APPLICAZIONE DEL DECRETO LEGISLATIVO 159/2016: VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA MOVIMENTO NELLA PRATICA DI RISONANZA MAGNETICA[1]

R. Milani[1], S. Coda[1], G. Baccani[1], F. Campanella[2], M. Mattozzi[2] e P. Ferrari[3]

[1] Liberi professionisti - Fisici medici ed Esperti responsabili in RM
[2] Inail - Dipartimento di medicina epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale
[3] Azienda sanitaria dell'Alto Adige – Servizio di Fisica sanitaria

INDICE

1. INTRODUZIONE 2

2. SCOPO 2

3. METODI 3

3.1 Tabella A1 del d.lgs. 156/2016 4

3.2 Tabella A2 del d.lgs. 156/2016 4

4. VALUTAZIONE DEL CAMPO ELETTRICO INTERNO INDOTTO IN UN OPERATORE CHE SI MUOVE IN SALA RM 6

4.1 Analisi del movimento 6

4.2 Acquisizione dei valori di B nella sala RM 7

4.3 Calcolo delle funzioni di fitting sui due assi 9

4.4 Analisi VLE del d.lgs. 159/2016 10

4.5 Calcolo delle frequenze dell'impulso 10

4.6 Analisi del movimento 11

5. CASI ESEMPLIFICATIVI 12

5.1 Primo caso 12

5.2 Secondo caso 14

5.3 Terzo caso 14

5.4 Quarto caso 15

6. VALUTAZIONE DEL RISCHIO PER ESPOSIZIONE AI GRADIENTI 16

6.1 Procedure operative 16

6.2 Strumentazione utilizzata 17

6.3 Procedure di misura utilizzata 17

6.4 Risultati 17

6.5 Considerazioni sulle misure 20

7. CONCLUSIONI E DEROGHE 21

[1] revisione del mese di ottobre 2017 che sostituisce ed annulla la precedente pubblicata nell'agosto 2017

1. INTRODUZIONE

Il 1° agosto 2016 con l'emanazione da parte del Presidente della Repubblica Italiana del Decreto Legislativo (d.lgs.) 159[1], viene attuata in Italia la direttiva 2013/35/UE[2] sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) e che abroga la direttiva 2004/40/CE[3].
Il d.lgs. 159/2016 si inserisce nel contesto del decreto sulla sicurezza nei luoghi di lavoro d.lgs. 9 aprile 2008 n°81[4] indicando nel primo dei suoi due articoli, le modifiche introdotte al d.lgs. 81/2008, in particolare agli art. 206, 207, 208, 209, 210, 210-bis, 211 e 212. In modo specifico è citato il rischio di quei lavoratori che operano con macchine per risonanza magnetica, sottolineando che il datore di lavoro (DL) deve dimostrare (art. 212 comma 2 lettera f) *'… che i lavoratori sono sempre protetti dagli effetti nocivi per la salute e dai rischi per la sicurezza…'*. Il d.lgs. 159/2016 riporta in Allegato 1 la descrizione delle grandezze fisiche concernenti l'esposizione ai campi elettromagnetici, la definizione dei valori limite di esposizione (VLE) per gli effetti sensoriali e sanitari relativi ai campi elettrici interni, dei valori di azione (VA) espressi nelle grandezze misurabili per consentire la conformità ai pertinenti VLE. Sia per i VLE che per i VA sono riportate le relative Tabelle con i limiti da rispettare per la valutazione del rischio. In particolare il legislatore sottolinea espressamente il fatto che nel corpo umano è presente un campo elettrico 'in situ' a seguito di un campo elettrico ambientale.
L'introduzione della nuova norma ha comportato quindi il superamento di quelli che erano i limiti di esposizione professionale per gli operatori in risonanza magnetica stabiliti dalla normativa precedente, sia per quanto attiene il campo magnetico statico e sia per quanto attiene i campi elettromagnetici variabili, e la conseguente necessità di revisione dei criteri valutativi del rischio.
In particolare rispetto agli standard di sicurezza fino ad oggi vigenti, risultano immediatamente non più alcune misure operative di sicurezza tradizionalmente consolidatesi nel tempo, come per esempio Come conseguenza la segnalazione a terra in sala magnete della linea dei 200 mT.

Il nuovo decreto definisce VLE concernenti gli effetti sensoriali e sanitari classificando la casistica protezionistica in 3 casi distinti sulla base della frequenza di interesse delle grandezze, con relative Tabelle che di seguito si elencano in base alla nomenclatura utilizzata dal decreto legislativo sopra citato:

- A1, VLE per induzione magnetica esterna (B0) per frequenze comprese tra 0 e 1 Hz
- A2, VLE relativi agli affetti sanitari per intensità di campo elettrico interno a frequenze comprese tra 1 Hz e 10 Mhz
- A3, VLE relativi agli effetti sensoriali per il campo elettrico interno a frequenze comprese tra 1 Hz e 400 Hz

In modo analogo ma con i relativi VA sono introdotte le Tabelle B1, B2 e B3 secondo:

- B1, VA per i campi elettrici ambientali a frequenza compresa tra 1 Hz e 10 MHz
- B2, VA per i campi magnetici ambientali a frequenza compresa tra 1 Hz e 10 MHz
- B3, VA per la corrente di contatto

La presente revisione del lavoro originariamente pubblicato dagli autori trae spunto anche dalla riflessione condivisa in modo diretto od indiretto con colleghi esperti istituzionali del settore, i quali hanno inteso rendersi disponibili ad un confronto che si è evidentemente dimostrato utile e proficuo.

2. SCOPO

A fronte di questo cambiamento nell'approccio valutativo del rischio per i lavoratori in ambito RM introdotto dal d.lgs. 159/2016, il presente lavoro vuole ipotizzare in modo non univoco un metodo di analisi del rischio, che costituisca un punto di partenza sul quale approfondire metodologie e procedure alternative di valutazioni validate, al fine di convergere a risultati comparabili. In particolare, in questo lavoro, appronteremo un metodo di calcolo basato sull'analisi dei VLE e alcune misure sperimentali per la valutazioni dei VA mediante l'utilizzo delle Tabelle B1 e B2 del d.lgs. 159/2016, prediligendo un approccio che contempli gli elementi minimali che è obbligatorio introdurre per rispondere ai nuovi dettami normativi, integrati però anche da approfondimenti non necessari per rispondere a quanto disposto dal decreto, ma che è interessante introdurre al fine di una utile riflessione metodologica, e che potranno

essere presi in considerazione dal datore di lavoro “virtuoso” che intenda promuovere una strategia prevenzionistica che vada oltre l'assolvimento degli obblighi di legge.

3. METODI

Il nuovo decreto non prende più in considerazione – per il campo magnetico statico – l'esposizione nel tempo per determinati valori di campo [mT / minuti], ma piuttosto i valori di picco spaziale di induzione magnetica (Allegato1, Parte II, Tabella A1) (Tabella 2): tale misura è conseguente al fatto che la Tabella contenente i limiti di esposizione per gli operatori di cui al d.m. 02/08/1991[5] non è più valida (Tabella 1), secondo uno schema che si può sintetizzare dall'osservazione delle Tabelle che seguono.

Tabella 1		Allegato 1 del d.m. 02/08/1991
Parte esposta	**Intensità di campo**	**Durata massima di esposizione**
Corpo	200 mT	1 ora / giorno
Corpo	2 T	15 minuti / giorno
Arti	2 T	1 ora / giorno

D.lgs. 159/2016

Tabella 2	Tabella A1 del d.lgs. 159/2016 - VLE per introduzione esterna (B_0) per frequenze comprese tra 0 e 1 HZ
	VLE relativi agli effetti sensoriali [T]
Condizioni di lavoro normali	2
Esposizione localizzata degli arti	8
	VLE relativi agli effetti sanitari [T]
Condizione di lavoro controllate	8

Il nuovo decreto definisce, per l'induzione magnetica esterna per frequenze comprese tra 0 e 1 Hz, dei VLE sensoriali e dei VLE sanitari. Il limite inferiore per gli effetti sensoriali è pari a 2 tesla, mentre il limite inferiore degli effetti sanitari è stato fissato a 8 tesla. Ne consegue che il campo magnetico statico (frequenza <1 Hz) non rappresenta più formalmente un problema protezionistico, almeno per tutte le apparecchiature fino ad un campo magnetico statico di 1,5 tesla (nella sostanza più dei 2/3 del parco tecnologico nazionale), ma anche per le apparecchiature da 3 tesla, almeno nel momento in cui si dimostri che, durante l'espletamento dei compiti di gestione delle stesse, l'operatore non si trovi mai ad operare in zone dove il valore del campo magnetico statico superi i 2 tesla. Tale possibilità è di fatto garantita per alcune tipologie di tomografo da 3 tesla, ma non per tutte le apparecchiature di questo tipo, poiché alcune, per l'impostazione dell'esame clinico, necessitano che l'operatore si sporga con la testa o con le braccia verso l'interno del ‘gantry', facendolo così esporre a valori di campo magnetico statico di certo almeno superiori ai 2 tesla.
Fermo restando quanto sopra, è ovvio che le indicazioni di cautela al personale dovranno comunque essere quelle di trattenersi in sala magnete il minor tempo possibile, in particolare per ciò che attiene le aree immediatamente limitrofe al magnete, limitando al massimo il tempo di permanenza in vicinanza al ‘gantry', ed adottando le regole comportamentali appropriate tradizionalmente consolidate nell'ambito della risonanza magnetica, e riportate all'interno del regolamento di sicurezza elaborato e sottoscritto er assunzione di responsabilità sia dal medico responsabile dell'attività dell'impianto e sia dall'esperto responsabile della sicurezza.
Nulla cambia in riferimento ai limiti di prevenzione dell'effetto proiettile, per il quale continua a valere il riferimento rappresentato dalla linea isomagnetica da 0,5 mT : filtrare l'accesso alla zona interessata da un siffatto valore di campo magnetico statico, cosa che avviene per definizione essendo la medesima oggi normalmente del tutto ricompresa all'interno della sala magnete, permette in automatico l'esistenza di un filtro anche rispetto alla possibilità di accesso alle zone interessate dalla linea isomagnetica 3 mT introdotta quale valore limite di esposizione dal d.lgs.

159/2016. La prevenzione, del rischio connesso all'esposizione professionale al campo magnetico statico in risonanza magnetica, almeno nella routine clinica, avverrà di fatto sulla base di elementi che appaiono sempre più qualitativi e sempre meno quantitativi, promuovendo di fatto l'adozione di semplici regole comportamentali di cautela in sostituzione di quello che appariva come un approccio “simil-dosimetrico”, in ciò attuando – come si è sottolineato in precedenza - una svolta sostanziale rispetto a quanto acquisito dal quadro normativo precedente.

