

Indicazioni operative per la valutazione del rischio all'esposizione professionale ai campi magnetici statici nella risonanza magnetica ad alto campo

R.Milani*, S.Coda*, G. Baccani*, Francesco Campanella, Massimo Mattozzi** e Paolo Ferrari*****

* Liberi professionisti - Fisici Medici ed Esperti Responsabili in RM

** Dipartimento Igiene del Lavoro – ISPESL

*** Centro Interdipartimentale Mente e Cervello - Università degli studi di Trento

INTRODUZIONE

Nell'aprile del 2004, il Parlamento Europeo ed il Consiglio hanno adottato una direttiva sull'esposizione occupazionale ai campi elettromagnetici. Conosciuta come Direttiva 2004/40/CE¹ (Campi elettromagnetici - EMF), è una delle quattro direttive relative al rischio dovuto all'esposizione agli agenti fisici sui luoghi di lavoro; le altre riguardano il rumore acustico, le vibrazioni e le radiazioni ottiche artificiali. Come conseguenza, tutti gli stati membri dell'Unione Europea avevano l'obbligo di recepire la direttiva entro il 30 aprile 2008.

La Direttiva stabilisce i limiti per l'esposizione dei lavoratori alle EMF nel *range* 0-300 GHz espressi in termini di densità di corrente indotta nel tessuto corporeo alle basse frequenze (fino a 100 kHz) e di rateo di assorbimento specifico (SAR) alle radio frequenze. Questi limiti non devono chiaramente essere superati in alcuna circostanza. Essendo i Limiti di Esposizione delle grandezze di difficile misurazione, la Direttiva indica i livelli soglia pratico-operativi definiti "*valori di azione*". Il rispetto dei valori di azione assicura il non superamento dei limiti di esposizione. I limiti della Direttiva sono derivati dalle linee guida pubblicate alcuni anni fa dalla Commissione Internazionale sulla Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP)², identificando i valori limite di esposizione della Direttiva con le "restrizioni di base" dell'ICNIRP ed i livelli di azione della Direttiva con i "livelli di riferimento" dell'ICNIRP. Sebbene la Direttiva presenti questi limiti come soglie per "conosciuti effetti a breve termine", essi sono di fatto basati su prudenti interpretazioni ed estrapolazioni di limitati dati scientifici. Un esempio, i valori limite di esposizione applicati nel *range* di frequenze relative alla commutazione dei gradienti (circa 1 kHz) sono estrapolati dagli effetti biologici (non sanitari) osservati nel *range* 20-60 Hz, assumendoli rilevanti fino a 100 kHz. Il 26 Aprile 2008 (4 giorni prima della originale scadenza), una nuova direttiva stabiliva la nuova scadenza al 2012 per il recepimento della Direttiva 2004. Attualmente la Direttiva rimane valida nella sua forma originale ad eccezione della nuova scadenza, entro la quale gli stati membri dovranno recepirla. Sette stati dell'unione hanno recepito la Direttiva prima che fosse annunciato la trasposizione: Slovacchia, Repubblica Ceca, Lituania, Lettonia, Estonia, Austria ed Italia. Alcuni di questi stati si stanno muovendo per revocare la relativa legislazione nazionale.

Il nuovo testo unico sulla sicurezza del lavoro, rappresentato dal D.lgs 81/08, recependo la direttiva Euratom di riferimento, per quanto attiene i campi elettromagnetici, non introduce altresì, per quanto attiene gli altri rischi fisici specifici (rumore, vibrazioni, atmosfere esplosive), novità o cambiamenti

sostanziali, se non l'aggiornamento di alcuni riferimenti normativi. Per quanto attiene i campi elettromagnetici, utilizza un tecnicismo normativo di non immediata comprensione, finalizzato al rinvio dell'applicazione delle relative disposizioni. Infatti, se da un lato l'articolo 212, contenuto nel capo IV del Titolo VIII, stabilisce che il settore della risonanza magnetica, in particolare, usufruisce di una proroga di due anni durante i quali il Ministero della Salute dovrà elaborare Linee Guida per l'applicazione dei limiti di esposizione introdotti a tale scenario, dall'altro l'articolo 306 sancisce che le disposizioni di tutto il capo IV titolo VIII entreranno in vigore solo alla data limite di recepimento per gli stati membri della Direttiva Euratom di riferimento (Dir 2004/40) che, proprio la settimana precedente a quella della pubblicazione del Testo Unico in Gazzetta Ufficiale, è stata procrastinata al 30 aprile 2012.

SCOPO DEL LAVORO

In virtù del quadro normativo sopra introdotto, il presente lavoro non vuole definire, ma solo ipotizzare un ragionevole percorso di valutazione del rischio per i lavoratori, che si basi sui nuovi limiti previsti dal D.lgs 81/08, e che prenda in esame lo scenario della Risonanza Magnetica ad alto campo. In particolare, si ritiene che, all'interno di tale valutazione, debbano essere valutate le interazioni tra operatore e campo magnetico nelle varie condizioni di lavoro, in modo da correlarle con i limiti di esposizione. Tutto ciò è propedeutico a identificare, se del caso, accorgimenti e misure di cautela, che modifichino il comportamento degli operatori al fine di una opportuna riduzione del livello di rischio.

METODI

Sebbene non vi siano valori limite di esposizione per i campi magnetici nel nuovo D.lgs 81/08, le persone in temporaneo movimento all'interno del campo magnetico statico di uno scanner, risentono di un campo variabile e quindi di correnti indotte nel corpo che possono determinare il superamento dei valori limite d'esposizione alle frequenze estremamente basse. I livelli di esposizione sono riportati nella tabella dell'allegato XXXVI del D.lgs. 81/08. In questa tabella, per specificare i valori limiti di esposizione a seconda della frequenza dei campi elettromagnetici, sono utilizzate diverse grandezze fisiche. Kännälä⁴, in una recente pubblicazione, evidenzia come le frequenze estremamente basse siano le principali componenti della radiazione indotta dal moto del corpo nel campo magnetico statico. In figura 1

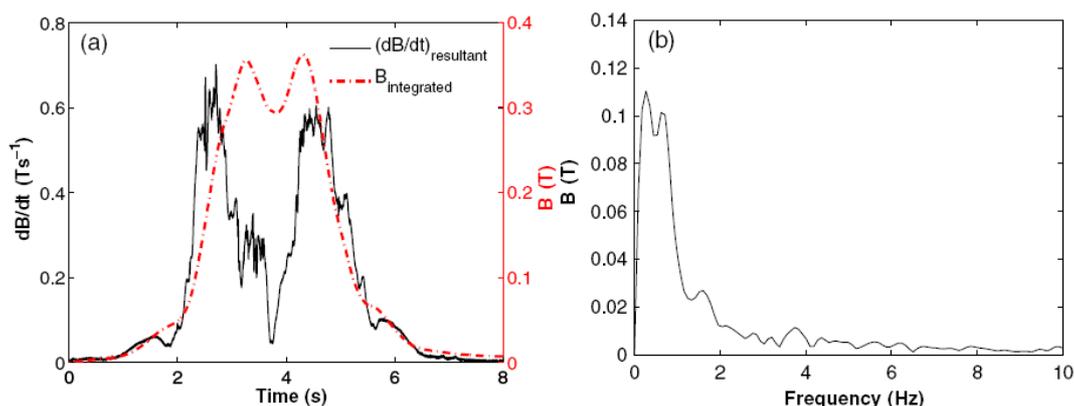


Figura 1: (a) $\frac{dB}{dt}$ and B integrato da $\frac{dB}{dt}$ durante il posizionamento nelle vicinanze di uno scanner MRI da 1T. (b) Il corrispondente spettro⁴. 2

Kännälä mostra come il contributo spettrale della radiazione indotta sia prevalentemente sotto 1 Hz. Per questo motivo nel presente lavoro abbiamo considerato unicamente il limite di 40 mA/m² corrispondente al limite per radiazioni di frequenza inferiore ad 1 Hz.

