

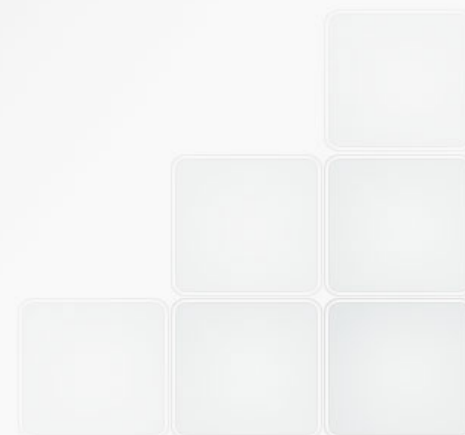


Valutazione dell'esposizione occupazionale in ambienti di risonanza magnetica

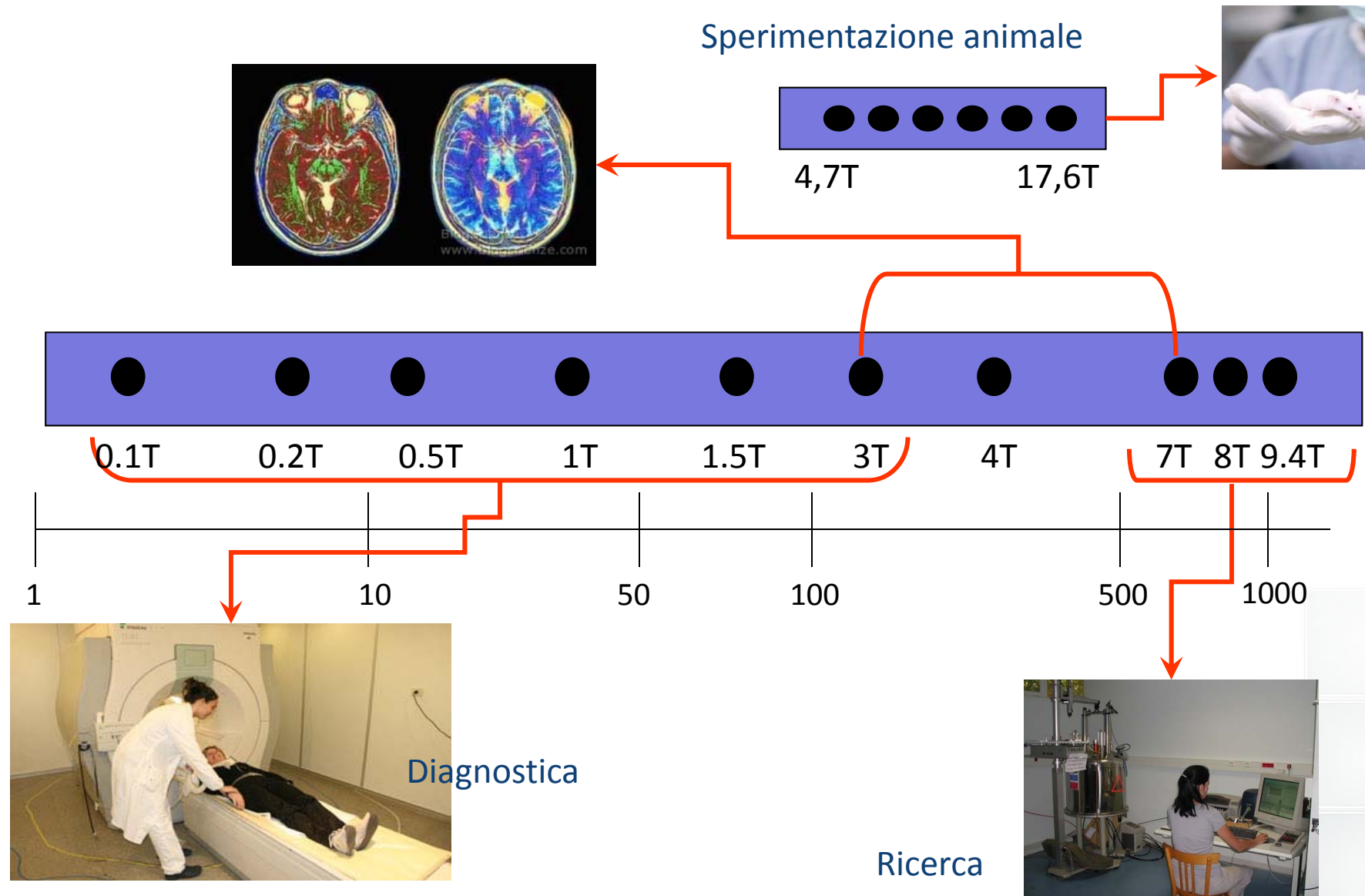
Rosanna Pinto – Ricercatore (rosanna.pinto@enea.it)