3.1 Tabella A1 del d.lgs. 159/2016

I VLE della nuova Tabella A1 (frequenza inferiore a 1 hz) sono limiti la cui misurazione non è influenzata dal soggetto esposto: consentono di concludere che, nella routine diagnostica, i VLE per effetti sia sensoriali e sia settoriali risultano sempre rispettati, unica eccezione essendo relativa ai magneti da 7 tesla, oggi utilizzabili solo per scopi di ricerca clinica, in riferimento al rispetto della soglia degli effetti sensoriali sugli arti, e solo nel caso in cui la gestione delle loro operatività costringa il personale sanitario ad inserire un braccio all'interno del gantry. E. E' evidente che, tenendo conto delle caratteristiche tecnologiche dei tomografi utilizzati in routine clinica, è da escludersi la possibilità di sforare i VLE per gli effetti sensoriali su corpo intero, fermo restando l'applicazione del principio di cautela che porta comunque a prediligere comportamenti da parte degli operatori tali da consentire di sostare in sala magnete il minor tempo possibile ed evitare – all'interno della medesima, e compatibilmente con le mansioni da svolgere nel corso dell'attività diagnostica – azioni e comportamenti non codificati nel regolamento di sicurezza
Se ci si riferisce invece alla soglia minima degli effetti sanitari della medesima Tabella, è evidente che non si avrà possibilità di ipotizzare sforamenti fino a quando non si affacceranno sul mercato i primi magneti a 9 tesla (o più...) marcati CE, e quindi - in quanto dispositivi medici - soggetti ai disposti di cui al d.lgs. 159/2016.
Di fronte ad uno sforamento dei VLE per effetti sensoriali, la norma impone che il datore di lavoro faccia comunicazione alla Asl, per il tramite dell'esperto responsabile della sicurezza, mentre in caso di sforamento dei VLE per effetti sanitari dovrà essere richiesta una deroga secondo lo schema di un decreto attuativo che Ministero del lavoro e Ministero della salute stanno di concerto scrivendo al momento della scrittura del presente contributo. La deroga sarà, tuttavia, per un uso temporaneo e a condizione che sussistano ‘*specifiche circostanze documentate, e soltanto per il periodo in cui rimangono tali...*', garantendo sempre e comunque l'adozione di misure di cautela e regole per la minimizzazione dell'esposizione professionale. Una volta ottenuta tale deroga, il datore di lavoro stesso, per il tramite dell'esperto responsabile nominato formalmente per quel tomografo RM, dovrà codificare e mettere in atto, norme comportamentali onde perseguire comunque la minimizzazione delle esposizioni fino al rientro delle cause di superamento.

3.2 Tabella A2 del d.lgs. 159/2016

Il d.lgs. 159/2016, introduce anche le Tabelle A2 e A3 (vedi Tabelle 3 e 4 sottostanti) relative ai limiti per i campi elettrici indotti all'interno del corpo (in situ) a seguito dell'esposizione a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo, e sono applicabili su base temporanea durante il turno di lavoro, ove giustificato dalla pratica o dal processo produttivo, purché siano state adottate le misure di prevenzione di cui all'articolo 208, comma 4.
Tali limiti permettono, nel merito della valutazione del rischio, di quantificare le esposizioni dovute a campi elettrici (interni) con frequenze superiori/eguali ad 1 Hz, che, generalmente sono quelli indotti:
- a causa di un movimento dell'operatore in sala RM (a causa della distribuzione non uniforme del campo magnetico statico), comunque elemento di valutazione non obbligatorio ai sensi della direttiva sopra introdotta, e quindi del d.Lgs. 159/16;
-per l'accensione dei gradienti alla presenza dell'operatore in sala RM, come ad esempio pratiche di RM interventistica, RM pediatrica ed RM di urgenza su pazienti critici, in questo caso rispondendo ad una esigenza introdotta dalla norma.
Nel primo caso la valutazione sarà condotta analiticamente sulla base delle Tabelle A2 e A3 già citate.
Nel secondo caso la valutazione sarà effettuata sperimentalmente mediante strumentazione dedicata sulla base dei valori di azione (VA) espressi nelle Tabelle B1 e B2 (vedi Tabelle 5 e 6 sottostanti), riferendosi rispettivamente ai campi elettrici ed ai campi magnetici ambientali: i valori di azione sono grandezze misurabili il cui rispetto consente di acquisire certezza del rispetto di corrispondenti VLE “in situ” che risultano evidentemente non fisicamente misurabili.

Tabella 3 Tabella A2 del d.lgs. 159/2016 - VLE relativi agli effetti sanitari per l'intensità di campo elettrico interno a frequenze comprese tra 1 Hz e 10 MHz

Intervallo di frequenza	VLE relativi agli effetti sanitari [Vm^{-1}] (valore di picco)
1 Hz ≤ f < 3 kHz	1,1
3 kHz ≤ f ≤ 10 MHz	$3{,}8 \times 10^{-4}$ f

Tabella 4	Tabella A3 del d.lgs. 159/2016 - VLE relativi agli effetti sensoriali per il campo elettrico interno a frequenze comprese tra 1 e 400 Hz
Intervallo di frequenza	**VLE relativi agli effetti sensoriali [Vm^{-1}] (valore di picco)**
1 Hz ≤ f < 10 Hz	0,7 / f
10 Hz ≤ f < 25 Hz	0,07
25 Hz ≤ f ≤ 400 Hz	0,0028 f

Tabella 5	Tabella B1 del d.lgs. 159/2016 - VA per i campi elettrici ambientali a frequenze comprese tra 1Hz e 10 MHz	
Intervallo di frequenza	**VA (B) inferiori per l'intensità del campo elettrico [Vm^{-1}] (valori RMS)**	**VA (E) superiori per l'intensità del campo elettrico [Vm^{-1l}] (valori RMS)**
1 Hz ≤ f < 25 Hz	$2,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$
25 Hz ≤ f < 50 Hz	$5,0 \times 10^5$ / f	$2,0 \times 10^4$
50 Hz ≤ f < 1,64 kHz	$5,0 \times 10^5$ / f	$1,0 \times 10^6$ / f
1,64 kHz ≤ f < 3 kHz	$5,0 \times 10^5$ / f	$6,1 \times 10^2$
3 kHz ≤ f ≤ 10 MHz	$1,7 \times 10^2$	$6,1 \times 10^2$

Tabella 6	Tabella B2 del d.lgs. 159/2016 - VA per i campi magnetici ambientali a frequenze comprese tra 1 Hz e 10 MHz		
Intervallo di frequenza	**VA (B) inferiori per l'induzione magnetica [µT] (valori RMS)**	**VA (B) superiori per l'induzione magnetica [µT] (valori RMS)**	**VA (E) per l'induzione magnetica per esposizione localizzata degli arti [µT] (valori RMS]**
1 Hz ≤ f < 8 Hz	$2,0 \times 10^5$ / f	$3,0 \times 10^5$ / f	$9,0 \times 10^5$ / f
8 Hz ≤ f < 25 Hz	$2,5 \times 10^4$ / f	$3,0 \times 10^5$ / f	$9,0 \times 10^5$ / f
25 Hz ≤ f < 300 Hz	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5$ / f	$9,0 \times 10^5$ / f
300Hz ≤ f < 3 kHz	$3,0 \times 10^5$ / f	$3,0 \times 10^5$ / f	$9,0 \times 10^5$ / f
3 kHz ≤ f ≤ 10 MHz	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

Nel caso in cui si voglia all'interno delle strutture sanitarie, affrontare su base volontaria la valutazione del rischio connesso al movimento dell'operatore in sala magnete, è necessario – soprattutto nei casi in cui l'operatore abbia necessità di muoversi più velocemente di quanto tipicamente avvenga nell'attività clinica routinaria - effettuare misure che possano consentire al datore di lavoro, per il tramite dell'esperto responsabile, di connotare la distribuzione spaziale dei gradienti al fine di individuare valori di esposizione da confrontare con i VA. Al momento il know how su questo tipo di misura è però poco sviluppato, a meno di non ottenere – al riguardo - informazioni dal fabbricante, che d'altronde è vincolato a farlo nel rispetto di quanto sancito sia dall'art.209 del decreto legislativo, sia dalla norma di buona tecnica relative alla risonanza magnetica - Norma CEI EN 60601-2-33[9] -.e sia dalle direttive di europee di riferimento ancora in vigore sui dispositivi medici.
Secondo il consueto principio di cautela, dovrà comunque essere sempre spiegato agli operatori che nel corso di un esame diagnostico vige, in linea di principio, il divieto assoluto di sostare in sala magnete, o comunque di permanerci il meno possibile. Eventuali eccezioni dovranno essere preventivamente codificate, quindi tracciate anche al fine di comunicazioni a posteriori verso il medico competente, e fatte oggetto di regole protezionistiche in base alle quali sarà obbligatorio fermarsi all'interno sella sala magnete il minor tempo possibile, rimanendo il più possibile lontani dal 'gantry' compatibilmente con la salvaguardia dell'efficacia delle operazioni da compiere, muovendosi ove possibile in modo conforme a quanto già rappresentato in tema di minimizzazione dell'esposizione al campo magnetico statico.

4. VALUTAZIONE DEL CAMPO ELETTRICO INTERNO INDOTTO IN UN OPERATORE CHE SI MUOVE IN SALA RM

Al fine di compiere gli approfondimenti tecnici non richiesti strettamente dal d.lgs. 159/2016, ma comunque interessanti da un punto di vista prevenzionistico, ai quali sopra si è fatta menzione, è utile valutare il campo elettrico indotto all'interno del corpo del lavoratore ([nota 2]) che si muove in un gradiente di campo magnetico, è stata utilizzata la procedura indicata nella precedente pubblicazione Inail in materia di prevenzione e sicurezza[6]. In essa l'analisi del problema era basata sulla terza equazione di Maxwell:

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

B = induzione magnetica [T]
T = tempo [s] (1)
E = campo elettrico [V / m]

Nella precedente pubblicazione, al fine di essere molto cautelativi, trattandosi di considerazioni a carattere sanitario, avevamo considerato nel campo E indotto generato da B(t) che il raggio della spira generata dalle cariche in movimento, fosse **r = 2.** Questa considerazione portava ad una forte sovrastima dei valori della corrente indotta. Seguendo le indicazioni fornite da Riches et al[7], si è anche qui cautelativamente ritenuto opportuno considerare per il corpo e per il capo rispettivamente **r = 0,64 m** e **r = 0,1,** i quali, applicati alla nota legge di Ampere, forniscono la relazione operativa seguente:

$$\oint Edl = -\frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \oint Edl = E\oint dl = E2\pi r \Rightarrow E = -\frac{r}{2}\frac{dB}{dt} \qquad (2)$$

Nella quale, in seguito, indicheremo **r / 2 = k_r**

La (1) fornisce E come variazione di B nel tempo, è stato rielaborato in:

$$E = \frac{\partial B}{\partial x} * v_x + \frac{\partial B}{\partial y} * v_y + \frac{\partial B}{\partial z} * v_z \quad \textbf{(2)}$$

Dove: $v_x = \frac{dx}{dt}$; $v_y = \frac{dy}{dt}$; $v_z = \frac{dz}{dt}$ sono le componenti della velocità sui tre assi

Nell'equazione (1) il campo elettrico E è conseguenza di una variazione B nel tempo, mentre nell'equazione (2) il campo elettrico E è dato dal prodotto del gradiente di B nel punto in esame per la velocità dell'operatore nel medesimo punto (**dB / dt = dB / dx * dx / dt**).
In un sistema di campo statico, B non varia, ma è presente nello spazio circostante sotto forma di gradiente quando è presente una differenza di B tra due punti contigui. L'operatore che si muove in questo spazio di B è attraversato da una variazione del campo magnetico all'interno del proprio corpo tanto maggiore quanto maggiore è la sua velocità determinando, al limite, il noto **E = |dB / dt|**. Da notare che questo campo elettrico non esiste esternamente, ma è "in situ" poiché è confinato solo all'interno del corpo che si muove. **Ei = J / σ** significa che il campo elettrico interno al corpo che si viene a creare mette in moto/crea una corrente **J** tanto più intensa quanto maggiore è la conduttanza **σ.**

4.1 Analisi del movimento

Il moto di una persona nello spazio può assumere, in linea generale, due forme: rettilineo o circolare. Certamente esistono tutta una serie di combinazioni dei due, ma generalmente si è osservato che un soggetto che ruota e si

[2] Si precisa che il Calcolo E, di seguito esposto, non coincide in termini rigorosi con il campo elettrico interno al corpo dell'operatore (in situ) che si muove in un gradiente di campo magnetico, ma il campo elettrico nella geometria definita che si muove nel gradiente. Nelle formule non compaiono coefficienti dielettrici. Il corpo umano, infatti, è un complesso sistema di RLC collegati in serie e parallelo di cui in maniera rigorosa si dovrebbe tenere conto, tuttavia il calcolo di E, così come esposto, fornisce comunque risultati utili per una corretta e doverosa valutazione del rischio.