Il D.lgs 81/08, come detto, esige una valutazione dei rischi cui sono sottoposti i lavoratori. Già il D.M. 02-08-91⁵ sottolineava il rischio di un operatore soggetto ad un campo statico, imponendo precisi limiti temporali di permanenza ad una determinata intensità B (tabella 1):

Parte esposta	Intensità di campo	Durata max esposizione
Corpo	200mT	1 h/g
Corpo	2T	15 min/g
Arti	2T	1 h/g
Arti	4T	15 min/g

Tabella 1: Limiti espositivi al campo magnetico statico secondo D.M. 01-08-91

Dai limiti di legge del D.M. 02-08-91 si può ricavare il tempo massimo di permanenza di un operatore ad una data intensità di campo B, per le operazioni di posizionamento, centratura ecc. e, di conseguenza, il numero massimo di pazienti, ovvero, il massimo carico di lavoro per operatore. L'operatore, però, non è solo sottoposto al campo statico, ma anche alle correnti indotte che si vengono a creare quando si sposta nella sala magnete dove è presente il gradiente di B. Il corpo umano è un conduttore elettrico con una sua resistività elettrica R, che varia leggermente da tessuto a tessuto. Una variazione di campo magnetico, in un sistema dotato di cariche, genera una forza che determina un moto delle cariche elettriche, quindi, un campo elettrico. Il concetto è espresso dalla nota terza equazione di Maxwell:

$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt} = E \quad (1)$$

B=induzione magnetica
 t=tempo
 E=volt/m

Questa relazione ci dice semplicemente che in un sistema, in cui l'intensità di campo magnetico varia, (ad esempio, di 1 Tesla nel tempo di 1 secondo), si crea un campo elettrico di 1 V/m. Sia che vari il campo rispetto alla posizione dell'operatore o che vari la posizione dell'operatore rispetto al campo, le cose non cambiano. Siamo sempre in presenza di un dB/dt. Un operatore che si muove in un gradiente di campo B è soggetto ad un campo E proporzionale alla variazione di B in rapporto al tempo. Così come formulata, dB/dt è di complessa applicazione per la difficoltà di calcolare contemporaneamente, in maniera puntiforme, la correlazione di dB e dt. Molti ricercatori stanno cercando di mettere a punto un sistema elettronico in grado di rilevare le variazioni di B in funzione di t con una frequenza di campionamento accettabile. Le difficoltà, tuttavia, non sono poche, sia per le interferenze di dB/dt con il circuito stesso, sia perché la legge varia il limite in funzione della frequenza. Il campo elettrico generato in un operatore che si muove in un campo B equivale ad

un campo elettrico variabile indotto da un campo magnetico variabile in un operatore fermo che funge da antenna, ma questo implica una frequenza e di conseguenza una variazione del limite di accettabilità, quindi il sistema dovrebbe essere in grado di misurare contemporaneamente sia \mathbf{E} che \mathbf{f} .

Da un punto di vista matematico possiamo riformulare la (1) in modo più semplice e semplificare il problema:

$$E = \frac{dB}{dz} * \frac{dz}{dt}$$

dove dB/dz non è altro che il gradiente dell'intensità di campo magnetico lungo la direzione \mathbf{z} dello spazio (dato facilmente misurabile con un Gaussmetro), mentre dx/dt non è altro che la velocità \mathbf{v} di spostamento lungo la direzione \mathbf{z} di B . Quindi si ottiene che:

$$E = \frac{dB}{dz} * v_z \quad (2)$$

anzi, se vogliamo essere precisi (e complicarci un po' la vita), possiamo scrivere:

$$E = \frac{\partial B}{\partial x} * v_x + \frac{\partial B}{\partial y} * v_y + \frac{\partial B}{\partial z} * v_z$$

E (V/m) è espressa come somma dei gradienti nelle tre direzioni per le rispettive velocità di moto. L'andamento di B nelle direzioni fondamentali \mathbf{Z} o \mathbf{X} può essere ben interpolato, utilizzando un fitting dei dati sperimentali, con un'equazione del tipo

$$B_{z,x} = B_{\max} e^{f(z,x)} \quad (3)$$

Dove B_{\max} = massimo valore dell'intensità del campo magnetico nell'intervallo misurato

Analisi lungo gli assi \mathbf{Z} e \mathbf{X}

Applicando la (3) alla (2) si ottiene:

$$\frac{dB}{d(z,x)} = B_{\max} e^{f(z,x)} f'(z,x) v_{(z,x)}$$

dalla quale risulta che il campo elettrico generato lungo l'asse \mathbf{Z} sarà:

$$E_z = \frac{dB}{dz} * \frac{dz}{dt} = B_{\max} e^{f(z)} * f'(z) * v_z \quad (4)$$

dove v_z è la velocità dell'operatore lungo la direzione \mathbf{z} . In maniera del tutto analoga si può calcolare il campo elettrico lungo la direzione \mathbf{x} .

La grandezza che maggiormente interessa il D.lgs. 81/08 alle basse frequenze, è la densità di corrente J [A/m^2] legata al campo elettrico E dalla conduttività del tessuti con la relazione:

$$(J = \sigma E_{z,x}) \quad (7)$$

dove σ è la conduttività del tessuto ed E [Vm^{-1}] il campo elettrico. La resistività (ρ) e la conduttività (σ) di un materiale sono rispettivamente definite come:

$$\rho = \frac{RS}{l} \quad [\Omega m] \quad \sigma = \frac{l}{RS} \quad [Sm^{-1}]$$

dove:

\mathbf{R} =resistenza elettrica di un campione specifico [Ω];

\mathbf{S} = area della sezione del campione perpendicolare alla direzione della corrente [m^2]

l = distanza tra i punti tra i quali è misurata la tensione [m]

Da tutto questo ne consegue che:

$$J = E \frac{l}{RS} \quad [A/m^2] \quad (8)$$

Le cariche che si muovono all'interno dei tessuti incontrano resistenze elettriche diverse a seconda della tipologia di tessuto e i dati della letteratura non sono univoci, poiché i fattori che entrano in gioco sono moltissimi. In linea generale, però, la resistività elettrica dei tessuti oscilla intorno ai 3÷6 Ωm (in figura 2, tabella di riferimento della resistività misurata per la materia grigia e bianca). A tal proposito abbiamo optato per un valore più restrittivo mediato sui valori di resistività dell'encefalo; 3,5 Ωm .

Table 1. Resistivity values for nine measured subjects.

	Patient no.									Ave.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
White matter averages										
(Ωm)	3.61	4.62		3.26		4.77		3.31		3.91
Number of measurements	3	2		2		1		13		
Standard deviation	1.25	0.28		0.34		0		0.42		
Grey matter averages										
(Ωm)	1.94	5.41	2.13	4.07	4.16		5.01	2.69	2.64	3.51
Number of measurements	1	4	3	11	1		3	6	3	
Standard deviation	0	0.67	0.66	1.58	0		0.74	0.46	0.09	

Figura 2: Tabella della resistività della materia grigia e bianca misurata da Latikka⁶ su nove soggetti.

Sperimentalmente sono stati misurati i valori di B dal centro del magnete lungo l'asse **z**. Come si può vedere dalla figura 4 e dal relativo grafico, la differenza percentuale (diff%) tra dati sperimentali e calcolati non supera, in modulo, il 4,2%. Lo stesso procedimento è stato utilizzato per ottenere i parametri del gradiente

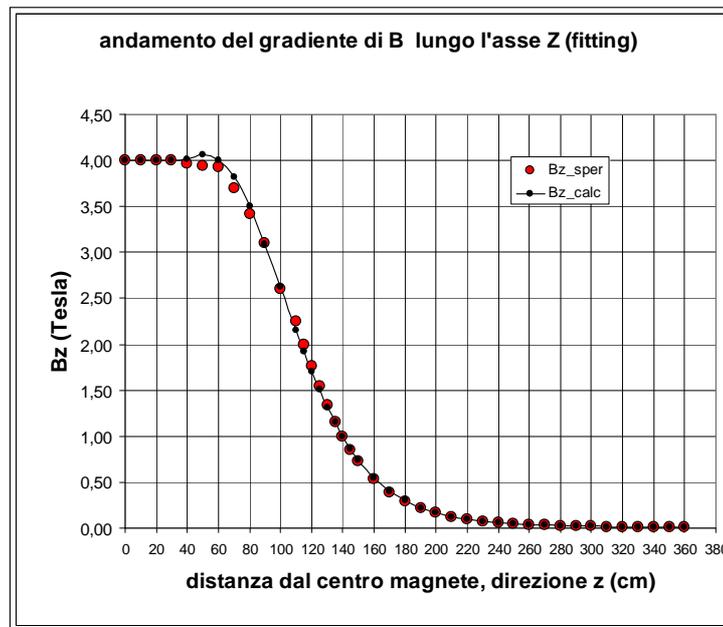


Figura 4: Fitting dei dati sperimentali di B lungo la direzione Z e andamento della curva dei dati calcolati con la relazione (8a). Lo scarto massimo è del 4,2% sul gradiente più ripido.

lungo la direzione **x**, ortogonale alla **z**, a partire dalla posizione $z=40$ cm dalla bocca del gantry ($z=180$ cm dal centro del magnete), che noi abbiamo supposto essere quella abituale dell'operatore vicino alla macchina.

$$B_x = B_{x\max} e^{f(x)} \quad (9a)$$

$$E_x = B_{x\max} e^{f(x)} f'(x) * v_x \quad (9b)$$

Anche in questo caso, sono stati misurati sperimentalmente i valori di B, a partire dal punto $z=180$ cm dal centro del magnete, lungo la direzione X ortogonale a Z (40 cm dalla bocca del gantry). Come si può vedere dalla figura 5 e dal relativo grafico, la differenza percentuale (diff%) tra dati sperimentali e calcolati non supera, in modulo, il 3,6%.

