuta al movimento del sangue all'interno del campo gradiente che produce una corrente J_{BL}

Entrambi i meccanismi portano come esito finale alla formazione di correnti indotte all'interno del cuore.

Modello matematico per il calcolo di J_{BL}

Il modello per la valutazione si basa sulla legge di Faraday.
Il sangue che circola in una specifica sezione di un singolo dotto cilindrico è assimilabile ad una spira con le seguenti caratteristiche:

- Raggio R uguale al raggio del dotto
- Conduttività omogenea
- Movimento a velocità costante all'interno del dotto

Sotto queste condizioni il flusso magnetico può essere descritto come:

$$\oint_L E.dl = -\frac{d}{dt}\int_S B.ds = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

la densità di corrente indotta in funzione del raggio del dotto può essere espressa:

$$J_{BL}(R) = \frac{\sigma_s}{2} R\left|\frac{dB}{dt}\right| = \frac{\sigma_s}{2} R\left|\frac{dB}{dx}\right|\left|\frac{dx}{dt}\right| = \frac{\sigma_s}{2} Rv\left|\frac{dB}{dx}\right|\sin\alpha$$

Modello matematico per il calcolo di J_{GR}

Per valutare la corrente J_{GR} ogni singolo dotto è stato assimilato ad una spira circolare di raggio R concatenata ad un campo magnetico non sinusoidale il cui rapporto dB/dt è noto per misurazione diretta.

Dalla espressione della forza elettromotrice si ricava la corrente indotta:

$$J_{GR}(R) = +\frac{\sigma_s}{2} R \left| \frac{dB}{dt} \right|$$

Dove:

σ_sè la conducibilità elettrica del sangue.

La corrente indotta totale per effetto dei campi gradiente è data da:

$$J\left(\frac{dB}{dt}\right) = J_{BL} + J_{GR} = \frac{\sigma_s}{2} Rv \left| \frac{dB}{dx} \right| \sin\alpha + \frac{\sigma_s}{2} R \left| \frac{dB}{dt} \right|$$

Calcolo della corrente indotta totale

La corrente indotta totale localmente può essere espressa come somma vettoriale di:

- contributo dovuto al movimento del sangue in campo magnetico statico
- contributo dovuto alla presenza del campo gradiente
- contributo dovuto al movimento del sangue all'interno del campo gradiente

$$\vec{J}_{tot} = \vec{J}_S \pm \vec{J}_{GR} \pm \vec{J}_{BL}$$

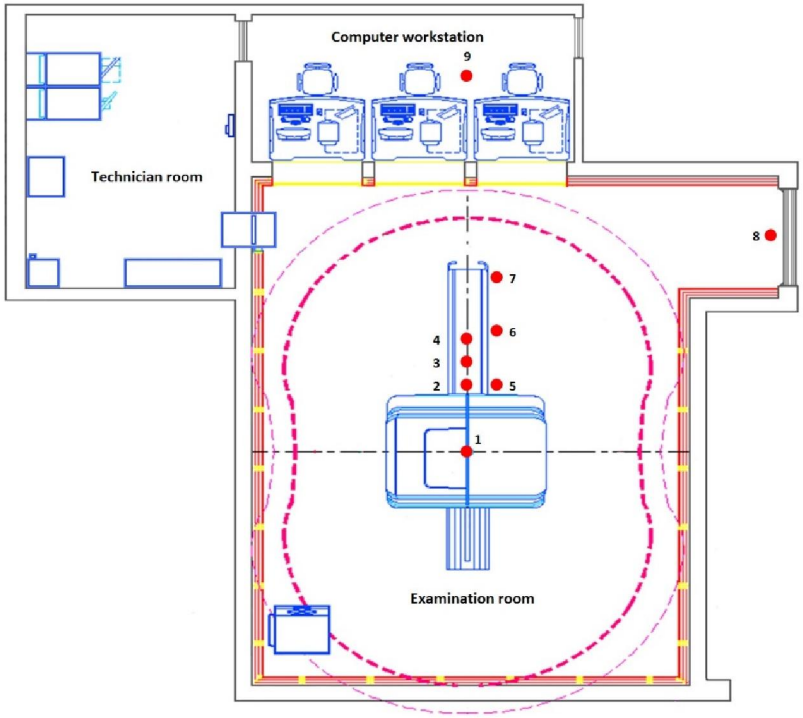
Per procedere con la applicazione dei modelli occorre procedere a:

- misurazione del campo magnetico statico nei key points selezionati
- misurazione del campo gradiente
- studio dell'andamento del campo gradiente

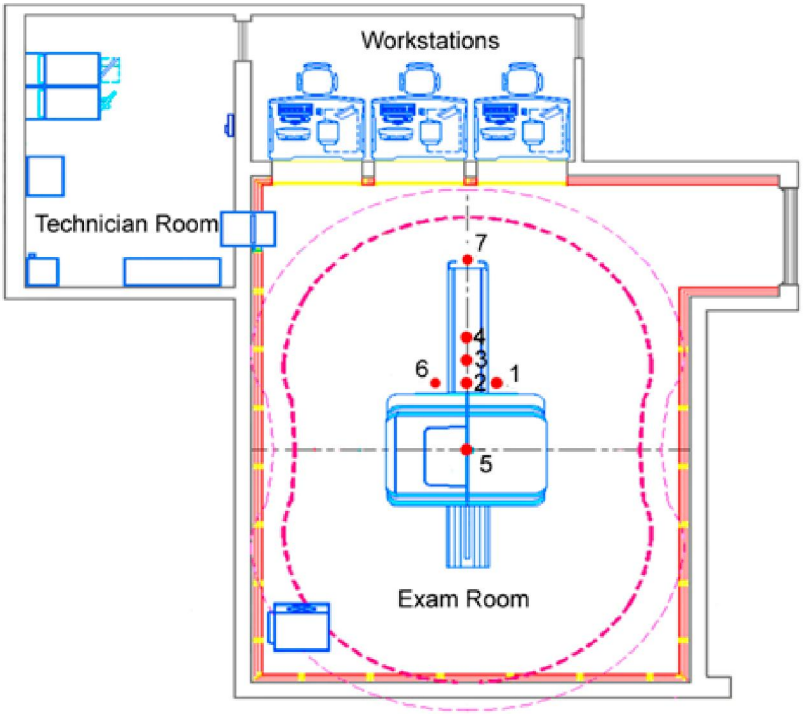
Misure strumentali

Posizionamento punti di misura

Campo statico



Campo gradiente



I punti in cui effettuare le misure sono stati selezionati in base alle indicazioni fornite dal personale operante sui tomografi con particolare riferimento a:

- posizioni occupate dal paziente durante l'esame
- posizioni occupate dal personale durante l'attività standard

Misure di campo magnetico statico

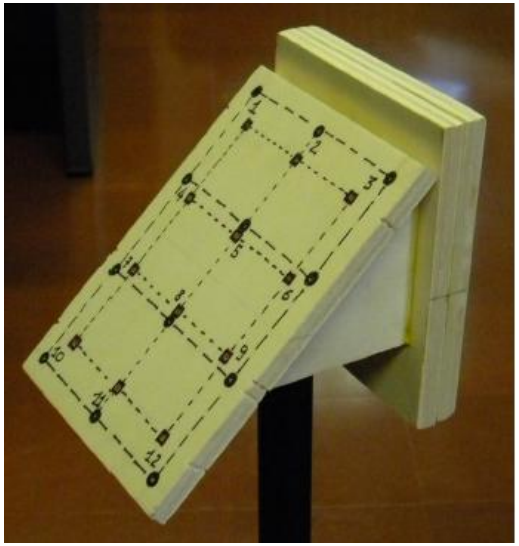
Per effettuare i rilievi è stato costruito un modello ligneo che riporta esattamente le posizioni dei punti chiave.

In corrispondenza dei key points sono state effettuate misure di campo magnetico statico tramite sonda a effetto Hall.