sposta compie prima una rotazione e dopo uno spostamento. In ogni caso potranno essere fatte ulteriori considerazioni.
In una sala magnete, per descrivere l'andamento del gradiente B lungo una direzione, qualunque essa sia, è opportuno costruire preventivamente una mappa dei valori B in un piano parallelo al pavimento, quindi, trovare una funzione semplice e, allo stesso tempo, facilmente derivabile che lo descriva.
Nel nostro caso la scelta migliore ci è parsa quella di una funzione di tipo esponenziale, poiché facilmente derivabile e adatta ad interpolare bene i punti del campo magnetico attorno alla RM.
Se prendiamo, a titolo di esempio, la componente lungo la direzione **Z** la derivata della generica $B_z = B_m e^{f(z)}$ da noi scelta, sarà:

$\frac{dB_z}{dz} = B_m e^{f(z)} f'(z)$ e di conseguenza, per il moto rettilineo (lungo Z) avremo:

$$E_z = k_r \frac{dB}{dz} * \frac{dz}{dt} = k_r B_m e^{f(z)} * f'(z) * v_z$$

Per il moto rotatorio abbiamo considerato il piano di tessuto che ruota lungo un asse localizzato in un punto il cui valore di induzione magnetica è **B0**.
La relazione classica $E = k_r \frac{dB}{dt}$, facendo intervenire l'angolo di rotazione, si trasforma in:

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

dove: **dθ / dt** è la velocità angolare **ω** [rad / s], mentre **dB / dθ** è la variazione di intensità di campo magnetico **B** prodotta nella spira in funzione dell'angolo di rotazione. La velocità angolare, per rimanere in una situazione vicina alla realtà, non dovrebbe essere considerata costante, ma corredata di una fase di accelerazione iniziale e di una fase di decelerazione finale dove **ω** varia in funzione dell'angolo (ω = f(θ)); quindi:

$$|E| = k_r \frac{dB}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt} = k_r B * sen\theta * \omega \qquad \textbf{(3)}$$

Il fatto di considerare una accelerazione iniziale ed una finale, ai fini della determinazione del massimo valore di E è inessenziale, infatti, la legge chiede unicamente il non superamento del VLE, quindi è corretto considerare la massima velocità angolare durante un arco di rotazione quindi si assume *sen θ = 1* riducendo la (3) a:

$$|E| = k_r \frac{dB}{d\theta} * \frac{d\theta}{dt} = k_r B_p * \omega_{\max}$$

In definitiva le tre equazioni fondamentali che individuano il campo elettrico E, nelle varie situazioni di moto, in un piano ad altezza costante dal pavimento sono:

$$E_z = B_m * k_r * e^{f(Z)} * f'(Z) * V_z \qquad (4)$$
$$E_x = B_m * k_r * e^{f(X)} * f'(x) * V_x \qquad (5)$$
$$E_\theta = B * K_r * \omega \qquad (6)$$

Dove:
$V_{x,z}$ = velocità del moto nel punto considerato
ω = velocità angolare massima
B = intensità del campo nel punto considerato
K_r = r / 2

Le funzioni f(z) e f(x) sono delle funzioni polinomiali del tipo:

$$f(z) = a_6 z^6 + a_5 z^5 + a_4 z^4 + a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0 g \qquad (7)$$

Dove: a_6; a_5; a_4; a_3; a_2; a_1; a_0 sono delle costanti di fitting

4.2 Acquisizione dei valori di B nella sala RM

A titolo di esempio per l'applicazione del metodo di calcolo sopra proposto, si va a considerare un caso pratico di risonanza magnetica da 1,5 tesla. Per determinare le equazioni **4, 5, 6** è necessario creare, una griglia dei valori di B nella metà anteriore al magnete considerando che i magneti con criogeni hanno perlopiù una simmetria cilindrica orizzontale. Per ottenere la precisione e l'accuratezza necessarie è necessario che il passo dei valori di B, misurati con il gaussmetro, sia dell'ordine di 0,1 m e che questi siano presi con molta cura e in modo randomizzato, evitando derive strumentali o errori di posizionamento. È noto infatti che il gaussmetro, muovendosi frequentemente all'interno del campo, è soggetto ad una piccola ma significativa deriva termica per cui è necessario un frequente offset.

Figura 1 **Griglia dei valori di B per una macchina da 1,5 T gantry 140 cm passo di campionamento 10 cm. Z = 0 alla superficie del gantry. X = 0 asse del campo**

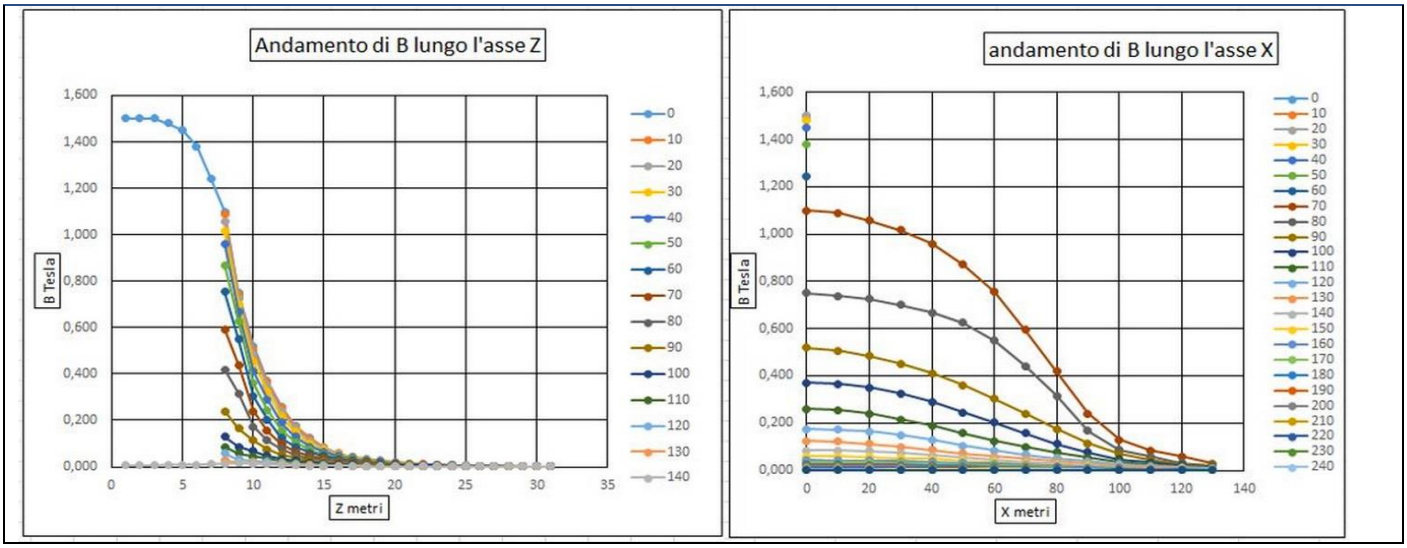
B Tesla

	Z	X=														
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
-70	0	1,500														0,007
-60	10	1,500														0,007
-50	20	1,500														0,008
-40	30	1,480														0,008
-30	40	1,450														0,009
-20	50	1,380														0,010
-10	60	1,244														0,011
0	70	**1,100**	1,090	1,056	1,016	**0,960**	0,870	0,755	0,594	**0,418**	0,240	0,130	0,085	**0,058**	0,028	**0,015**
10	80	0,750	0,739	0,725	0,700	0,668	0,625	0,550	0,440	0,316	0,166	0,086	0,058	0,032	0,020	0,016
20	90	0,520	0,506	0,484	0,451	0,411	0,361	0,304	0,239	0,174	0,115	0,068	0,045	0,025	0,018	0,015
30	100	0,370	0,365	0,352	0,327	0,291	0,244	0,203	0,156	0,113	0,076	0,046	0,034	0,021	0,014	0,011
40	110	**0,260**	0,256	0,240	0,216	**0,191**	0,158	0,125	0,100	**0,078**	0,054	0,036	0,025	**0,016**	0,012	**0,008**
50	120	0,176	0,173	0,166	0,150	0,130	0,106	0,085	0,066	0,052	0,039	0,027	0,019	0,013	0,010	0,006
60	130	0,124	0,121	0,112	0,100	0,086	0,072	0,060	0,048	0,038	0,028	0,019	0,014	0,009	0,006	0,005
70	140	0,084	0,083	0,081	0,074	0,065	0,054	0,046	0,037	0,030	0,021	0,015	0,009	0,007	0,005	0,004
80	150	**0,059**	0,058	0,056	0,053	**0,048**	0,041	0,036	0,028	**0,023**	0,017	0,013	0,007	**0,005**	0,004	**0,004**
90	160	0,043	0,043	0,042	0,040	0,036	0,032	0,029	0,023	0,019	0,015	0,011	0,007	0,005	0,003	0,003
100	170	0,035	0,034	0,033	0,031	0,028	0,025	0,021	0,018	0,014	0,011	0,008	0,005	0,004	0,003	0,003
110	180	0,026	0,026	0,025	0,023	0,021	0,018	0,016	0,013	0,011	0,009	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002
120	190	**0,020**	0,020	0,019	0,018	**0,016**	0,014	0,012	0,011	**0,009**	0,007	0,005	0,003	**0,002**	0,002	**0,002**
130	200	0,015	0,014	0,014	0,014	0,013	0,012	0,010	0,009	0,008	0,006	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002
140	210	0,011	0,011	0,010	0,010	0,010	0,009	0,009	0,008	0,007	0,005	0,003	0,002	0,002	0,001	0,002
150	220	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008	0,008	0,007	0,006	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001	0,002
160	230	**0,007**	0,007	0,007	0,006	**0,006**	0,006	0,006	0,005	**0,005**	0,003	0,002	0,002	**0,001**	0,001	**0,001**
170	240	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
180	250	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
190	260	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
200	270	**0,003**	0,003	0,003	0,003	**0,003**	0,003	0,003	0,002	**0,002**	0,002	0,001	0,001	**0,001**	0,001	**0,001**
210	280	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
220	290	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
230	300	**0,002**	0,002	0,002	0,002	**0,002**	0,002	0,002	0,001	**0,001**	0,001	0,001	0,001	**0,001**	0,001	**0,001**

Rolando Milani et al.

Inizialmente abbiamo misurato l'andamento di B lungo l'asse centrale del magnete a partire dal centro all'interno del bore (z = -70 cm), venendo all'esterno per una lunghezza di oltre 2 m dalla superficie. Terminata questa operazione, tenendo come coordinata Z = 0 la superficie del magnete, abbiamo misurato B su tutto il
piano passante per l'asse del magnete fino a coprire un'area di 2 x 1,5 m circa. Nella Figura 1 è riportata la griglia dei valori B acquisiti per una macchina da 1,5 tesla con gantry lungo 140 cm e nella Figura 2 sono riportati in grafico gli stessi valori lungo le direzioni Z e X con passo 10 cm.

Figura 2 **Grafici dell'andamento di B rispettivamente lungo l'asse Z e lungo l'asse X per una macchina da 1,5 T**



Rolando Milani et al.

4.3 Calcolo delle funzioni di fitting sui due assi

Dopo avere ottenuto la griglia dei valori B, abbiamo ricavato, per ogni asse, l'equazione che descrive l'andamento del campo magnetico B effettuando il processo di fitting per ogni colonna dell'asse Z e per ogni riga dell'asse X[3].
È' consigliabile che il processo di fitting avvenga su almeno 20 punti per ottenere delle equazioni che minimizzino la fluttuazione dei dati sperimentali con un $R^2 > 0,99$.
Nella Tabella 7 sono riportati a titolo di esempio i dati sperimentali (sper) lungo l'asse centrale Z, a partire da 40 cm dall'isocentro del magnete, per una lunghezza di 300 cm.