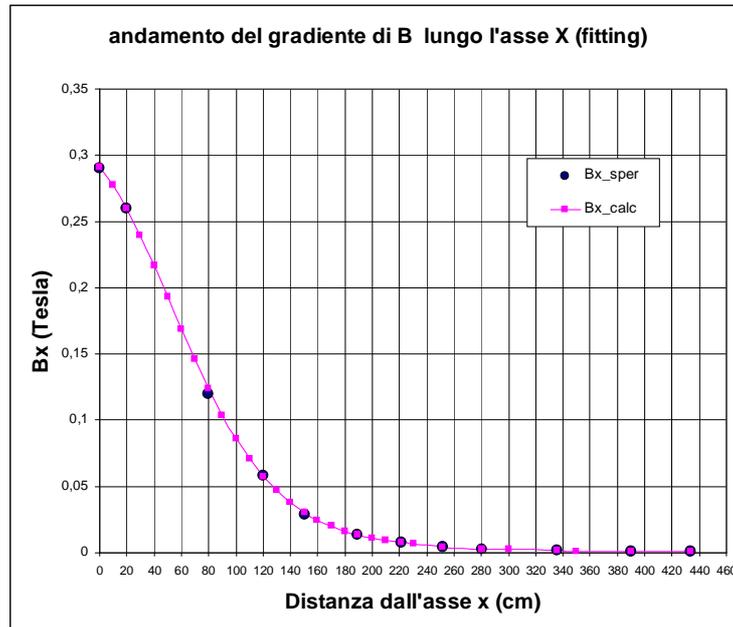


Figura 5: Fitting dei dati sperimentali di B lungo la direzione X a partire dal punto $z=40\text{cm}$ dal centro del magnete. Andamento della curva dei dati calcolati con la relazione (9a). Lo scarto massimo è del 3,6%.

IPOTESI DI LAVORO IN CONDIZIONI REALI

Nell'analisi di un rischio lavorativo, oltre ai modelli matematici, bisogna definire i confini operativi nel cui ambito si svolge l'attività. In altre parole bisogna definire gli scenari che si creano abitualmente o si possono creare occasionalmente. Mentre i primi fanno parte della routine quotidiana, i secondi, proprio perché eventi eccezionali, devono essere visti come tali e pesati in ragione di quella che è la probabilità di accadere, che certamente varia da situazione a situazione.

Per comprendere a pieno il comportamento di un operatore, soprattutto nella fase di allontanamento e avvicinamento rispetto al "tavolo-paziente", abbiamo effettuato alcune riprese per cercare di osservare il moto sperimentalmente e ottenere una modellizzazione del fenomeno in grado di fornirci uno strumento utile alla valutazione del rischio per l'operatore in termini di superamento dei valori limite di densità di corrente indotta dal moto nel campo magnetico.

OSSERVAZIONE SPERIMENTALE

Di seguito riportiamo alcuni fotogrammi (figura 6 e figura 8) delle riprese video, effettuate durante la fase di avvicinamento e di allontanamento, dalle quali sono state ricavate le curve sperimentali del moto dell'operatore.

Avvicinamento

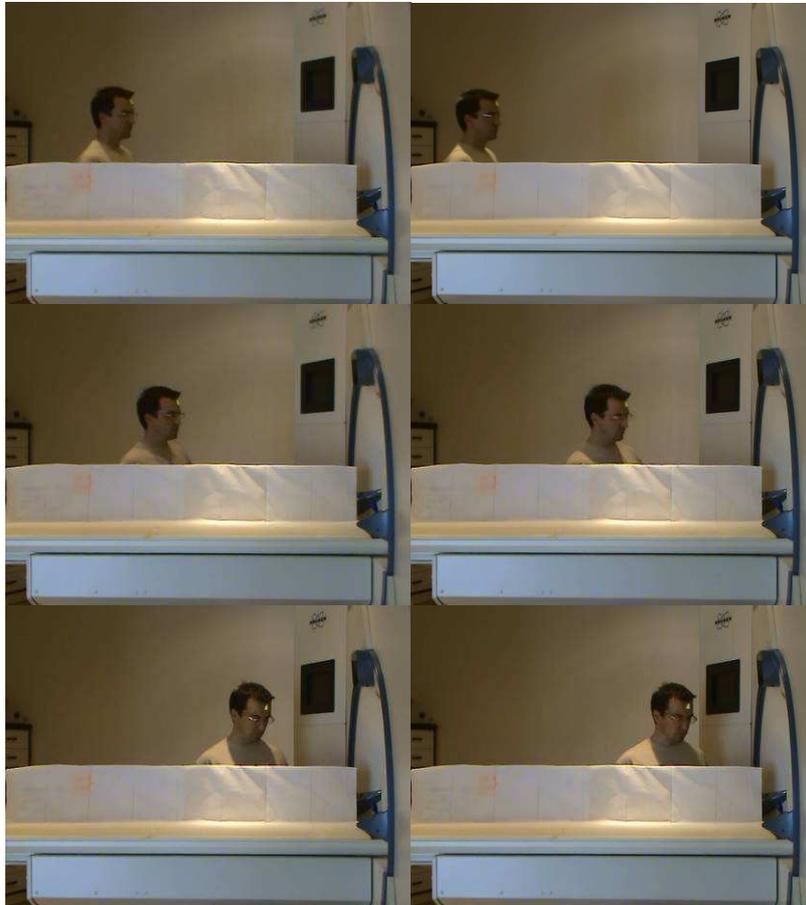


Figura 6: Sequenza del moto di avvicinamento alla console del magnete ripresa mediante telecamera.

Mediante il software di elaborazione grafica Image J⁷ sono state ricavate, fotogramma per fotogramma a 25fps (e quindi ad istanti di tempo noti), i dati del moto di un reperi posto sulla fronte dell'operatore. Da questi dati è stato possibile ricavare i due grafici che seguono: spazio(tempo) e velocità(spazio).

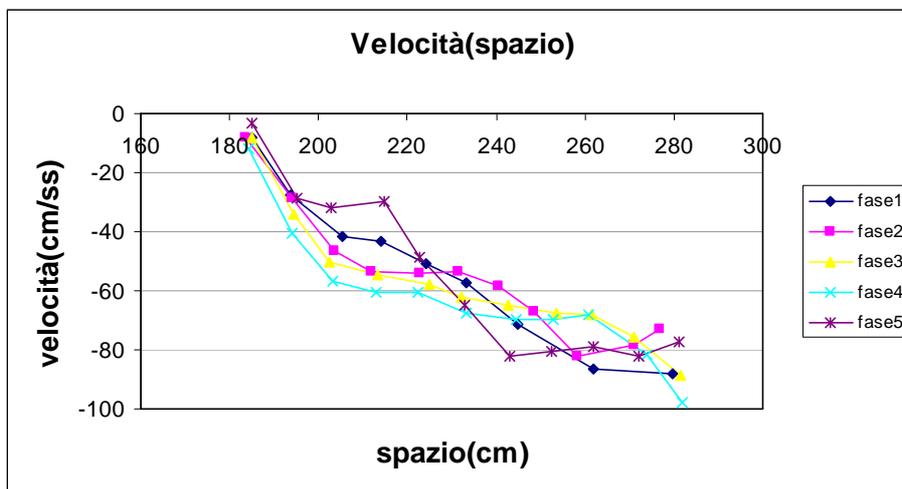
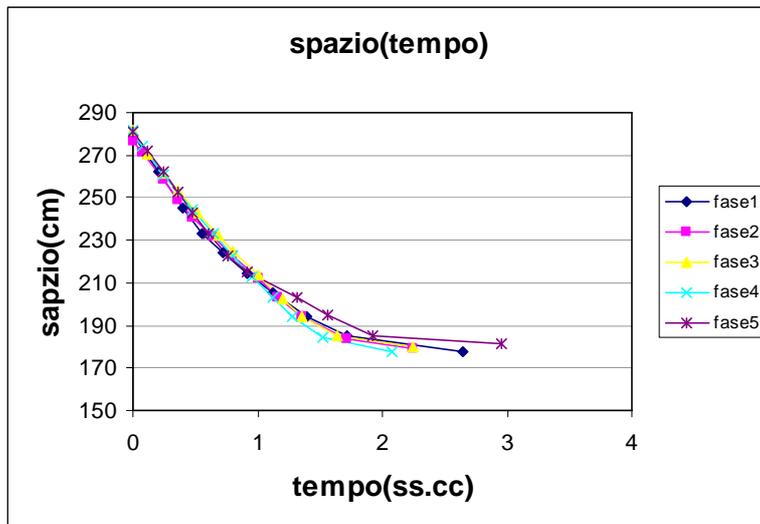


Figura 7: Grafici del moto di avvicinamento, spazio(tempo) e velocità(tempo).