Le misure sono state effettuate su un tomografo a risonanza Healthcare Signa MR750 3.0T
Le misure sono state effettuate a 100, 110 130 cm da terra

Condizioni al contorno: nessuna sequenza MRI attiva durante i rilievi

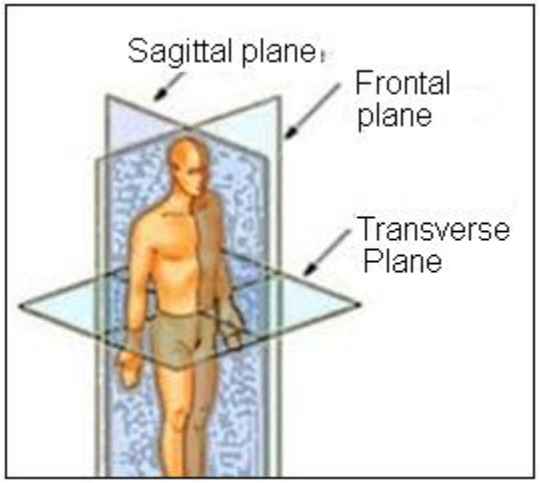
Modello specifico del cuore utilizzato per i rilievi strumentali



Supporto in legno montato su cavalletto amagnetico telescopico.

Nel modello sono riportati i punti di interesse in particolar modo la posizione di NAS, NAV e AA.

Il modello ligneo presenta le stesse dimensioni del cuore di un individuo adulto ed è inclinato di 135° sul piano sagittale, esattamente come accade per il cuore.



Il cavalletto telescopico permette di effettuare i rilievi a diverse altezze per effettuare valutazioni in condizioni di:

- soggetto in piedi,
- soggetto sdraiato.

Parametri fisiologici utilizzati nel modello

Parametro	AA	SAN	AVN
Velocità sangue [m/s]	0.52	0.50	0.50
Conducibilità [S/m]	0.42	0.42	0.42
α	90°	135°	135°

Caratteristiche dei gradienti di campo magnetico

- Ampiezza variabile nel range 25-50 mT/m.
- Frequenze attorno al kHz (con armoniche tra 100 Hz e 10 kHz).
- Le forme dei segnali sono estremamente complesse e caratterizzate da non sinusoidalità.
- Il parametro di interesse è il rateo di variazione del campo magnetico nel tempo:

$$dB/dt$$

- Questo rapporto è riferibile in modo diretto alla corrente indotta nei vari organi dai gradienti di campo magnetico.

Misura dei gradienti di campo magnetico

La quantità dB/dt non è misurabile direttamente: per valutarla occorre utilizzare una catena strumentale composta da uno strumento di misura opportunamente progettato per rilevare rapidissime variazioni di campo magnetico, accoppiato ad un oscilloscopio a 4 canali.

Narda ELT400con
Lecroy Wave Runner Oscilloscope

Le misure sono state effettuate alle seguenti altezze:

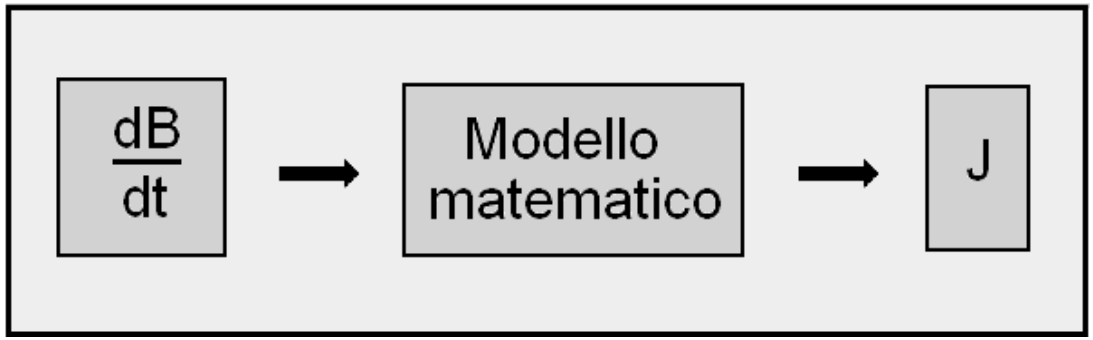
- 110 cm da terra
- 130 cm da terra

Su ripetizioni programmate di sequenze Balanced FFE.