Nella colonna (calc) sono riportati i dati del campo magnetico calcolati con l'equazione di fitting:

$$B_z = 1.5 * \exp (a_6 * Z^6 + a_5 * Z^5 + a_4 * Z^4 + a_3 * Z^3 + a_2 * Z^2 + a_1 * Z + a_0) \qquad (7a)$$

Nella colonna (diff) è riportata la differenza tra i dati calcolati e quelli sperimentali da cui si può vedere che l'equazione interpola molto bene l'andamento dei dati sperimentali in tutto l'intervallo di interesse.
Per un corretta valutazione del rischio da campi elettrici indotti è importante che vi sia una buona approssimazione tra dati sperimentali e dati calcolati specialmente in prossimità del magnete, poiché il massimo valore del gradiente si ha nella zona del flesso che è collocata a circa 30 - 40 cm dalla superficie.

Tabella 7		Dati sperimentali, calcolati e loro differenza lungo l'asse Z centrale	
Z cm	**sper**	**calc**	**diff**
40	1,450	1,548	0,098
50	1,380	1,412	0,032
60	1,244	1,213	-0,031
70	1,100	0,983	-0,117
80	0,750	0,755	0,005
90	0,520	0,556	0,036
100	0,370	0,395	0,025
110	0,260	0,275	0,015
120	0,176	0,189	0,013
130	0,124	0,130	0,006
140	0,084	0,090	0,006
150	0,059	0,063	0,004
160	0,043	0,045	0,002
170	0,035	0,033	-0,002
180	0,026	0,025	-0,002
190	0,020	0,019	-0,001
200	0,015	0,015	0,000
210	0,011	0,012	0,001

[3] Noi abbiamo utilizzato le equazioni $B_z = B_m * e^{f(z)}$ per i dati lungo l'asse Z e $B_x = B_m * e^{f(x)}$ per i dati lungo l'asse X, tuttavia, come già detto, qualsiasi altro tipo di equazione è valido purché sia facilmente derivabile nell'intervallo entro cui avviene il movimento.

220	0,009	0,009	0,000
230	0,007	0,007	0,000
240	0,006	0,006	0,000
250	0,004	0,005	0,001
260	0,004	0,004	0,000
270	0,003	0,003	0,000
280	0,003	0,002	0,000
290	0,002	0,002	0,000
300	0,002	0,002	0,000

Tabella 8	Coefficienti della polinomiale f (x) Z = 0
Bm	**1,5**
a6	2,091E-13
a5	-1,915E-10
a4	6,367E-08
a3	8,612E-06
a2	2,536E-04
a1	8,150E-04
a0	-2,791E-02

Nella Tabella 8 sono riportati i coefficienti $a_0 \ldots a_6$ delle equazioni (7 e 7a) lungo l'asse **Z**. Lo stesso processo è stato applicato lungo la direzione X per tutte le parallele alla superficie del magnete. Dopo aver calcolato tutti i coefficienti $a_0 \ldots a_6$ per tutte le **Z** e per tutte le **X** abbiamo ricostruito le 38 equazioni che descrivono **B** nella sala magnete per quella macchina, e le rispettive derivate ottenendo le equazioni (4) e (5) che permettono di calcolare il campo elettrico in funzione del vettore velocità in un determinato punto.

4.4 Analisi dei VLE del d.lgs. 159/2016

Come detto nella parte introduttiva, il d.lgs. 159/2016, Parte II - Effetti non termici, definisce i valori della Tabella A1 come quei valori limite che si correlano alla prevenzione di nausea e vertigine a condizione che il movimento del soggetto mantenga la condizione imposta dai limiti di frequenza, cioè che la frequenza dell'impulso sia compresa tra 0 e 1 Hz.
Nel caso in cui il movimento del soggetto all'interno del campo magnetico statico determini un impulso di frequenza maggiore o uguale a 1Hz ci si trova difronte ad un campo elettrico indotto (E) che non deve superare i valori indicati dal decreto nelle Tabella A2 e Tabella A3 (tabelle 3 e 4 del presente lavoro) cioè, 1,1 [V / m] per gli effetti sanitari e 0,7 / f [V / m] per gli effetti sensoriali. È evidente che, per una corretta valutazione del rischio la prima cosa da verificare sarà la frequenza dell'impulso indotto nel soggetto, sia perché una frequenza inferiore a 1 Hz escluderebbe l'applicabilità delle Tabelle A2 e A3, sia perché, in caso contrario, il VLE sarà correlato alla frequenza dalla relazione 0,7 / *f*, che può variare da 700 a 70 mV / m.

4.5 Calcolo della frequenza dell'impulso

Nel caso del moto rettilineo, per il calcolo della frequenza dell'impulso, abbiamo considerato che la sua ampiezza era ben rappresentata dalla FWHM cioè dalla larghezza a metà altezza. La frequenza media dell'impulso poteva quindi essere espressa dalla relazione:

$$f = \frac{v_p}{\Delta x} \quad [s^{-1}]$$ dove: v_p= velocità del soggetto al massimo del campo elettrico indotto

Δx = ampiezza dello spazio FWHM

Nell'esempio considerato in precedenza, sintetizzati a livello di calcolo nell sottostante Figura 3, si vede che l'impulso ha Nel caso del moto rotatorio abbiamo considerato la velocità angolare **ω** e l'angolo di rotazione **Δθ** così che la frequenza dell'impulso è data da:

$$f = \frac{\omega_p}{\Delta\theta} \quad [s^{-1}]$$ [4] dove: ω_p = velocità angolare del moto

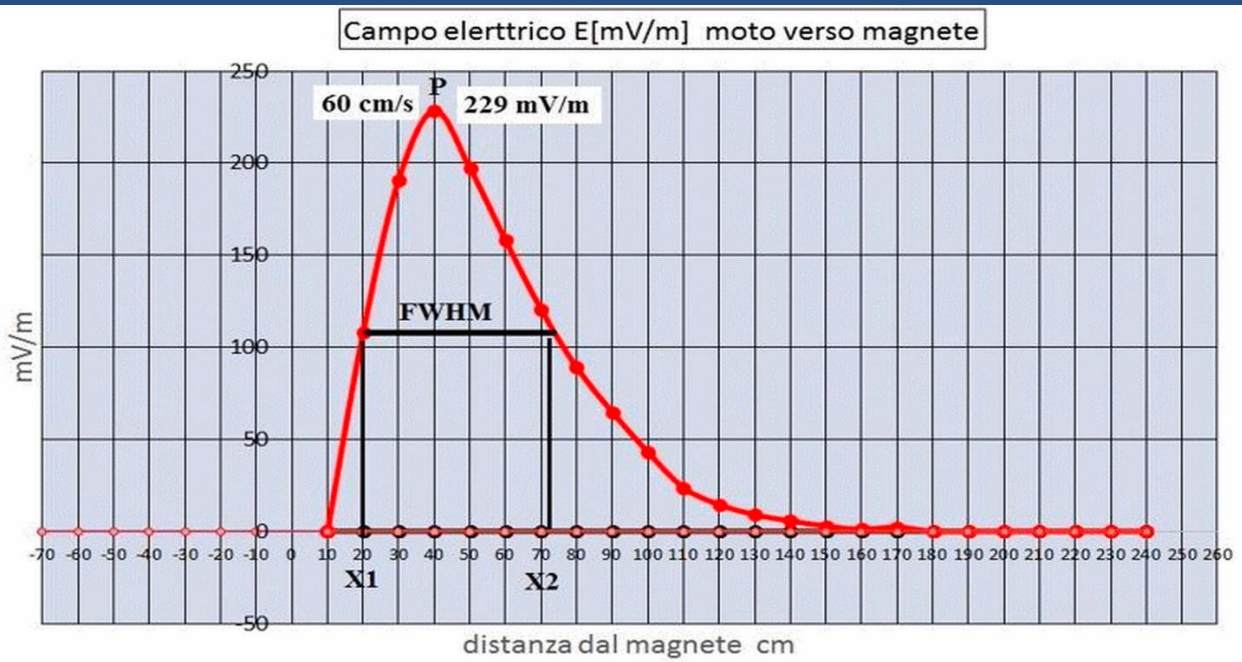
Δθ = arco di rotazione

una frequenza di 1,2 Hz e il VLE si abbassa da 700 mV / m a 583 mV / m.

Nella Tabella 9 viene altresì rappresenta la frequenza in funzione della velocità angolare e dell'angolo di rotazione. I valori in rosso sono frequenze impossibili generate da rapporti fisiologicamente non realizzabili.

[4] La relazione deve essere vista dal punto di vista sperimentale e non strettamente matematico, infatti: per angoli stretti si preferisce ruotare gli occhi anziché il capo, inoltre, la rotazione presenta sempre una fase di accelerazione, quindi per angoli stretti la velocità angolare è bassa quindi la $f \rightarrow 1$, per angoli maggiori di 30° la rotazione del capo è accompagnata dalla torsione del busto, quindi la velocità angolare varia. Per questi ed altri motivi abbiamo inserito una tabella che fornisce *f* (ωθ) per vari angoli e varie velocità.

Figura 3 — **Esempio di calcolo della frequenza *ƒ* per cui il VLE passa da 700 mV / m a 583**



Ep 229 mv / m	X2 – X1 = 50 cm	*ƒ* = Vp / (X2 – X1) = 60 / 50 = 1,2 Hz
Vp 60 cm / s	*ƒ* 1.2 Hz	VLE = 700 / 1,2 = 583
FWHM 114,5 V / m	VLE 583 mV / m	Emax / VLE = 39,3 %
X1 = 20 cm	% VLE 0,393	
X2 = 70 cm		

Rolando Milani et al.

Tabella 9 — **Rapporto (ω / Δθ) - valori frequenza in funzione della velocità angolare e dell'angolo di rotazione**

ω / θ	**4**	**8**	**15**	**30**	**60**	**90**	**180**	**270**	**360**
4	1	0,5	0,27	0,13	0,07	0,04	0,02	0,01	0,01
8	2	1	0,53	0,27	0,13	0,09	0,04	0,03	0,02
15	3,75	1,875	1	0,5	0,25	0,17	0,08	0,06	0,04
30	7,5	3,75	2	1	0,5	0,33	0,17	0,11	0,08
60	15	7,5	4	2	1	0,67	0,33	0,22	0,17
90	22,5	11,25	6	3	1,5	1	0,5	0,33	0,25
180	45	22,5	12	6	3	2	1	0,67	0,5
270	67,5	33,75	18	9	4,5	3	1,5	1	0,75
370	90	45	24	12	6	4	2	1,33	1

4.6 Analisi del movimento

La valutazione del movimento è un'operazione che implica un'attenta analisi degli aspetti comportamentali del personale che opera con una risonanza magnetica, specialmente quando si muove in prossimità del 'bore' per il posizionamento del paziente o delle bobine.

Per prima cosa abbiamo osservato il comportamento di ogni lavoratore annotando le situazioni di criticità. In secondo luogo abbiamo filmato i movimenti dell'operatore con una videocamera a 24 f/s e calcolare la velocità **V_z; V_x; ω** nelle fasi più critiche.