Nelle figura 7 si osserva come il moto di traslazione subisca in prossimità del magnete una decelerazione con andamento quasi lineare nel grafico velocità(tempo). Le misure sono riferite a 5 casi diversi.

Allontanamento

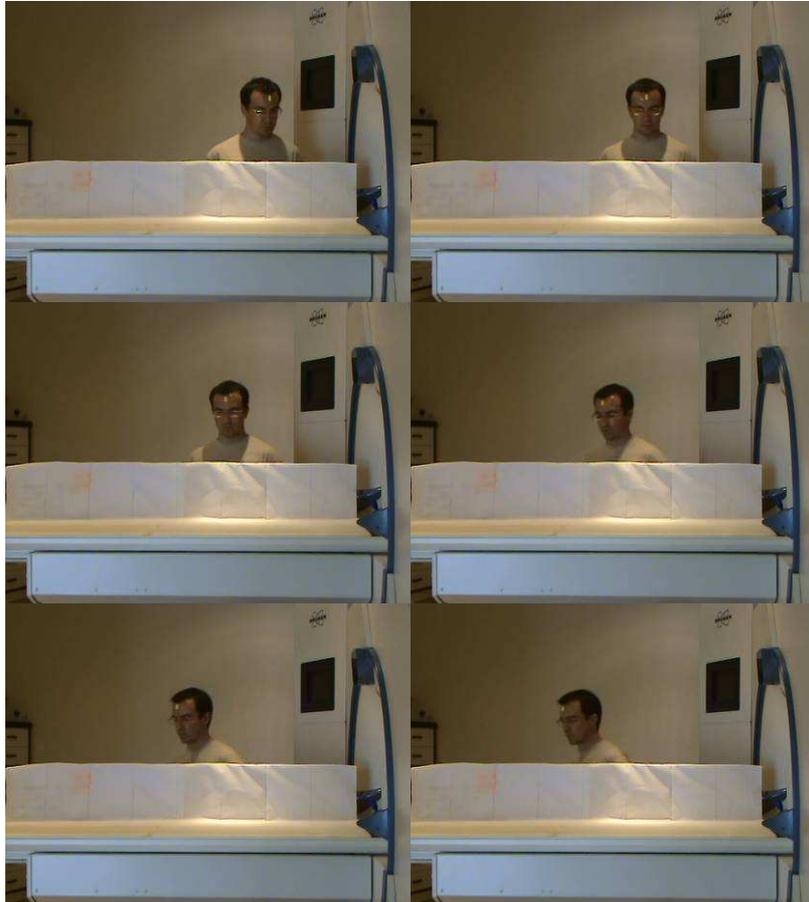


Figura 8: Sequenza del moto di avvicinamento alla console del magnete ripresa mediante telecamera.

Nei due grafici che seguono di figura 9, sono riportati lo spazio(tempo) e la velocità(spazio) nel caso dell'allontanamento.

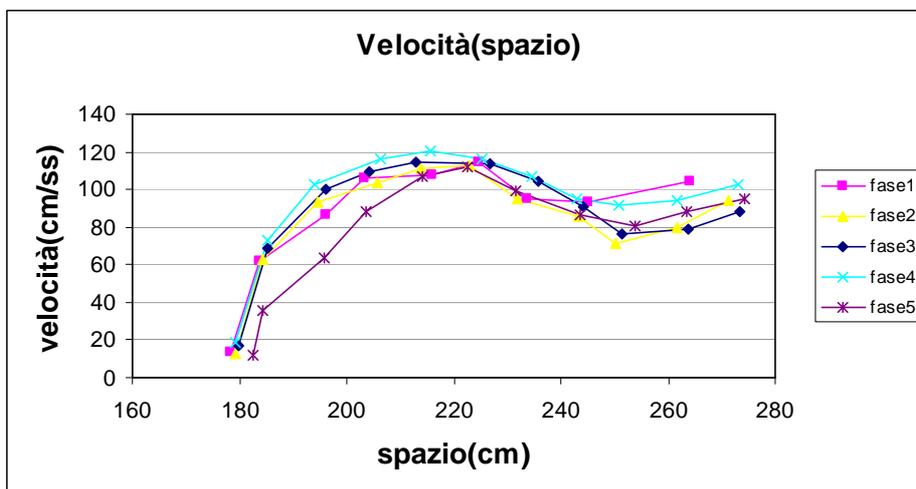
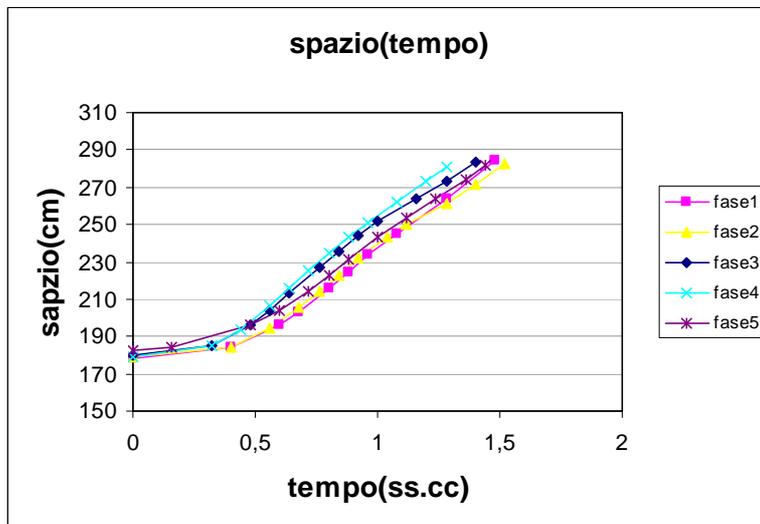


Figura 9: Grafici del moto di avvicinamento, spazio(tempo) e velocità(tempo).

Si osserva come durante l'allontanamento il moto risulta essere di tipo roto-traslazionale. All'accelerazione del moto di allontanamento va anche aggiunta la componente di rotazione (ben visibile nel capo del soggetto in movimento). L'effetto finale è ben evidenziato nel grafico della velocità(spazio), in cui le velocità massime sono raggiunte a breve distanza dal magnete con valori anche di 100 cm/sec.

Questa osservazione sperimentale ci ha permesso, quindi, di definire un approccio teorico (ma realistico) del problema moto e densità di corrente indotta. Il best fit dei moti ci ha consentito di modellizzare il moto e di utilizzare lo stesso per il calcolo delle densità di corrente indotte durante il moto stesso.

OSSERVAZIONE TEORICA

Nella routine quotidiana si possono riassumere i seguenti casi:

- L'operatore addetto ad una risonanza magnetica, generalmente, non si trova mai nella posizione a ridosso dell'imboccatura del *gantry*. Considerare ordinaria questa posizione significa, infatti, supporre che il tecnico lavori a ridosso del *gantry* della macchina. Abbiamo verificato che, nella prassi quotidiana, l'operatore si trova tra i 40 e i 50 cm dalla bocca del *gantry*, poiché, diversamente, non potrebbe manovrare sulla pulsantiera posta sulla facciata della macchina. Riteniamo plausibile, in via ordinaria, assumere una distanza dal *gantry* di 40 cm.
- Quando l'operatore si allontana dalla posizione di manovra, cioè dalla posizione operativa vicina al *gantry*, la sua velocità è inizialmente $v=0$ m/s. Essa aumenta gradualmente fino ad una velocità media, a regime, che si aggira intorno agli 80 cm/s, mantenendosi poi costante. Raramente viene raggiunta una $v=1$ m/s (4 km/h).
- L'uomo, come si suole dire, "*cammina per caduta*", cioè sposta il baricentro in avanti e ricade sul piede spostato in avanti per contrastarla. Tutto questo determina una accelerazione progressiva che lo porta a raggiungere la velocità di regime (80 cm/s) dopo un tratto iniziale di circa 1,5-2 passi, (cioè a circa 1m dalla posizione iniziale). Questo fatto genera un tratto iniziale di accelerazione cui segue un moto a velocità costante.