Caratteristiche del segnale utilizzato

Utilizzando la catena strumentale indicata in precedenza sono state effettuate analisi di campi gradienti presso il tomografo a risonanza magnetica presente nel reparto di Radiologia nell'Arcispedale S. Maria Nuova Reggio Emilia: Tomografo Philips Achieva 1.5 T.

Sequenza	Balanced FFE
Tr	3.1 ms
Te	1.57 ms
Spessore di strato	5 mm
Frequenza centrale	500 Hz



Studio dei segnali

Le misure sono state effettuate utilizzando la catena strumentale ELT400 + oscilloscopio.

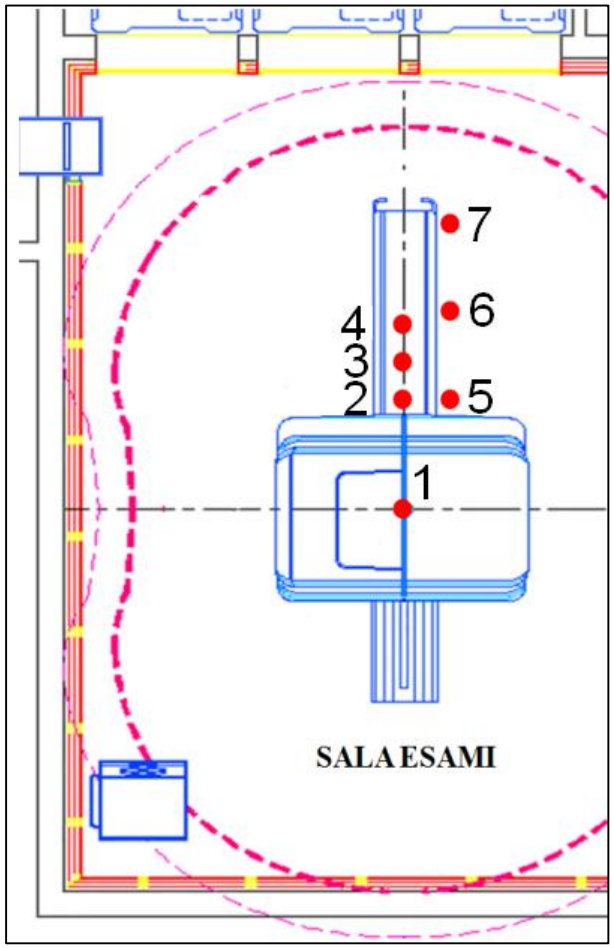
Utilizzando le funzioni matematiche dell'oscilloscopio è stato possibile ottenere il valore di B.

Il rateo dB/dt è stato ottenuto tramite elaborazione con tecnica sliding windows ponendo una windows size pari a 0.01 s.

I valori di J sono stati calcolati applicando i due modelli descritti in precedenza.

Risultati e conclusioni

Risultati: correnti indotte dal campo magnetico statico



Spot	AA J (mA/ m^2)	SAN J (mA/ m^2)	AVN J (mA/ m^2)
1	655.20	441.24	441.24
2	390.94	232.83	210-62
3	140.65	80.60	78.54
4	48.92	30.44	27.36
5	95.22	58.39	72.21
6	8.21	5.24	6.18
7	2.71	1.73	1.93
8	0.03	0.02	0.02
9	0.03	0.02	0.02