È molto importante distinguere le varie tipologie di lavoratori poiché queste espletano mansioni molto differenti. Medici, tecnici, personale di pulizia, ecc., hanno situazioni di rischio e comportamenti molto differenti.
Si è potuto notare che il comportamento dell'operatore che espleta una procedura è costituito da una serie di movimenti ripetitivi e comuni a tutti a parità di operazione.
Per il personale tecnico, ad esempio, le manovre usuali sono: ingresso in sala magnete, avvicinamento alla macchina, azionamento dei comandi del lettino (ad una distanza sovente inferiore a 30 cm), aggancio e sgancio del connettore della bobina, (azione che spesso determina lo 'scavallamento' del lettino lungo la direzione X con un rapido movimento a scatto), ripetute rotazioni del capo, traslazione orizzontale a 30 - 40 cm dalla superficie della macchina, e altri movimenti caratteristici della tipologia di esame e/o bobina da posizionare.
Alcune volte il lavoratore introduce il capo nel 'gantry' e si è anche notato che, dopo una rotazione, il moto di ritorno del capo alla posizione normale è caratterizzato da una velocità di picco quasi sempre oltre i 180° / s, che qualche volta può arrivare a 270° / s.
Una volta calcolate le velocità delle varie fasi queste vengono introdotte negli algoritmi di calcolo ottenendo il campo elettrico indotto e nel caso di un superamento dei VLE è necessario ricalcolare (E) con una nuova velocità che porti al non superamento dei VLE.
Al termine dell'analisi è doveroso produrre un documento in cui sono analizzati tutti i comportamenti critici con il quale il datore di lavoro può procedere ad un momento di formazione di tutte le categorie di lavoratori.
Con questa procedura il datore di lavoro risponde in modo oggettivo ai disposti dell'art. 209 punto 1, del d.lgs. 159/2016

- '… *misura o calcola i livelli dei campi elettromagnetici ai quali sono esposti i lavoratori*…' e dopo avere analizzato le fasi di superamento dei VLE ed effettuato una accurata opera di formazione può dimostrare di avere ottemperato all'art. 2010-bis del d.lgs. 159/2016.
- '*il datore di lavoro garantisce, inoltre, che i lavoratori che potrebbero essere esposti ai rischi derivanti dai campi elettromagnetici sul luogo di lavoro e i loro rappresentanti ricevano le informazioni e la formazione necessarie in relazione al risultato della valutazione dei rischi*'.

5. CASI ESEMPLIFICATIVI

A titolo di esempio riportiamo di seguito alcuni esempi di calcolo in situazioni standard di lavoro e per una macchina RM da 1,5 tesla.

5.1 Primo caso

Avvicinamento parallelo al lettino a velocità variabile fino alla superficie della macchina. In questo caso si ha solo la componente E_Z Per prima cosa si calcola E nel tratto significativo utilizzando l'equazione (4), quindi si procede al calcolo della frequenza e si ottengono i risultati sotto riportati in tabella 10 e Figura 4, successivamente ricalcolati sulla base della riduzione della velocità come da tabella 11 e Figura 5:

Calcolo della frequenza:

E_{picco} = 381 mV / m; FWHM=190 mV / m; X1 = 25 cm; X2 = 70 cm; X2 - X1 = 45 cm; *f* = 2,2 Hz; VLE = 700 / 2,2 = 315 mV / m

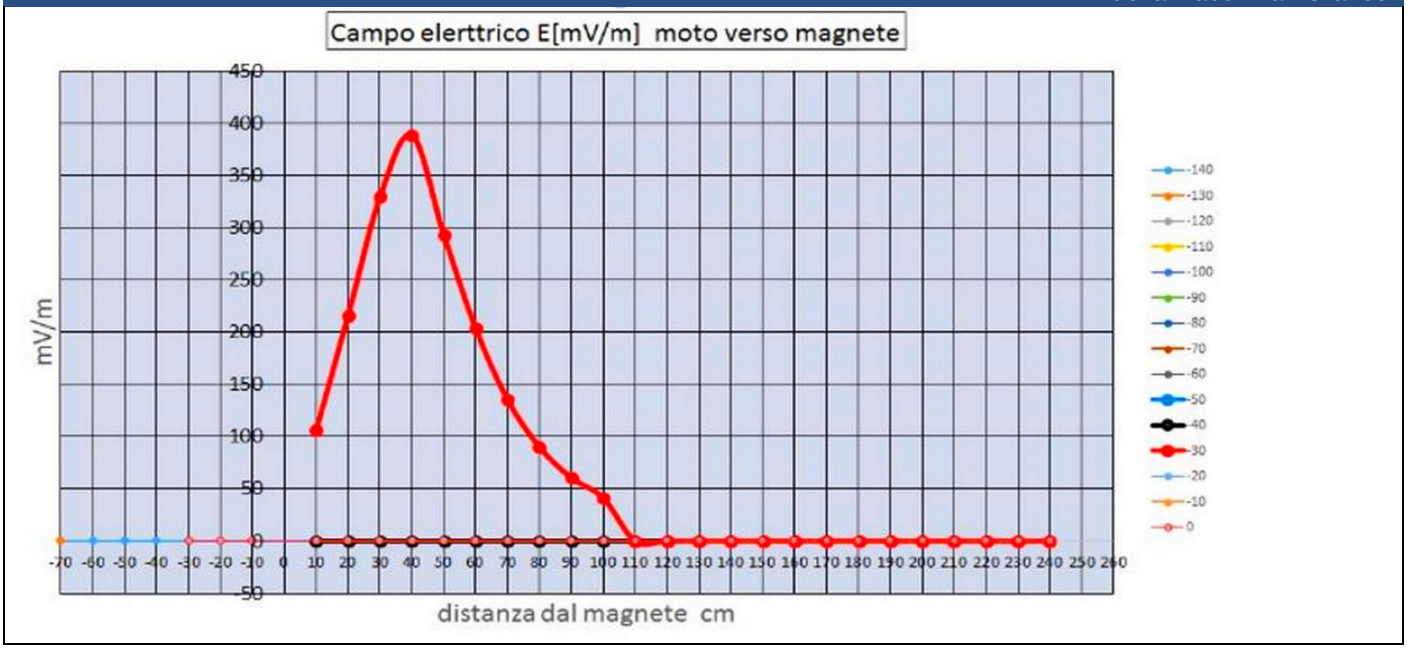
Rapporto tra campo elettrico indotto e VLE = 381 /315 = **1,21 (superamento del VLE)**

Essendosi superato il VLE del 20% bisogna procedere ad una variazione comportamentale del soggetto che generi una del campo elettrico come ad esempio diminuzione della velocità in prossimità del 'gantry'.

Tabella 10	Esempio 1 - Avvicinamento parallelo al lettino a velocità variabile fino alla superficie della macchina							
X =	30	30	30	30	30	30	30	30
Z =	10	20	30	40	50	60	70	80

V =	0	20	70	100	120	140	140	140
E_{Bod}	0	108	334	381	338	277	187	125
E_{Head}								

Figura 4 **Esempio 1 - Avvicinamento parallelo al lettino a velocità variabile fino alla superficie della macchina - Grafico**



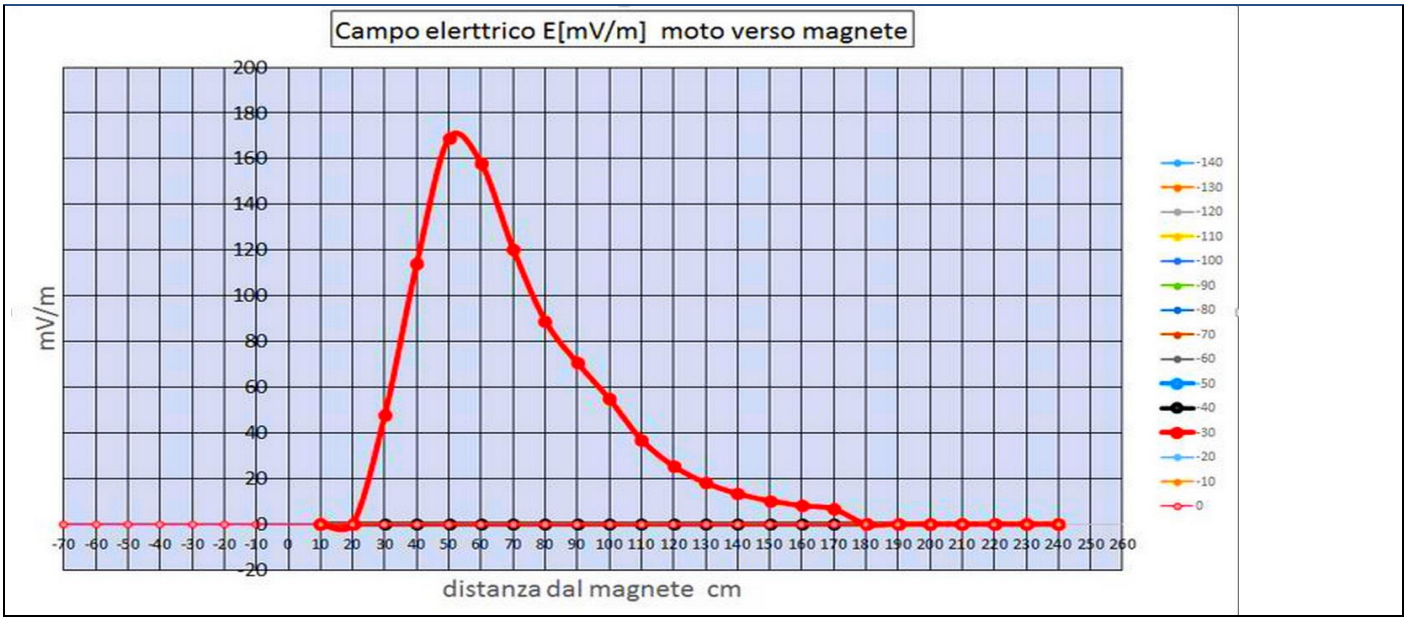
Rolando Milani et al.

Ricalcolo con riduzione della velocità:

Tabella 11 **Esempio 1 bis - Ricalcolo del primo esempio con riduzione della velocità**

Z =	10	20	30	40	50	60	70	80
V =	0	0	10	30	60	80	90	100
E_{Bod}	0	0	48	114	169	158	121	89
E_{Head}								

Figura 5 **Esempio 1 bis - Ricalcolo del primo esempio con riduzione della velocità – Grafico**



Rolando Milani et al.

Calcolo della frequenza:

E_{picco}=169 mV / m; FWHM=84.5 mV / m; X1 = 35 cm; X2 = 85 cm; X2 - X1 = 50 cm; *f* = 1,2 Hz;

VLE = 700 / 1,2 = 583 mV / m Rapporto tra campo elettrico indotto e VLE = 169 / 583= **0,29 (minore del VLE)**

Commento al risultato:

Come si può vedere, con una piccola correzione comportamentale si riesce a rientrare ampiamente nei limiti. È stato sufficiente iniziare a far decrescere la velocità di avvicinamento di alcune decine di centimetri.

5.2 Secondo caso

Il moto rotatorio del capo da parte dell'operatore che, quando si trova in prossimità della consolle del magnete, sposta la sua attenzione frequentemente dal lettino alla consolle sulla macchina e viceversa, è quello che viene preso in considerazione nella sottostante Tabella 12.

Questa operazione viene effettuata diverse volte in un tempo molto breve. In questo esempio si è calcolato il campo E in diverse posizioni rispetto all'asse del magnete X = -30, -40, -50 cm a sinistra del magnete con una ω = 180° / s e un angolo di rotazione di 90° per verificare se vi siano situazioni più critiche di altre. Come si può vedere, anche se la frequenza è uguale a 2 cioè VLE = 350 Mv / m, il campo elettrico indotto raggiunge al massimo il 30% del VLE. Quindi la situazione con questi parametri operativi è accettabile.

Tabella 12	**Esempio 2 - Moto rotatorio del capo da parte dell'operatore, che quando si trova in prossimità della consolle del magnete, sposta la sua attenzione dal lettino alla consolle sulla macchina e viceversa**						
X =	**-100**	**-80**	**-70**	**-60**	**-50**	**-40**	**30**
Z =	**20**	**20**	**20**	**20**	**20**	**20**	**20**
ω =	**180**	**180**	**180**	**180**	**180**	**180**	**180**
Δθ =	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**
freq	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**
VLE (mV / m)	**350**	**350**	**350**	**350**	**350**	**350**	**350**
E_{Head}	26	50	69	86	98	105	110
Percentuale di riduzione	8%	14%	20%	25%	28%	30%	32%

5.3 Terzo caso

Lo scenario rappresentato dai valori riportati nella sottostante Tabella 13 è emblematico per il personale di pulizia, figura sanitaria che spesso viene trascurata, ma che si pone in situazioni di alto rischio espletando mansioni di pulizia anche all'interno del 'gantry' e che, se interrogata, accusa quasi sempre l'insorgenza di fenomeni di nausea e di fosfeni. Il personale spesso si introduce all'interno del 'gantry' per pulire le superfici ruotando il capo frequentemente a destra e sinistra. Data la scomodità della posizione, gli addetti cercano di impiegare il minor tempo possibile agendo con movimenti veloci. Per l'analisi abbiamo calcolato il campo elettrico in vari punti all'interno del 'gantry'.