Traducendo in formule quanto detto sopra, si avrà che la velocità lungo x;z (asse x o asse z) è definita dalle seguenti equazioni :

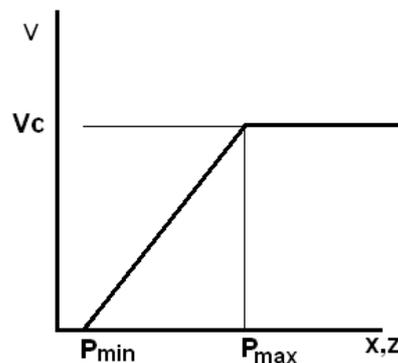


Figura 10: Andamento del moto dell'operatore, accelerato del tratto $P_{min} < (x,z) < P_{max}$ uniforme per $(x,z) > P_{max}$.

$$v_{[z;x]} = (v_c / (p_{max} - p_{min})) * ([x;z] - p_{min}) \quad \begin{matrix} p_{min} \leq [z;x] \leq p_{max} & [\text{cm/s}] \\ [x;z] \geq p_{max} & [\text{cm/s}] \end{matrix} \quad (10)$$

dove: v_c = velocità di crociera costante
 p_{min} = distanza iniziale del moto accelerato
 p_{max} = distanza finale di accelerazione

Questo andamento è stato riportato in figura 10 lungo la direzione X,Z. Tale tipo di accelerazione iniziale, assimilato ad un segmento variamente inclinato, è in realtà la semplificazione di un andamento sigmoide, come abbiamo visto dall'osservazione sperimentale. Anche in questo caso, tuttavia, i risultati non si discosterebbero da quanto abbiamo calcolato con l'approssimazione rettilinea. Volendo calcolare l'accelerazione che interviene di volta in volta (ad es. lungo la direzione x) è sufficiente considerare :

$$V = f(x) \quad \frac{dV}{dx} = f'(x) = \frac{dV}{dt} * \frac{1}{\frac{dx}{dt}} = acc * \frac{1}{V} \quad \text{ovvero:} \quad acc = f(x) * f'(x) \quad (10b)$$

Analizzeremo di seguito il moto, scomponendo i contributi lungo la direzione z, lungo la direzione x e la componente rotatoria.

Moto lungo la direzione Z

Come abbiamo visto precedentemente, una persona che si muove nel gradiente di campo magnetico, generato da una macchina da 4T, lungo la direzione **Z** e con una velocità data dalla relazione (10), è soggetta ad un campo elettrico **E_z** dato dalle relazioni (8a) (8b), ovvero:

$$E_z = B_{\max} * e^{f(z)} * f'(z_1) * v_z. \quad (11)$$

Considerando che

$$J_z = \sigma E_z \quad \text{con } \sigma=1/\rho \text{ e con l'ipotesi } \rho=3,5 \Omega\text{m}$$

otteniamo:

$$J_z = \frac{1}{\rho} B_{\max} * e^{f(z)} * f'(z) * v_z \quad (12)$$

Con le considerazioni di cui sopra, applicando le relazioni (11) e (12) abbiamo ottenuto le condizioni di rischio, riportate in figura 11 nelle quali si trova un operatore che abbiamo ipotizzato muoversi lungo la direzione Z, dalla posizione z=140cm dal centro magnete (condizione limite a ridosso del *gantry*), con moto accelerato nel tratto iniziale di 1m e velocità costante di 80 cm/s nel rimanente.

Come si può notare, queste condizioni geometriche e di moto portano ad un deciso superamento dei valori del D.lgs 81/08 del 112%, oltre il doppio dei valori consentiti, con un valore massimo di $J_z=84,9 \text{ mA/m}^2$. Certamente non è molto, se si

pensa che parliamo di un magnete da 4T e di condizioni operative non usuali, comunque il valore limite è superato e bisogna riconsiderare le condizioni operative che hanno portato a tale superamento e trovare quelle condizioni che permettano di

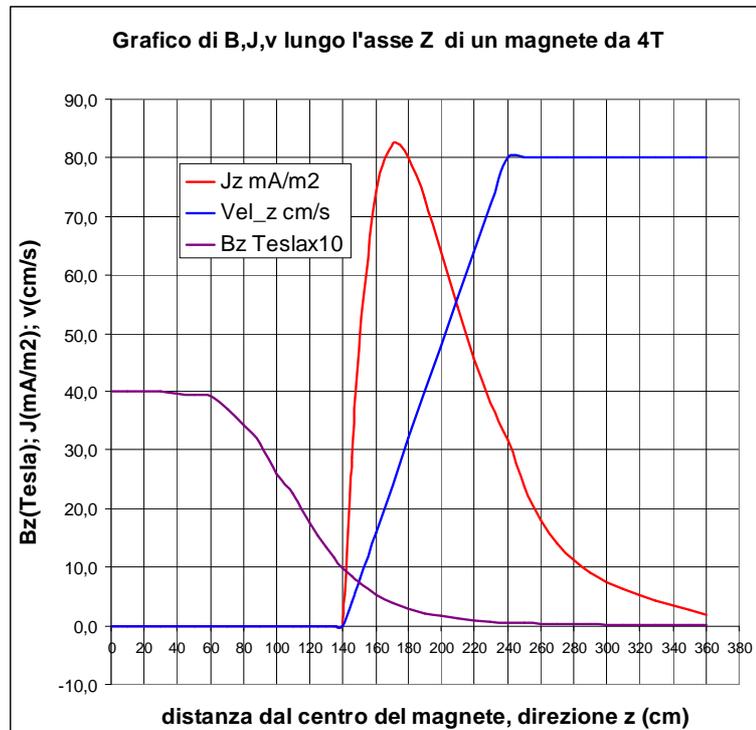


Figura 11: Andamento dei parametri J, v, B di un operatore che si muove a partire da 140 cm dal centro magnete (a ridosso del gantry) lungo la direzione Z. La velocità cresce linearmente con $v=0$ nella posizione iniziale $z=140$ fino a $v=80$ cm/s alla posizione $z=240$, cioè dopo avere percorso 1m (NB: Nella figura, il valore di B è espresso, per ragioni di visibilità, in Tesla x 10).

rimanere entro i limiti consentiti, effettuare la debita formazione/informazione del personale e verificare l'applicazione di quanto disposto.

Misure di riduzione del rischio

Se prendiamo in considerazione le ipotesi fatte in precedenza, cioè che un operatore effettui la sua attività di centratura paziente e settaggio della macchina stando ad una distanza media di 40-50cm dalla bocca del gantry, cioè a 180-190 cm dal centro del magnete e da questa posizione inizi a muoversi, con un moto accelerato che lo porti dopo 1m a 280-290 cm dal centro del magnete ad una velocità di crociera di 80 cm/s, si nota (figura 12) che la corrente indotta crolla drasticamente ad un massimo di 23 mA/m², cioè di circa la metà del valore limite. Se analizziamo le due situazioni possiamo notare che una posizione spostata di soli 40-50 cm ha determinato una caduta di J da 84,9 a 23,2 mA/m², circa 1/4.

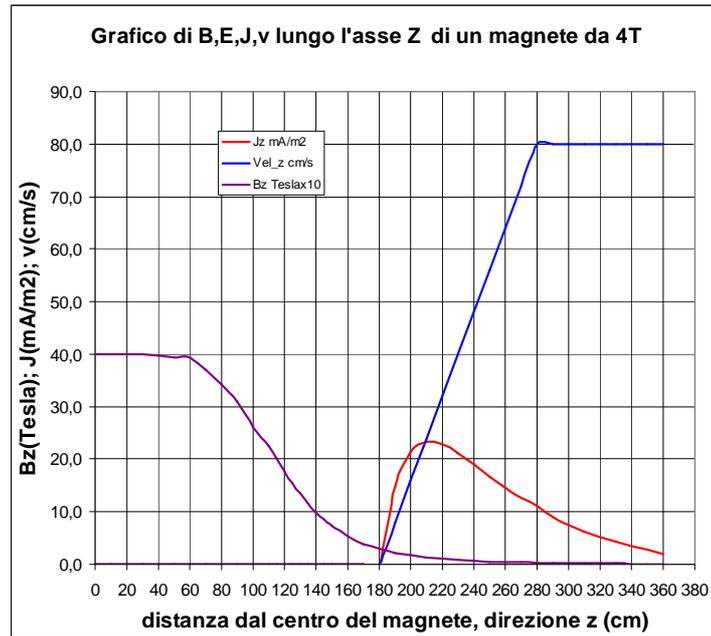


Figura 12: Andamento dei parametri J, v, B di un operatore che si muove a partire da 180 cm dal centro magnete (a 40 cm del gantry) lungo la direzione Z. La velocità cresce linearmente con $v=0$ nella posizione iniziale $z=180$ fino a $v=80$ cm/s alla posizione $z=280$, cioè dopo avere percorso 1m (NB: Nella figura, il valore di B è espresso, per ragioni di visibilità, in Tesla $\times 10$).