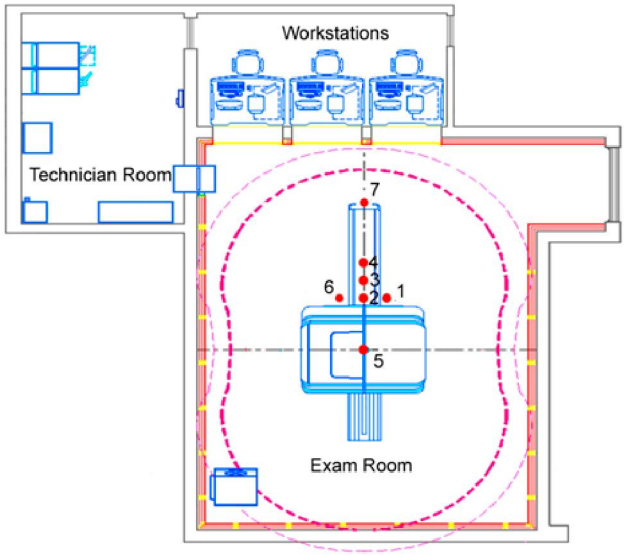
Valori fisiologici:
10 ÷ 100 mA/m^2

I punti 8 e 9 sono esterni alla sala esami e sono stati valutati unicamente ai fini delle esposizioni professionali

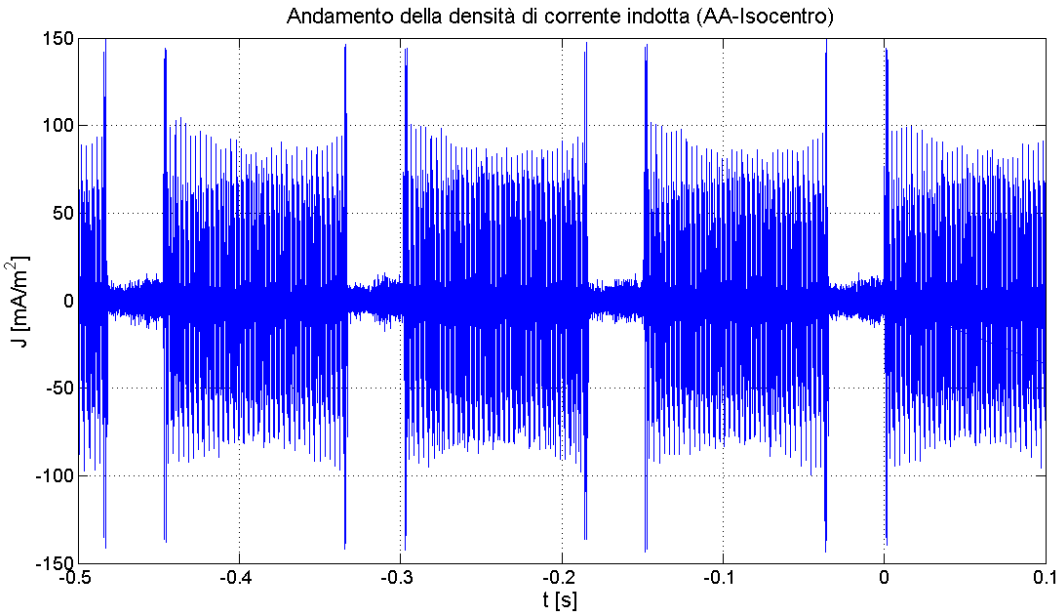
Risultati: corrente indotta dal campo gradiente

Punto	$\lvert J_{GR}\rvert_{dotto1}$ mA/m^2	$\lvert J_{GR}\rvert_{dotto2}$ mA/m^2	$\lvert J_{GR}\rvert_{dotto3}$ mA/m^2	$\lvert J_{GR}\rvert_{dotto4}$ mA/m^2	$\lvert J_{GR}\rvert_{dotto5}$ mA/m^2
1	0.55	0.55	0.83	0.83	1.37
2	13.49	13.49	20.24	20.24	33.40
3	0.61	0.61	0.92	0.92	1.53
4	0.12	0.12	0.19	0.19	0.31
5	60.59	60.59	90.88	90.88	149.94

Punto	$\lvert J_{BL}\rvert_{dotto1}$ mA/m^2	$\lvert J_{BL}\rvert_{dotto2}$ mA/m^2	$\lvert J_{BL}\rvert_{dotto3}$ mA/m^2	$\lvert J_{BL}\rvert_{dotto4}$ mA/m^2	$\lvert J_{BL}\rvert_{dotto5}$ mA/m^2
5	$1.14.10^{-4}$	$1.19.10^{-4}$	$1.71.10^{-4}$	$1.80.10^{-4}$	$2.97.10^{-4}$



Caratteristiche delle correnti



La corrente J_{GR} è caratterizzata da un andamento estremamente complesso, laminare, che raggiunge, in isocentro per l'arco aortico intensità dell'ordine di 150 mA/m^2 .