Tabella 13	Esempio 3 - Scenario riguardante l'operatività che tipicamente coinvolge il personale delle pulizie						
X =	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Z =	**0**	**-10**	**-20**	**-30**	**-40**	**-50**	**-60**
ω =	**180**	**180**	**180**	**250**	**250**	**250**	**250**
Δθ =	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**
freq	**2**	**2**	**2**	**2,78**	**2,78**	**2,78**	**2,78**
VLE (mV / m)	**350**	**350**	**350**	**252**	**252**	**252**	**252**
E_{Head} (mV / m)	**195,00**	**216,00**	**227,00**	**322,00**	**327,00**	**327,00**	**327,00**
E / VLE	**55,7%**	**61,7%**	**64,9%**	**127,8%**	**129,8%**	**129,8%**	**129,8%**

Commento al risultato:

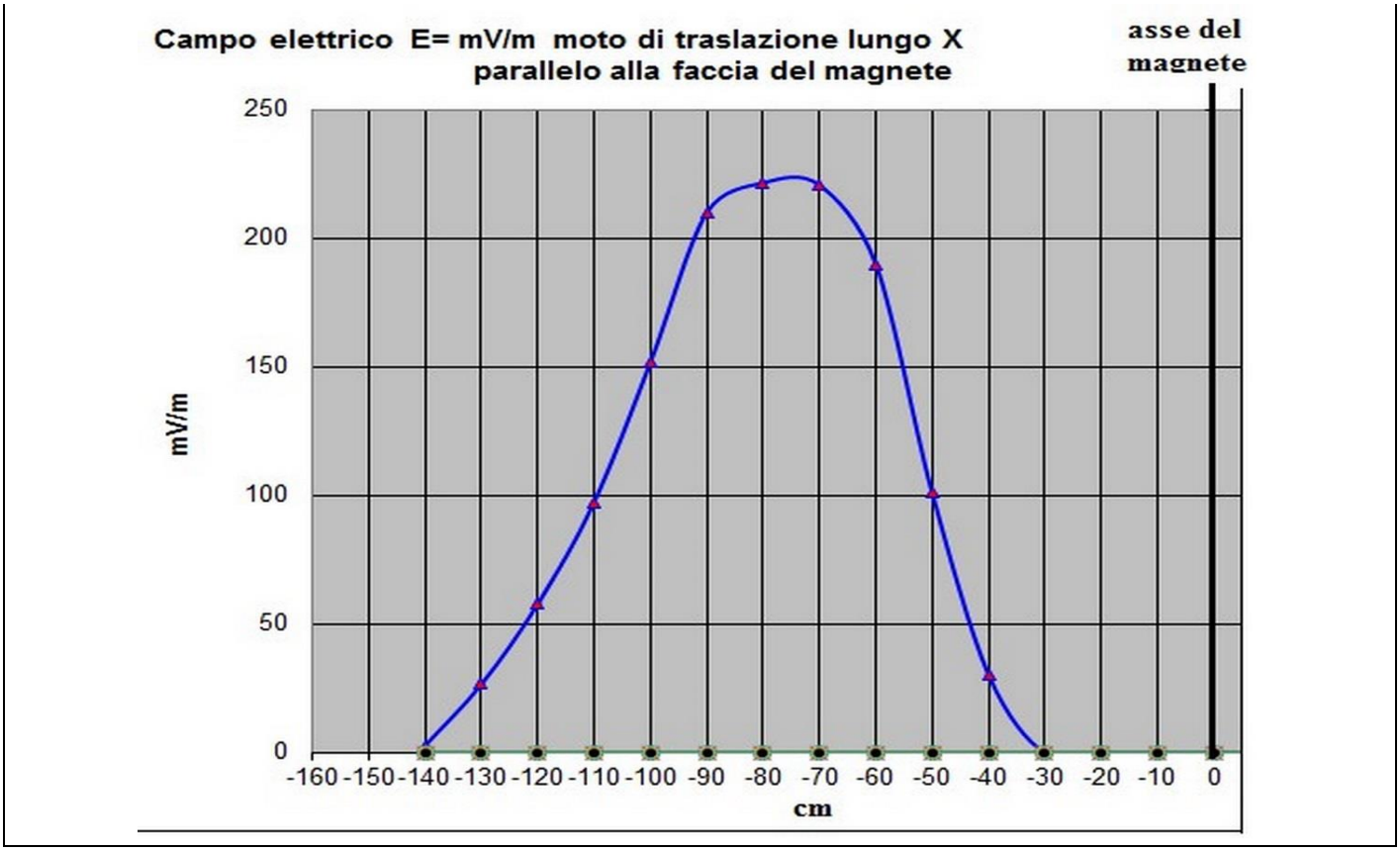
Come si può chiaramente vedere i VLE sono superati di circa il 30%. Si tenga presente che abbiamo valutato una situazione media poiché ogni impresa agisce in maniera molto differente. È stato interessante constatare come tutto il personale affermasse l'insorgenza di fenomeni sensoriali a fronte di un grande riscontro tra quanto da noi calcolato e quanto indicato dalla normativa.
La soluzione del problema è stata ottenuta cambiando radicalmente la strumentazione operativa e indicando al datore di lavoro la costruzione di attrezzi adatti allo scopo che permettessero di pulire il 'gantry' da una posizione esterna.

5.4 Quarto caso

La traslazione lungo la superficie del gantry è analizzata nella successiva Tabella 14 e in Figura 6. Una delle consuete operazioni compiute dal personale tecnico è quella di spostarsi parallelamente alla superficie del magnete per andare a prendere o riporre le bobine. Durante questa manovra in realtà si ha la somma di diverse componenti, come precedentemente accennato. Il moto roto traslatorio è il più frequente, tuttavia si è notato che intervengono piccoli angoli di rotazione.

Tabella 14	Traslazione lungo la superficie del 'gantry'							
X =	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
Z =	30	30	30	30	30	30	30	30
V =	0	20	50	80	90	100	120	125
E_{Bod}	0	30	101	190	221	222	210	152
E_{Head}								

Figura 6 Traslazione lungo la superficie del 'gantry' - grafico



Rolando Milani et al.

Calcolo della frequenza:

E_{picco}=222 mV / m; FWHM=111 mV / m; X1 = 50 cm; X2 = 110 cm; X2 - X1 =6 0 cm; *f* = 1.7 Hz;

VLE = 700 /1,7 = 420 mV / m

Rapporto tra campo elettrico indotto e VLE: E / VLE = 420 / 220 = **0,53 (minore del VLE)**

Commento al risultato:

Il campo elettrico risulta ampiamente entro i limiti anche se il caso considerato non tiene conto degli aspetti rotazionali che si vanno a sommare alla fase rettilinea. Questo, tuttavia, vuole essere solo un esempio su come affrontare l'analisi del problema.

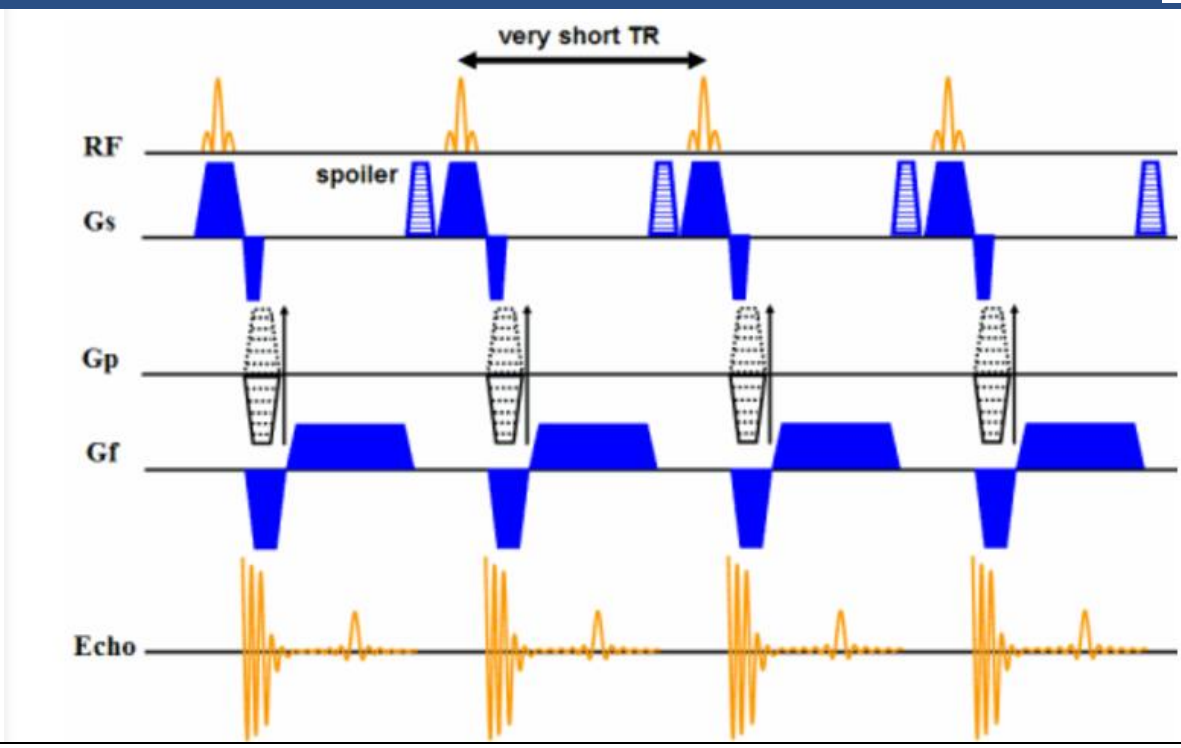
6. VALUTAZIONE DEL RISCHIO PER ESPOSIZIONE AI GRADIENTI

Alcune figure professionali come anestesisti e cardiologi sono spesso costretti a rimanere in sala magnete per vigilare sul paziente in gravi condizioni. In tali situazioni essi sono soggetti a forti campi elettromagnetici generati dalla macchina stessa specialmente durante sequenze particolari.
Per questo motivo è importante valutare la loro esposizione ai campi elettromagnetici al fine di adempiere ai disposti del d.lgs. 159/2016.
Scopo della presente sezione, poiché tale entità del rischio non può essere calcolata, è quello di fornire una metodica di misura che permetta all'Esperto Responsabile di rendersi conto delle esposizioni alle radiofrequenze tenendo presente la complessità tutte le problematiche inerenti le esposizioni.

6.1 Procedure operative

Al fine di valutare correttamente l'esposizione ai gradienti è opportuno impostata una sequenza tale da fornire il valore più elevato di radiofrequenza. Nella Figura 7 è indicata la sequenza utilizzata per le sequenze associate ad alte emissioni nel range di radiofrequenza (RF).

Figura 7 **Sequenza utilizzata per le misure, (sequenza Turbo Gradient Echo) in grado di fornire valori alti di emissione RF**



Gianfranco Baccani et al.