Considerato che i parametri che intervengono nel calcolo di J sono la velocità e la distanza iniziale dalla bocca del gantry, possiamo analizzare quali siano le combinazioni dei due che permettono il non superamento dei valori limite allontanandosi dal magnete lungo la direzione Z dell'asse del magnete stesso. Dalla figura 13 possiamo vedere che se vogliamo mantenere una velocità di allontanamento di 80 cm/s non dobbiamo stare a meno di 25 cm dal gantry, cosa del tutto accettabile, mentre, se abbiamo l'esigenza di compiere operazioni che ci portano a 10 cm, la nostra velocità, difficilmente controllabile, deve scendere a 50 cm/s.

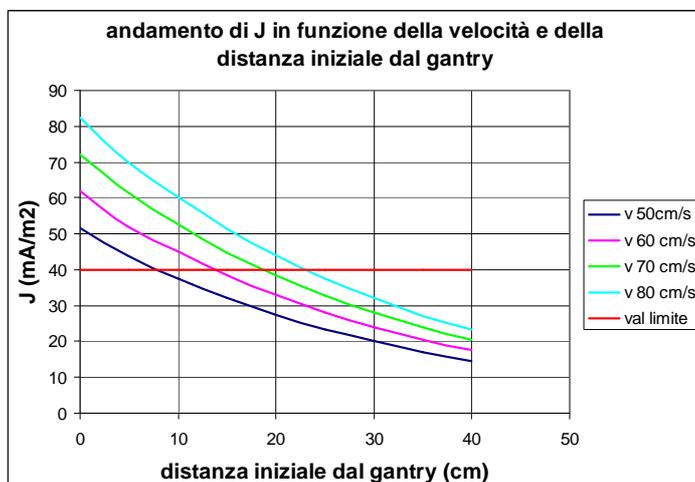


Figura 13: Andamento di J di un operatore che raggiunge varie velocità di crociera nel tratto di 1m a partire da diverse distanze iniziali dal gantry. Come si nota il valore limite di 40 mA/m^2 può essere superato per diverse combinazioni.

Finora abbiamo considerato la condizione di muoverci lungo la direzione Z e più precisamente lungo l'asse Z. Questa considerazione tende ad essere piuttosto cautelativa, considerando che, da un punto di vista bidimensionale, la distribuzione di B presenta un andamento a forma di sella con il dorso sull'asse del gantry. Allontanarci lungo una direzione parallela a quella dell'asse principale del magnete determina senz'altro un gradiente B_z più basso e, quindi, la possibilità di valori di J leggermente inferiori a quelli da noi calcolati.

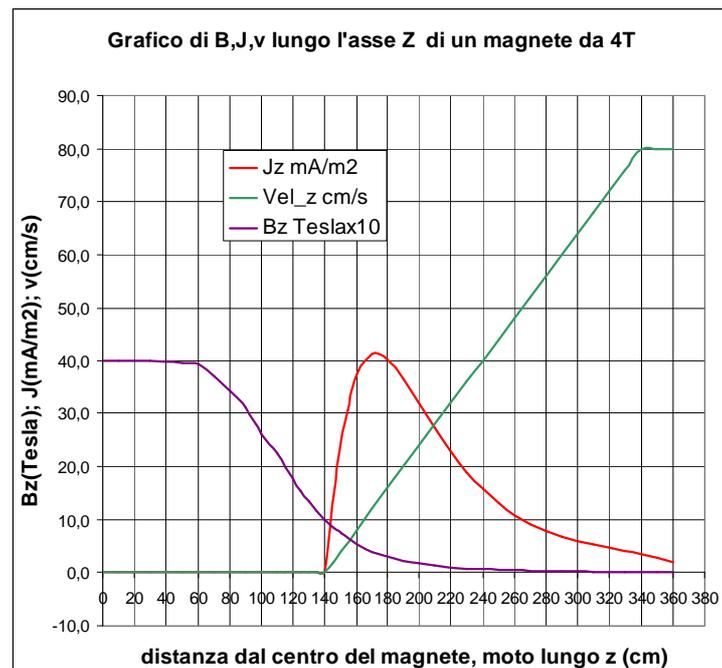


Figura 14: Andamento dei parametri J, v, B di un operatore che si muove a partire da 140 cm dal centro magnete (a ridosso del gantry) lungo la direzione Z. La velocità cresce linearmente con $v=0$ nella posizione iniziale $z=140$ fino a $v=80$ cm/s alla posizione $z=340$, cioè dopo avere percorso 2m (NB. Nella figura, il valore di B è espresso, per ragioni di visibilità, in Tesla x 10).

A questo proposito, tuttavia, bisogna fare due considerazioni: la prima che, trattandosi di sicurezza, non è sconsigliato usare criteri cautelativi e la seconda che, come si può osservare dalla figura 11 il picco di superamento di J si ottiene ad una distanza di circa 35-40 cm dall'inizio del moto, quindi nella fase iniziale dell'accelerazione. Tutto questo ci porta a fare una considerazione operativa molto importante: se l'operatore si muovesse con una velocità crescente, ma tale da fargli raggiungere la velocità di crociera di 80 cm/s non dopo 1m, ma dopo 2m (cioè dopo due passi), anche partendo a ridosso della bocca del gantry il valore di J sarebbe solo di poco superiore al fatidico 40 mA/m² (figura 14).

Moto lungo la direzione X

Analogamente a quanto abbiamo fatto per l'asse Z, possiamo considerare un operatore che si sposta in direzione ortogonale all'asse Z ovvero lungo l'asse X. Il

procedimento è simile. Le equazioni da considerare sono le (9a), (9b) giungendo a delle equazioni perfettamente analoghe alle (11) e (12) con la notazione x al posto di z, ovvero:

$$E_x = B_{\max} * e^{f(x)} * f'(x) * v_x \quad (11b)$$

Anche qui si considera che:

$$J_x = \sigma E_x \quad \text{con } \sigma=1/\rho \quad \text{e con l'ipotesi } \rho=3,5 \Omega\text{m}$$

ottenendo:

$$J_x = \frac{1}{\rho} B_{\max} * e^{f(x)} * f'(x) * v_x \quad (12b)$$

In questa situazione, però, bisogna definire il gradiente di B_x lungo una delle tante direzioni che partono ortogonalmente all'asse Z. Avremo, quindi, un determinato valore di B_{\max} e dei parametri caratteristici del gradiente lungo quella direzione. In pratica, prima di affrontare un'analisi matematica del problema, bisogna affrontare e definire bene il punto da cui parte l'operatore per i suoi spostamenti. Anche in questo caso ci è sembrato plausibile partire da un punto che si trova a 40 cm dalla bocca del *gantry* lungo l'asse Z, misurare sperimentalmente dei punti in direzione X e definire le conseguenti equazioni che caratterizzano il gradiente con il metodo sopra descritto ecc. Considerando la larghezza del lettino della RM e la distanza da questo dell'operatore, abbiamo visto che le coordinate iniziali dell'operatore sono mediamente Z=40 e X=40 (20 cm dall'asse del lettino e 20 di distanza dal suo bordo). Anche in questo caso abbiamo considerato che l'operatore si allontani lungo la direzione X a 80 cm/s partendo da una posizione iniziale X=40 con una velocità che aumenta linearmente per il tratto di un metro, proseguendo poi costante. Come si può vedere dalla figura 15, i valori J non sono elevati, anzi, sono circa la metà del valore limite. Il fatto ha una sua spiegazione logica. Se osserviamo la figura 5, notiamo che il gradiente lungo X è molto più morbido del gradiente lungo Z, considerando che J dipende anche da dB/dx.