I valori massimi della corrente J_{BL} prodotta dal movimento del sangue in un campo gradiente sono ordini di grandezza inferiori.

Nella somma vettoriale si è deciso di trascurare il contributo J_{BL}

Il contributo maggiore alla corrente indotta è imputabile alla presenza del campo statico.

Calcolo della corrente totale

$$\vec{J}_{tot} = \vec{J}_S \pm \vec{J}_{GR} \pm \cancel{\vec{J}_{BL}}$$

Il calcolo è stato effettuato solo in condizioni di “worst case” corrispondenti alla seguente situazione:

- vettori J_{GR} e J_S aventi localmente la stessa direzione e lo stesso verso

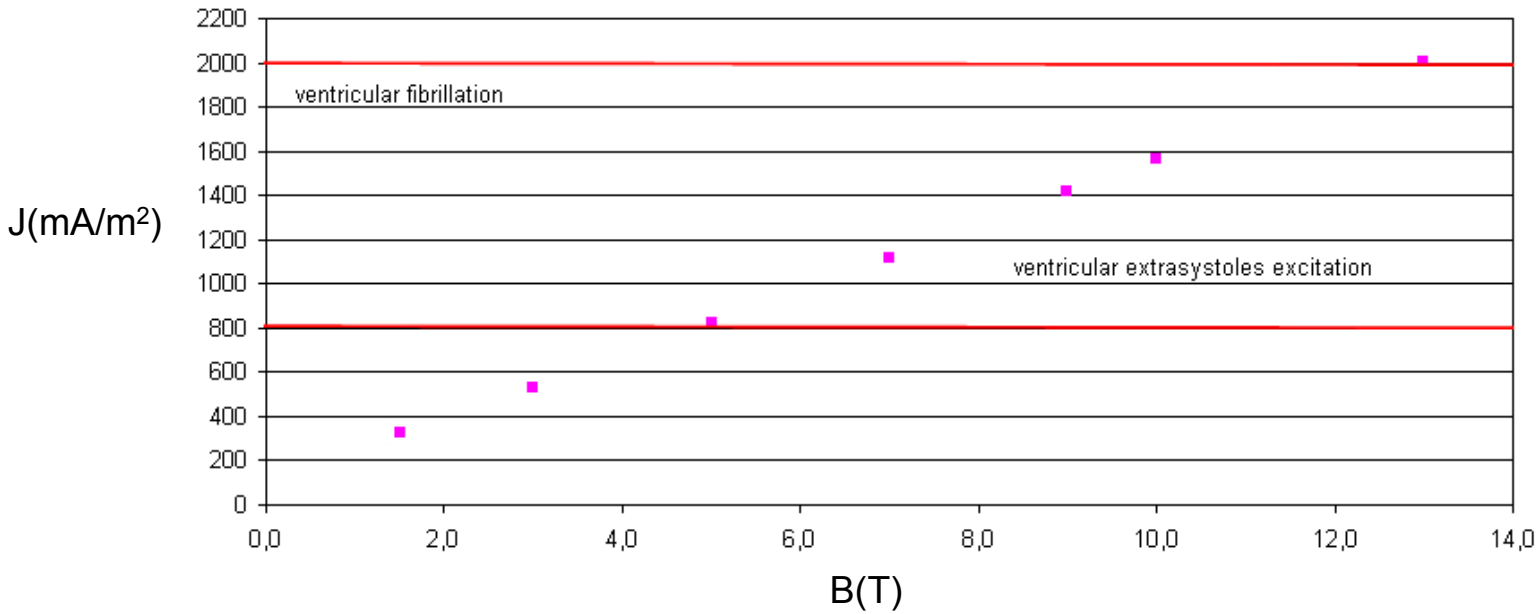
Punto	**J_{tot} (mA/m^2)**
Arco aortico	805.14
Nodo senoatriale	532.12
Nodo atrioventricolare	501.83