Sequenza Turbo Gradient ECO

G = k * BW / FOV (mT / m)
BW = Bandwidth (Hz)
FOV = Field Ov View (m)

Esempio

BW = 256 KHz; FOV = 20 cm
G = 28,2 mT / m

E' chiaro che a seconda del tipo di macchina la sequenze più significative saranno diverse e ciascuno nella valutazione è libero di scegliere quelle che ritiene opportune (non sempre quelle massime). Ad es. le misure potrebbero essere anche personalizzate per tipologia di esame: al cuore, neuro, torace, addome, ecc.
Considerando che i tempi di salita sono dell'ordine di frazioni di ms (tipicamente 0,2 - 0,3 ms) lo spettro delle frequenze in gioco parte da alcuni KHz fino a decine o centinaia di KHz.

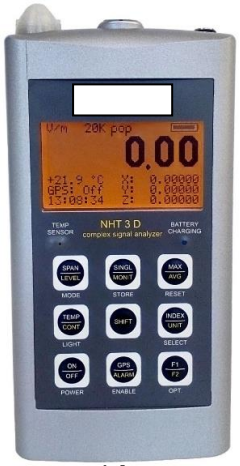
6.2 Strumentazione utilizzata

In Figura 8 viene riportato il set up sperimentale utilizzato per gli scopi di cui al presente lavoro, e che consta dei seguenti elementi.

1. Unità base: (analizzatore per segnali complessi E.M.F.).
2. Probe 01E (sonda per misure su campi elettrici nel range di frequenza 100 KHz÷6,5 GHZ).
3. Probe 33P (sonda per misure su campi elettrici e magnetici nel range di frequenza 5 Hz÷400 KHZ).
4. Software Waves.
5. Il NHT 3D è un analizzatore palmare ad alte prestazioni, progettato per effettuare misure di campo elettrico e magnetico caratterizzato da fattori di forma complessi o impulsivi. Grazie alla intercambiabilità delle sonde, è possibile configurare lo strumento per misure in diversi ambiti e secondo le principali normative di riferimento. Sviluppato principalmente per la misura dei campi elettromagnetici negli ambienti di lavoro, il sistema NHT 3D opera in totale conformità alla Direttiva europea 2013/35/UE[2] e relativo d.lgs. 159 del 1° agosto 2016 che, in recepimento della stessa, aggiorna il Capo IV del d.lgs. 81[4]/2008 per la sicurezza sul lavoro. La modalità di

funzionamento Real Time consente una rapida visualizzazione dei principali indici e dell'andamento del campo nel dominio del tempo e della frequenza, tramite acquisizioni ripetute di finestre da 65536 campioni, con possibilità di configurare un trigger di acquisizione manuale o automatico. La modalità operativa 'monitoring' consente la completa registrazione di tutti i segnali provenienti dalla sonda nella memoria non volatile interna allo strumento; grazie a questa caratteristica è possibile, dopo aver effettuato il download dei dati, l'estrazione di tutte le informazioni ampiezza/frequenza e degli indici relativi al periodo di monitoraggio.

Figura 8 **Esempio di setup sperimentale da utilizzare per le misure di cui al presente lavoro**



Unità base

Probe 33P

Probe 01E

1. Unità base (analizzatore per segnali complessi E.M.F.).
2. Probe 33P (sonda per misure su campi elettrici e magnetici nel range di frequenza 5Hz÷400KHZ).
3. Probe 01E (sonda per misure su campi elettrici nel range di frequenza 100KHz÷6,5GHZ).

6.3 Procedure di misura utilizzate

Le procedure utilizzate per le valutazioni sono quelle del metodo del picco ponderato (WP) così come definito nell'Icnirp 2014[8]. Tale metodo fornisce un indice WP che deve essere <1 per essere conforme al d.lgs. 159/2016. Per quanto scritto nel d.lgs. 159/2016 (art.1.3) il rispetto dei VA coincide col rispetto dei VLE.

6.4 Risultati

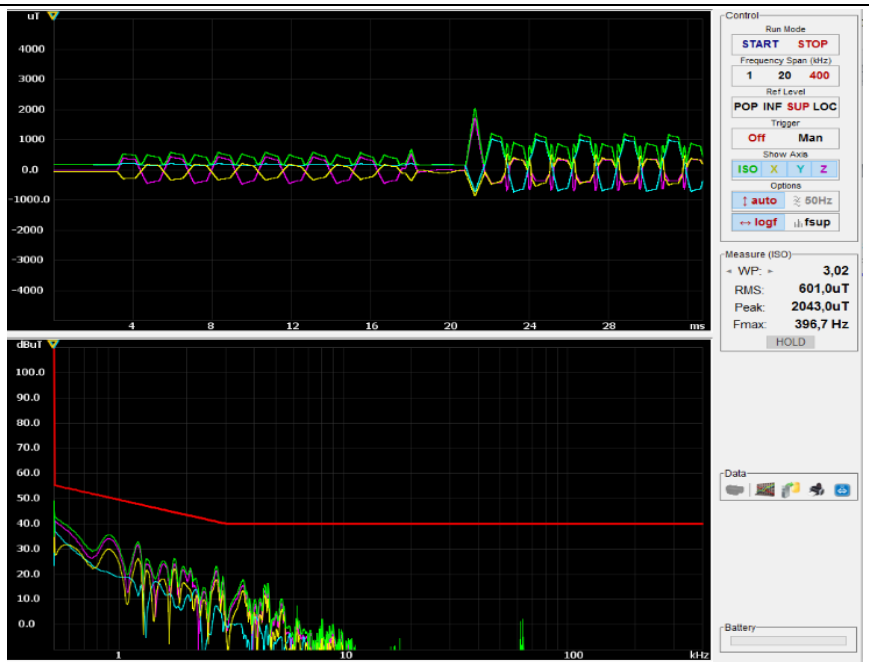
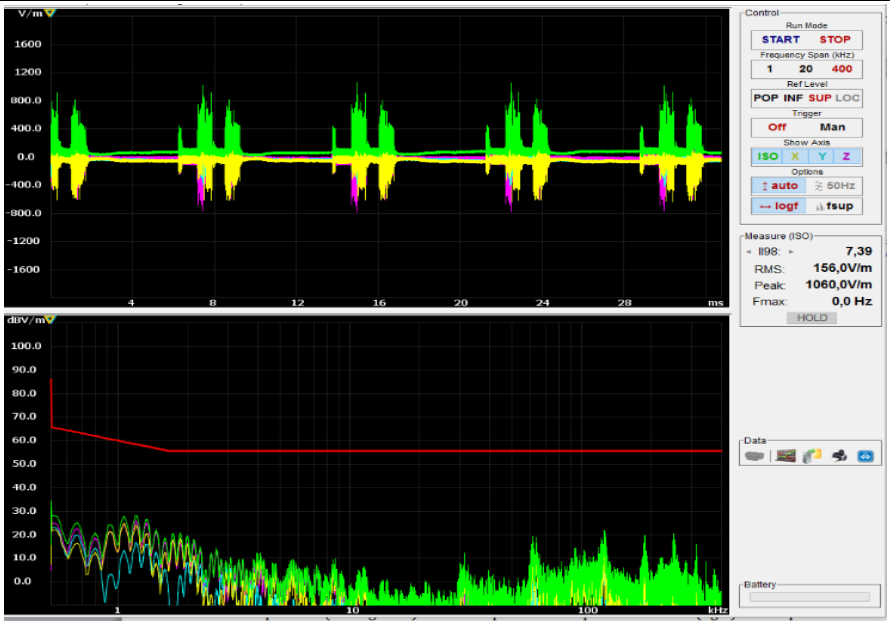
Di seguito, nelle Figure 9 e 10, sono riportati i risultati delle misure congiuntamente ai punti di misura all'interno della sala RM, visualizzabili in figura 11. Le valutazioni sono state effettuate sia per il campo elettrico che per il campo magnetico in rapporto rispettivamente ai valori di riferimento di cui alle Tabelle B1 e B2 del d.lgs 159/2016 (Tabelle 5 e 6 del presente lavoro). I limiti impostati erano quelli per gli effetti sanitari. I valori RMS su tutto il periodo della acquisizione.

Nella Tabella sottostante vengono riportati rispettivamente:

1. Posizione: la posizione della misura
2. CM: Campo Magnetico (da intendersi come componente magnetica del campo elettromagnetico)
3. CE: Campo Elettrico
4. WP: Indice di Picco Ponderato
5. Spettro: campo nel dominio del tempo (sopra) e della frequenza (sotto)

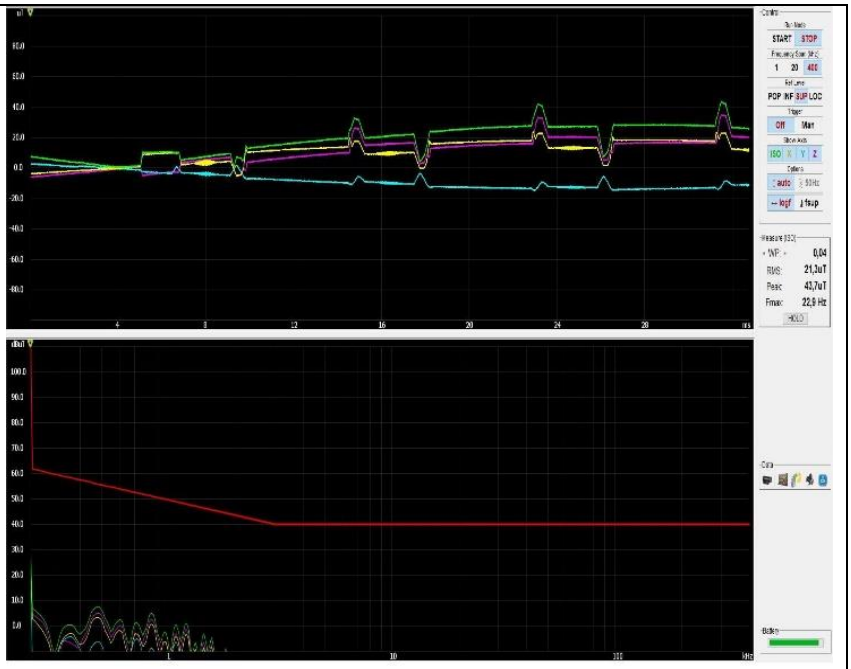
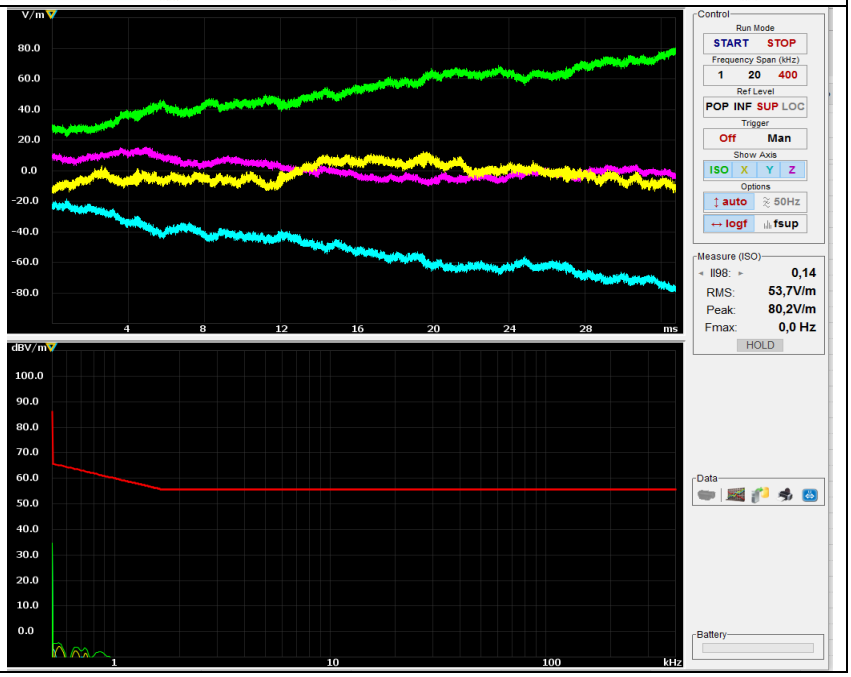
Figura 9 **Risultati delle misure congiuntamente ai punti di misura all'interno della sala RM in rapporto ai valori di riferimento di cui alla tabella B1 del d.lgs. 159/2016**