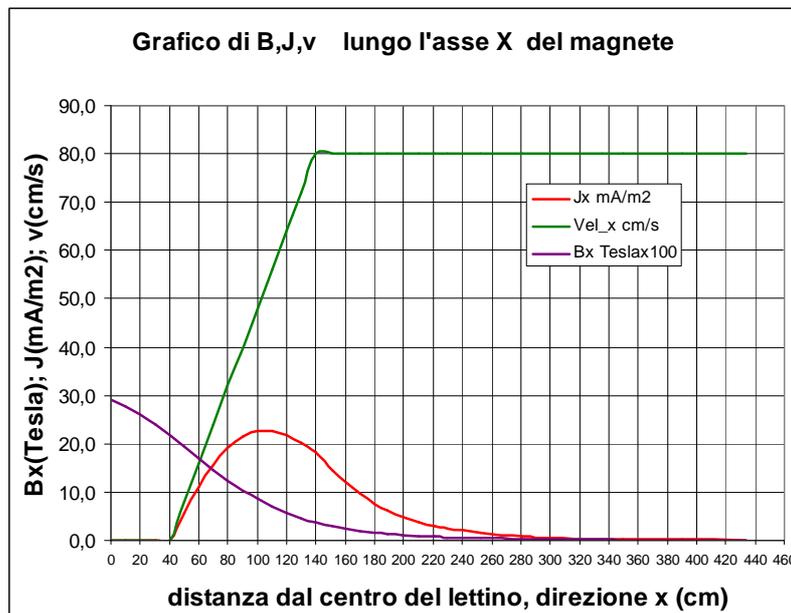


Figura 15: Andamento dei parametri J, v, B di un operatore che si muove a partire da 180 cm dal centro magnete (a 40 del gantry) lungo la direzione Z, a 40 cm dall'asse del lettino, lungo la direzione X ortogonale all'asse Z. La velocità cresce linearmente con $v=0$ nella posizione iniziale $x=40$ fino a $v=80$ cm/s alla posizione $x=140$, cioè dopo avere percorso 1m (NB: Nella figura, il valore di B è espresso, per ragioni di visibilità, in Tesla x 100).

Movimenti rotatori

Come abbiamo rilevato nell'osservazione sperimentale del moto, quando un operatore si accinge ad uscire dalla sala, dopo avere predisposto il paziente o quando deve osservare il pannello di controllo, sottopone il proprio corpo e, quindi, anche la testa ad un movimento di rotazione. Anche in questo caso lo stato iniziale del moto è ovviamente zero, essendo l'operatore fermo. La componente elettrica, dovuta al moto rotatorio, è simile a quella che agisce in una ipotetica spira immersa nel campo magnetico presente in quella precisa posizione spaziale, anzi, possiamo ipotizzare che infinite spire, chiuse ad anello, ruotino e che una sola di queste sia soggetta, per un certo istante, al massimo flusso di B.

Trattandosi di rotazione, possiamo esprimere la relazione classica facendo intervenire l'angolo con la seguente sostituzione :

$$E = \frac{dB}{dt} = \frac{dB}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt}$$

dove: $d\theta/dt$ è la velocità angolare ω , espressa in rad/s, mentre $dB/d\theta$ è la variazione di intensità di campo magnetico B prodotta nella spira in funzione dell'angolo di rotazione.

L'intensità di campo magnetico che si viene a creare, in funzione dell'angolo, è data da:

$$B_{\theta} = B_{x,z} \cos \theta \text{ da cui } dB/d\theta = -B_{x,z} \sin \theta$$

quindi

$$|E| = \frac{dB}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt} = B_{x,z} \sin \theta * \omega \text{ e } |J| = \sigma |E| \quad (13)$$

Il problema del moto rotatorio, assimilabile al moto di una spira, presenta alcune complessità non facili da valutare e formalizzare. La generica spira, rispetto al campo, si trova con un angolo iniziale $\theta + \varphi$ e velocità angolare $\omega = 0$ e terminerà la sua rotazione, effettuata ad una velocità angolare $\omega \neq 0$, dopo un arco di $\theta + \alpha + \varphi$ con $\omega = 0$ (figura 16).

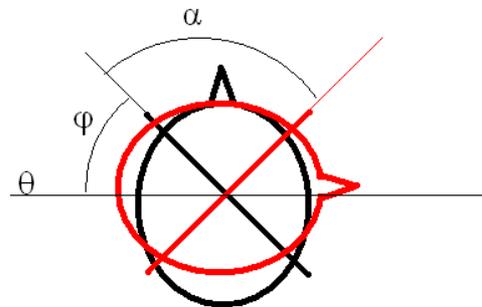


Figura 16: Rotazione della spira da $\theta + \varphi$ a $\theta + \alpha + \varphi$ con velocità angolare ω .

Se iniziamo la rotazione, come logico, con $\theta = 0$, cioè con l'operatore che, dopo aver guardato il paziente disteso ruota il corpo di 90° per iniziare il moto di allontanamento, avremo una fase iniziale della spira che supponiamo essere φ ed una finale $\pi/2 + \varphi$. La scelta di φ non è importante se durante la rotazione la spira apre la sua massima ampiezza al flusso delle linee di campo, perché quello che interessa è il momento di maggior J , ma diventa importante quando dobbiamo trattare angoli stretti, dove una scelta di φ inopportuna potrebbe sottovalutare J . In questa simulazione abbiamo supposto una spira grande di tessuto attraversata dal campo B con un angolo φ rispetto al suo asse di 45° . Quando l'operatore inizia la rotazione, ω cresce, (supponiamo linearmente), per un certo tratto, prosegue a velocità angolare costante ed infine decresce allo stesso modo. L'angolo percorso dalla spira è stato di 90° e, durante questa rotazione, si trova con il proprio asse coassiale a B , cioè apre la sua massima ampiezza al flusso delle linee di campo e con ω massimo, quindi il campo elettrico indotto sarà massimo e di conseguenza anche J . Avremmo potuto iniziare con la spira orientata inizialmente di un angolo qualsiasi, ma il risultato non sarebbe cambiato, poiché tra le infinite spire che possiamo creare nel corpo ve ne sarà sempre e comunque una che, nel tratto $\theta + \Delta\theta$, si orienterà coassialmente a B e con ω massimo, poiché la rotazione totale è di 90° .

Sulla base di questa considerazione possiamo dire che il massimo valore di campo elettrico sarà:

$$E_{\max} = \left| -B_{x,z} * \omega \right| \quad (14)$$

La relazione (13) non fa altro che descrivere la variazione di E in funzione dell'angolo, ma in buona sostanza il valore di picco, per una rotazione di 90°, si troverà sempre per la condizione $\sin \theta=1$, ovviamente.

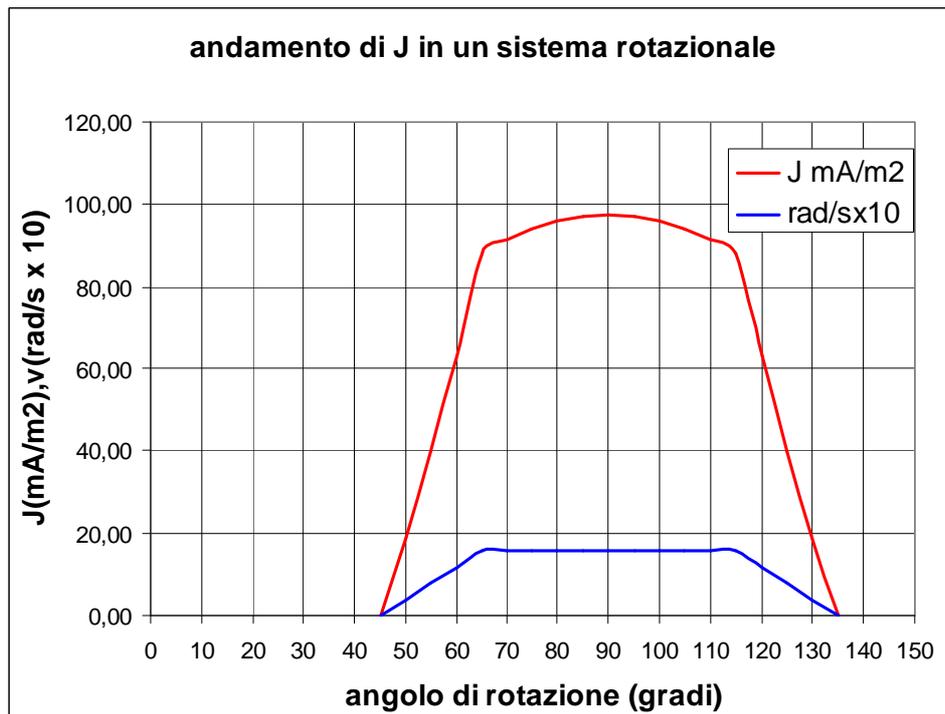


Figura 17: Andamento di J in funzione dell'angolo di rotazione con accelerazione iniziale e decelerazione finale nella simulazione di una spira che ruota in un campo $B=0,217T$ per un angolo di 90° (45°-135°).

Come si può vedere in figura 17, i valori limite di J sono superati di oltre un fattore 2, ma se riduciamo la velocità di rotazione (40°/s) osserviamo immediatamente un rientro di J vicino ai valori limite. Come detto prima, se l'angolo di rotazione non è così stretto da imporci particolari valori di φ , l'ampiezza della rotazione è ininfluente su J.