Livelli massimi di corrente al nodo senoatriale

$$\vec{J}_{tot} = \vec{J}_S \pm \vec{J}_{GR} \pm \cancel{\vec{J}_{BL}}$$

Il calcolo è stato effettuato solo in condizioni di “worst case” corrispondenti alla seguente situazione:

- vettori J_{GR} e J_S aventi localmente la stessa direzione e lo stesso verso
- campo statico nominale compreso tra 1.5 e 13 T



Conclusioni

I livelli di corrente indotta calcolati sono elevati, soprattutto per quanto riguarda l'arco aortico, inferiori di circa un 50% per nodo senoatriale e nodo atrioventricolare.

Per un tomografo 3T le correnti prodotte dal campo statico sono superiori ai livelli fisiologici, ma inferiori alle soglie di induzione dell'extrasistole e della fibrillazione ventricolare.

Le correnti prodotte dai campi gradiente sono inferiori ai valori fisiologici.

Il calcolo teorico effettuato mostra che per un tomografo a 5T, la massima corrente indotta a livello di nodosenoatriale è superiore alla soglia di induzione di extrasistole.

Per tomografi superiori ai 13T la massima corrente indotta è comparabile con la soglia di induzione di fibrillazione ventricolare.

Next steps

Verifica degli effetti del campo magnetico statico e gradiente su onda P e onda T

Verifica di assenza di effetti sul complesso QRS

Miglioramento del modello con introduzione degli effetti dovuti al ciclo sistole/diastole

Analisi teorica delle correnti indotte a nodo senoatriale e nodo atrioventricolare per tomografi con B nominale compreso tra 1 e 20 T

Studio degli effetti di queste estracorrenti sul funzionamento dei cardiomiociti

Bibliografia e riferimenti

Simona Valbonesi, Francesca Graziosi, Ermanno Papotti, Francesco Saverio Violante
-"*Procedures for measurement and evaluation of EMF occupational exposure in MR environments*" -
-Presentato come presentazione orale a "*IOHA 2010 - Roma - International Occupational Hygiene Association*" – Roma, 2010

Simona Valbonesi, Marina Barbiroli, Mario Frullone, Francesca Graziosi, Ermanno Papotti and Francesco Saverio Violante "*Occupational exposure assessment to static magnetic field in MRI environment*" - Presentato come full speech al "32nd BEMS Annual Meeting" - Seoul (Korea), 2010

Simona Valbonesi, Marina Barbiroli, Mario Frullone, Francesca Graziosi, Ermanno Papotti and Francesco Saverio Violante – "*Occupational exposure to 1.5 T static magnetic field in MRI environment*" - Presentato come full speech al Convegno "EMF Bordeaux Event" organizzato dalla URSI Commission K – Bordeaux, 2010

Simona Valbonesi, Marina Barbiroli, Mario Frullone, Francesca Graziosi, Ermanno Papotti and Francesco Saverio Violante – "*Occupational exposure assessment of non-sinusoidal pulsed gradient magnetic fields in MRI environment* " Presentato come poster al Convegno "EMF Bordeaux Event" organizzato dalla URSI Commission K – Bordeaux, 2010

Simona Valbonesi, Marina Barbiroli, Mario Frullone, Ermanno Papotti, Andrea Vanore – "*Currents induced by body and arm movements in a 3T MRI static magnetic field" - Presentato come full speech a* "ISEF 2011 – XV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering" – Funchal, 2011

Simona Valbonesi, Marina Barbiroli, Mario Frullone, Ermanno Papotti, Andrea Vanore - "*Currents induced by standard movements in a 3T static magnetic field*" – Pubblicato sulla rivista internazionale ELECTRICAL REVIEW Journal, 2012

Danilo Mureddu, Simona Valbonesi, Ermanno Papotti, Andrea Vanore,Marina Barbiroli, Silvano Filice "*Currents induced in the heart by stationing in or near a 3T MRI scanner*" – *Ital. J. Occup. Environ. Hyg.*, Vol. 4(**2**), April 2013, 52 - 59

Grazie per l’attenzione!!

Riferimento:

svalbonesi@elettra2000.it