Division of Health Protection Technologies

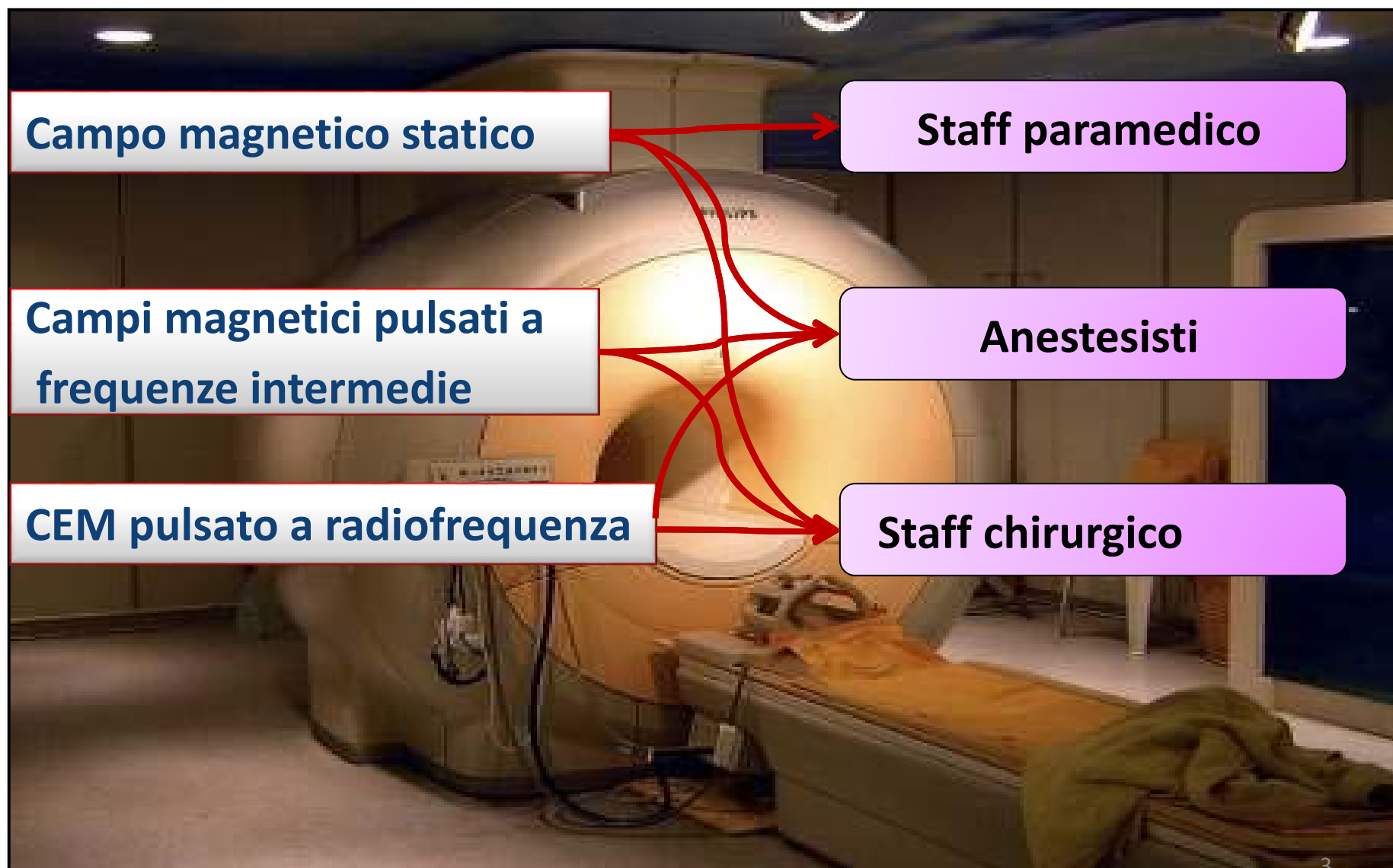
Roma 26 Aprile 2017



Sistemi di RM e applicazioni



Scenario di esposizione in ambiente RM



Quadro normativo di riferimento



ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

Campo magnetico statico

Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. Health Physics , 2009.

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. Health Physics, 2014

Campi magnetici pulsati a frequenze intermedie

Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz). Health Physics , 2010.

CEM pulsato a radiofrequenza

Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics , 1998.

DIRETTIVA 2013/35/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 26 giugno 2013 sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici)

PROTEZIONE DAGLI EFFETTI ACUTI

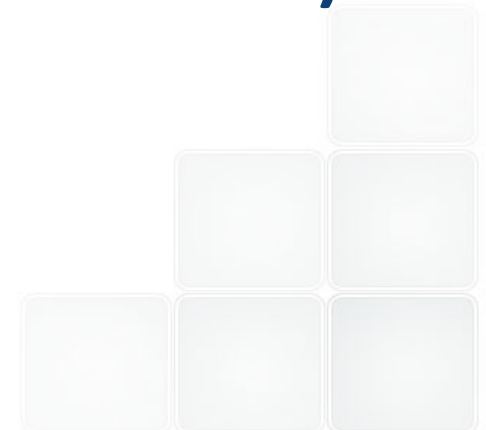
Quadro normativo italiano



Dlgs 81/2008 e s.m.i. : obbligo da parte del datore di lavoro di valutare tutti i rischi a cui i lavoratori sono esposti.