Combinazione dei moti – moto roto-traslatorio

Come osservato sperimentalmente, il problema maggiore si pone nel caso dell'allontanamento, in quanto l'operatore combina al moto traslatorio accelerato di allontanamento, quello di rotazione di 180°. Cerchiamo, quindi, di modellizzare tale moto e di ottenere una valutazione della densità di corrente indotta. Precedentemente abbiamo considerato una grande spira che ruota e abbiamo analizzato l'andamento di J in funzione di questo. Dal punto di vista della normativa

l'andamento di J è poco importante; quello che importa è non superare il valore di picco. E' più corretto allora considerare un piccolo volume elementare (voxel), soggetto a due velocità: una periferica e una angolare. Consideriamo un sistema combinato di roto-traslazione, cioè il caso reale dell'operatore che, dopo aver posizionato il paziente, ruota di un certo angolo mentre si allontana. All'interno del suo corpo un voxel che si trova alla distanza r dall'asse di rotazione, ruota e trasla. La sua velocità di rotazione V_c è la velocità periferica data dalla relazione:

$$V_c = r \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (15)$$

dove $\Delta\theta$ è l'angolo di rotazione; r è la distanza del volume elementare dall'asse di rotazione e Δt il tempo di rotazione. Se il sistema è dotato anche di una velocità V_z , le due velocità si sommano vettorialmente (figura 18) con il risultato che, da un lato avremo $V_z + V_c$ e dall'altro $V_z - V_c$.

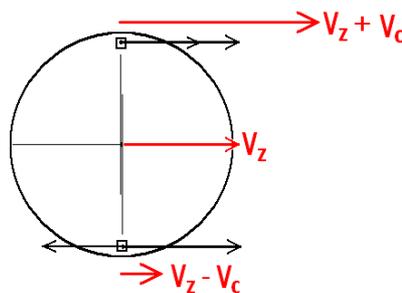


Figura 18: Combinazione della velocità di traslazione e rotazione che agiscono sul voxel alla periferia.

Poiché la normativa prescinde dall'andamento di J, ma chiede solo il non superamento di certi valori, possiamo considerare che la massima velocità totale del volume elementare è data dalla somma delle due: periferica e traslazionale. ⁽¹⁾

La (15) può essere trasformata in:

$$V_c = r \frac{d\theta}{dt} = r \frac{d\theta}{dz} \frac{dz}{dt}$$

dove: $dz/dt = V_z$; $d\theta/dz$ è l'angolo sotteso durante uno spostamento di dz. Consideriamo, come in precedenza, il caso pratico di un operatore che da 20 cm dalla bocca del gantry si allontana lungo la direzione Z con un moto accelerato fino a raggiungere una velocità di 80 cm/s dopo un metro. Nel frattempo l'operatore ruota (ad es il capo) di un angolo di 90°.

¹ NB: in questa approssimazione il volume elementare non è sempre lo stesso, ma è il generico volume che si trova nelle peggiori condizioni

I parametri sono pertanto:

$Z=160$ cm $V_z=0$ cm/s

$Z=260$ cm $V_z=V_{\max}$ (100 cm/s)

$\theta = \pi/2$ nel tratto $\Delta Z=100$ cm

$r=10$ cm (distanza dall'asse del volume elementare)

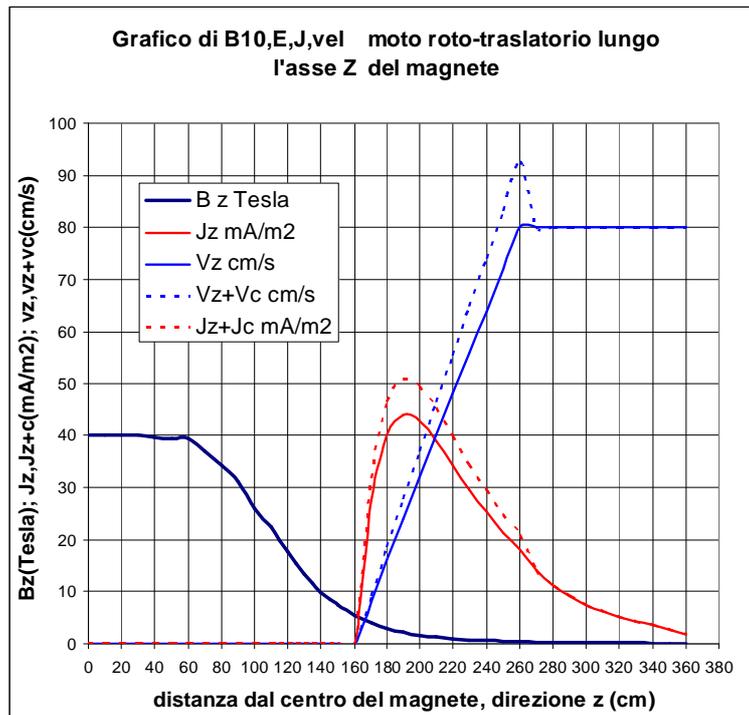


Figura 19: andamento della densità di corrente nel caso della sola componente traslazionale e per la combinazione del moto roto-traslatorio.

In figura 19 vediamo che l'andamento di J raggiunge 44 mA/m^2 per il solo movimento di traslazione e 52 mA/m^2 per la componente aggiuntiva del moto di rotazione. Se l'operatore, come capita in molti casi, ruota di 180° il valore di J arriva a circa 60 mA/m^2 .

CONCLUSIONI

Lo studio proposto ha evidenziato alcuni fondamentali aspetti, che devono essere presi in considerazione per attuare un'attenta, puntuale e mirata valutazione del rischio per i lavoratori che operano nel settore della Risonanza Magnetica a scopo medico. L'applicazione con il D.lgs 81/08 dei limiti espositivi, proposti dalla direttiva europea, se risulteranno confermati (per gli effetti sanitari) dalle nuove direttive ICNIRP, determineranno sicuramente dei limiti operativi per gli operatori del mondo della risonanza. I movimenti di un operatore, immerso in un gradiente di campo magnetico, generano delle correnti indotte che devono essere attentamente valutate.

Nel caso specifico analizzato, ovvero quello di un tomografo ad alto campo (4 T), si è osservato che, sebbene nella pratica quotidiana sembra che vi sia un superamento dei limiti in termini di densità di corrente indotta, i valori di esposizione possono comunque essere ridotti al di sotto di tali limiti nel caso di adozione, da parte degli operatori, di opportune regole di comportamento quali velocità di movimento e tempo di occupazione delle diverse zone di rischio, sulla cui effettiva applicabilità saranno comunque necessari ulteriori approfondimenti. Come per le radiazioni ionizzanti esistono regole che gli addetti ai lavori ben conoscono, quali la distanza, il tempo e le schermature, da valutare attentamente alla luce del tipo di sorgente, tipo di radiazione emessa, attività, geometria ecc., analogamente una macchina RM deve essere caratterizzata per quella che è la distribuzione del gradiente nello spazio circostante, la sua intensità, il suo andamento ecc. Solo così facendo, sarà possibile valutare le condizioni di rischio potenziale nella maniera più corretta, studiando il modo in cui il lavoratore deve svolgere le proprie mansioni, riducendo il livello di rischio e pedissequamente rispettando i valori limite stabiliti dalla legge. Come ormai acclarato dall'intero sistema normativo in materia di sicurezza, una buona strategia di riduzione del rischio non può non partire da una efficace opera di formazione\informazione, dedicata ai lavoratori coinvolti. Nel caso della Risonanza Magnetica è l'Esperto Responsabile la figura professionale che, in considerazione delle problematiche sopra introdotte, nonché per le misure risolutive che al riguardo avrà inteso individuare, risulterà di importanza fortemente strategica per realizzare, anche nel settore della Risonanza Magnetica, gli obiettivi che il D.lgs 81/08 così chiaramente definisce.

BIBLIOGRAFIA

- ¹ Direttiva 2004/04/CE. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea L 159, 30 aprile 2004 ed errata corrige L 184 del 24 maggio 2004.
- ² ICNIRP (1998) Health Physics, 74, 494-522.
- ³ Decreto Legislativo 9 aprile 2008 , n. 81, Gazzetta ufficiale n° 101 del 20 aprile 2008.
- ⁴ S Kännälä, T Toivo, T Alanko and K Jokela, "Occupational exposure measurements of static and pulsed gradient magnetic fields in the vicinity of MRI scanners". Phys. Med. Biol. 54 (2009), 2243–2257.
- ⁵ Decreto Ministeriale 02-08-1991. Gazzetta Ufficiale n°194 del 20 agosto 1991.
- ⁶ J Latikka, T Kuurne and H Eskola, "Conductivity of living intracranial tissues". Phys. Med. Biol. 46 (2001), 1611–1616.
- ⁷ Image J, National Institutes of Health, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij>.