Posizione	CM (µT)	CE (V/m)	WP	Spettro

1	RMS: 601 Peak: 2043		WP: **3,02**	
1 (inizio del gantry)		RMS: 156 Peak: 1060	WP: **7,39**	

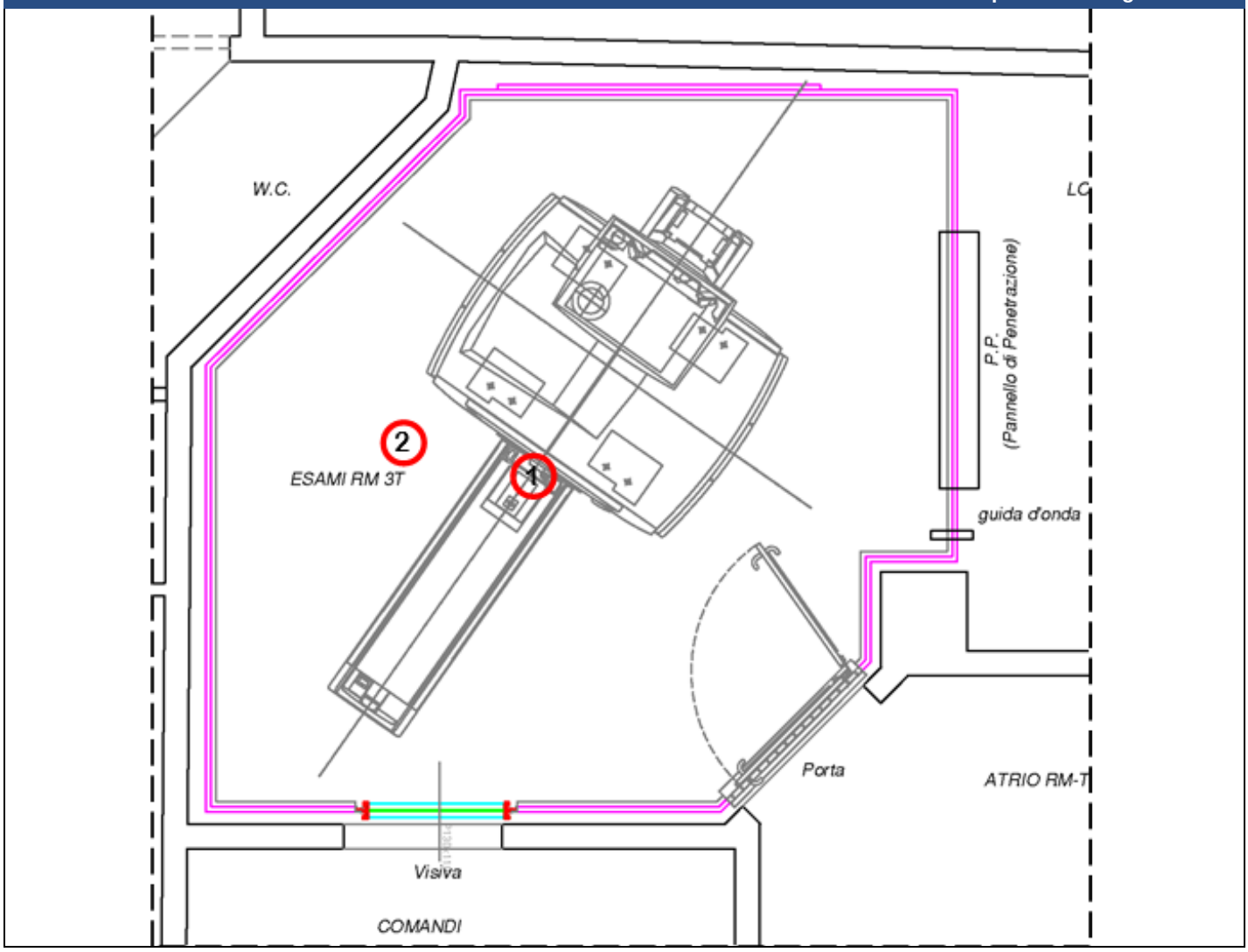
Gianfranco Baccani et al.

Figura 10			**Risultati delle misure congiuntamente ai punti di misura all'interno della sala R.M in rapporto ai valori di riferimento di cui alla tabella B2 del d.lgs. 159/2016**	
Posizione	**CM (µT)**	**CE (V/m)**	**WP**	**Spettro**

2 (1 mt. dal gantry)	RMS: 21,3 Peak: 43,7		WP: **0,04**	
2 (1 mt. dal gantry)		RMS: 53,7 Peak: 80,2	WP: **0,14**	

Gianfranco Baccani et al.

Figura 11 **Sala magnete con l'indicazione dei punti di misura utilizzati per i risultati mostrati nelle precedenti Figure 9 e 10**



Gianfranco Baccani et al.

6.5 Considerazioni sulle misure

Le misurazioni effettuate ci hanno permesso di verificare che nel punto 1 vengono superati i VA sanitari sia per il campo elettrico che quello magnetico, avendo riscontrato un indice W = 7,39 e 3,02 rispettivamente. Risulta quindi evidente che tale posizione operativa non è ammissibile e, qualora circostanze contingenti la prevedano dovrà essere studiato un metodo alternativo.
Nel punto 2 invece i valori dell'indice sono abbondantemente < 1.
Quanto sopra mette in evidenza in maniera chiara che la metodologia utilizzata è in grado di fornire una adeguata risposta alle valutazioni delle esposizioni per operatori all'interno di una sala magnete in circostanze di criticità che possono certamente verificarsi e che per tale motivo devo essere pianificate.
Sarà, quindi, compito dell'Esperto Responsabile effettuare una mappatura più precisa ed accurata secondo le proprie esigenze, delineando quella che è possibile definire quale distanza nominale di rischio elettromagnetico (DNRE).

7. CONCLUSIONI E DEROGHE

Il lavoro elaborato proposto rappresenta – nella sua prima parte - un primo tentativo di dare informazioni preliminari utili da un punto di vista procedurale per consentire nei siti di risonanza magnetica auna ragionevole ed esaustiva applicazione dei principi contenuti nel d.lgs. 159/16, definendo un approccio finalizzato alla minimizzazione dei rischi, e che potrà essere auspicabilmente di ausilio per l'elaborazione del regolamento di sicurezza che, nei vari siti, verrà predisposto dal medico responsabile dell'attività dell'impianto e dall'esperto responsabile della sicurezza.
Per quanto riguarda il suo sviluppo più propriamente sperimentale, il lavoro introduce poi un possibile metodo applicativo nel processo di valutazione dell'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici), in ciò ponendosi però l'obiettivo di andare oltre il dettame normativo, e consentire un approfondimento tecnico scientifico di confronto per gli esperti del settore e che va considerato su base squisitamente volontaria e a fini di implementazione delle proprie conoscenze..
Le basi razionali della nuova normativa introducono comunque – rispetto al quadro di riferimento precedente – una sostanziale deregolamentazione per l'approccio alla gestione del rischio nell'attività clinica, ma al contrario la necessità di codificare molto bene gli scenari di rischio 'straordinari" (operatori costretti a sostare in sala magnete nel corso dell'esame diagnostico) al fine di valutazioni che devono risultare puntuali e sistematiche: tale impostazione può in realtà risentire di considerazioni a modifica ed integrazione nel momento in cui si volesse andare al di là del disposto normativo prendendo per esempio in considerazione il parametro rappresentato dal movimento dell'operatore in sala magnete.
Fermo restando che i VLE sensoriali, se superati e non normalizzabili, determineranno l'obbligo della comunicazione alla Asl, i VLE per gli effetti sanitari, non dovrebbero essere mai superati. In caso di superamento, le cui cause non siano facilmente superabili, ci si può rifare all'art. 212, e richiedere al Ministero del Lavoro la deroga per un uso temporaneo e a condizione che sussistano *'specifiche circostanze documentate, e soltanto per il periodo in cui rimangono tali...*', (ovvero finchè il problema non sia risolto) garantendo sempre e comunque l'adozione di misure di cautela e regole per la minimizzazione dell'esposizione professionale. Una volta ottenuta tale deroga, il datore di lavoro stesso, per il tramite dell'Esperto Responsabile nominato formalmente per quel tomografo RM, dovrà infatti codificare e mettere in atto, norme comportamentali onde comunque perseguire la minimizzazione delle esposizioni.
E' giusto rappresentare che, almeno in linea di principio, l'istanza di deroga di fatto non presupporrà – a meno di risposte che si potranno ritenere come 'eccezionali' - riscontri negativi da parte delle Autorità Competenti, e quindi l'impossibilità di utilizzare la diagnostica RM, ma andrà piuttosto intesa come una sorta di notifica che quella determinata struttura farà alle medesime sul fatto che potrà infrangere temporaneamente i limiti di esposizione occupazionali fissati per legge, e che quindi adotterà tutte le misura di cautela necessarie a salvaguardare comunque nel modo ottimale la protezione dei lavoratori. È probabile, in sintesi, che l'emanando decreto, potrà dirimere gli eventuali dubbi residui sull'applicazione della nuova norma e ribadire la centralità della figura dell'Esperto Responsabile per la sicurezza, oggi ancor più elemento professionale irrinunciabile di garanzia per gli aspetti connessi alla sicurezza dei lavoratori operanti in risonanza magnetica.
Ciò premesso, le misure e valutazioni che le figure deputate alla stima e minimizzazione del rischio dovranno fare anche al fine di intraprendere le necessarie azioni di rimedio, e di attivare le eventuali procedure tecnico amministrative previste ai sensi di legge verso le competenti autorità locali o centrali, potranno ricomprendere anche tutti quei dati di caratterizzazione delle apparecchiature che i fornitori dei tomografi dovranno obbligatoriamente fornire. Tale obbligo a carico del fabbricante risulta infatti ineludibile, dovendo il medesimo garantire sia gli adempimenti di cui alla direttiva europea sui dispositivi medici, come rivista nelle sue varie modifiche succedutesi sin dal 1992 e fino al 2007, e sia a quelli correlati all' attuazione di quanto contenuto nelle norme internazionali di buona tecnica relative alla risonanza magnetica (ad esempio, la Norma CEI EN 60601-2-33[9]).

8 BIBLIOGRAFIA

1. Decreto Legislativo 1° agosto 2016, n. 159. Gazzetta Ufficiale n°192 del 18/08/2016.
2. Direttiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 26 giugno 2013 su “Disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) (ventesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE) e che abroga la direttiva 2004/40/CE”.
3. Direttiva 2004/04/CE. Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea L 159, 30 aprile 2004 ed errata corrige L 184 del 24 maggio 2004.
4. Decreto legislativo 9 aprile 2008, n. 81, Gazzetta ufficiale n° 101 del 20 aprile 2008.
5. Decreto ministeriale 02-08-1991. Gazzetta Ufficiale n°194 del 20 agosto 1991.
6. R. Milani, S. Coda, G. Baccani, F. Campanella, M. Mattozzi, P. Ferrari. Indicazioni operative per la valutazione del rischio all'esposizione professionale ai campi magnetici statici nella risonanza magnetica ad alto campo. Fisica in Medicina. 2009;188-200.
7. Measurements of Occupational Exposure to Switched Gradient and Spatially-Varying Magnetic Fields in Areas Adjacent to 1,5 T Clinical MRI Systems. JMRI. 2007;26:1346-1352.
8. ICNIRP guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time varying magnetic fields below 1 hz. ICNIRP 2014 HEALTH PHYSICS. 2014;106(3):418-425.
9. IEC EN 60601-2-33 Medical electrical equipment - Part 2-33: Particular requirements for the basic safety and essential performance of magnetic resonance equipment for medical diagnosis.