Dlgs 159/2016

Recepimento della Direttiva 2013/35 UE
Esposizione occupazionale ai CEM
Incorpora le linee guida ICNIRP 2010
(per gli effetti di stimolazione fino a 10 MHz)



Grandezze di base delle linee guida



STRUTTURA A DUE LIVELLI

⇒ **LIMITI DI BASE:** fissati in termini delle grandezze dosimetriche proprie delle interazioni bioelettromagnetiche:

- o Campo elettrico indotto (1 Hz-10 MHz)
- o SAR (100 kHz-10 GHz)
- o densità di potenza (tra 10 e 300 GHz)

⇒ **LIVELLI DI RIFERIMENTO:** fissati in termini delle grandezze esterne (valori efficaci imperturbati):

- o campo elettrico (E , V/m)
- o campo magnetico (H , A/m)
- o densità del flusso magnetico (B , T)
- o densità di potenza (J , W/m²)

I livelli di riferimento vengono forniti per le condizioni di massimo accoppiamento del campo con l'individuo esposto e garantiscono quindi la massima protezione.

Devono intendersi come valori mediati sull'intero corpo dell'individuo esposto ma con l'importante avvertenza che non devono essere comunque superati i limiti di base per l'esposizione localizzata

Campi a RF

I campi elettromagnetici a RF sono generati da bobine la cui geometria dipende dalla frequenza e dalla tipologia di volume da analizzare (settoriale, organo specifico, total body). Il segnale è una sinusoide di frequenza opportuna, modulata in ampiezza con impulsi della durata di alcuni ms. Questo tipo di segnale è necessario per far ruotare gli spin di 90° , 180° o di un qualsiasi altro angolo specificato dalla sequenza di impulsi; la bobina di RF, inoltre, riceve il segnale proveniente dagli spin presenti all'interno del corpo. La frequenza della portante è legata all'intensità del campo B statico tramite l'equazione di Larmor



$$f = \gamma B$$

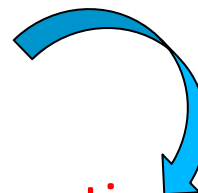
B [T]	f [MHz]
1	42.58
1.5	63.86
3	127.71
7	298

Effetti biologici a RF e quadro normativo



assorbimento di energia elettromagnetica

riscaldamento di organi e tessuti



La sperimentazione animale indica come soglia di danno alla salute un innalzamento costante della temperatura pari a 1°C

Ciò corrisponde a un valore di SAR (Specific Absorption Rate) mediato su tutto il corpo di 4 W/kg per 30 min di esposizione

In questo intervallo di frequenze le linee guida ICNIRP 1998 e la Direttiva Europea fissano gli stessi livelli di riferimento

Per i lavoratori il valore di SAR limite mediato su tutto il corpo è di 0.4 W/kg



f [MHz]	E [V/m]	B [μT]	H [A/m]
10-400	61	0.2	0.16

Strumenti di misura

B [T]	f [MHz]	λ [m]
1	42.58	7.0
1.5	63.86	4.7
3	127.71	2.3
7	298	1.0

Nel caso di esposizione occupazionale, nella gran parte dei casi il personale è nella zona di **campo vicino** delle bobine a RF

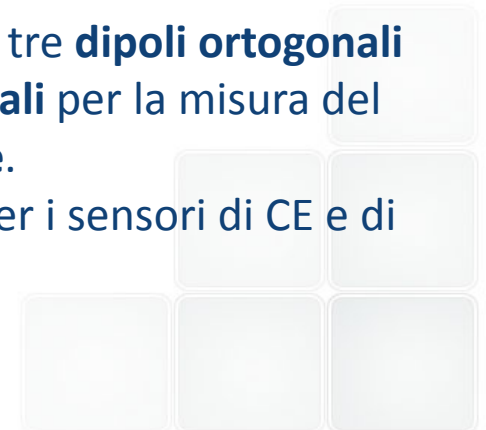
Per una valutazione accurata dell'esposizione è quindi necessario eseguire misure il più possibile puntuali di campo elettrico e campo magnetico.



Sensori a larga banda

I sistemi commerciali sono costituiti da tre **dipoli ortogonali** per la misura del CE e tre **loop ortogonali** per la misura del CM, in grado di fornire **misure isotrope**.

La loro **sensibilità** è di circa 0.01 V/m per i sensori di CE e di 0.01 mA/m per i sensori di CM



Alcune valutazioni a RF



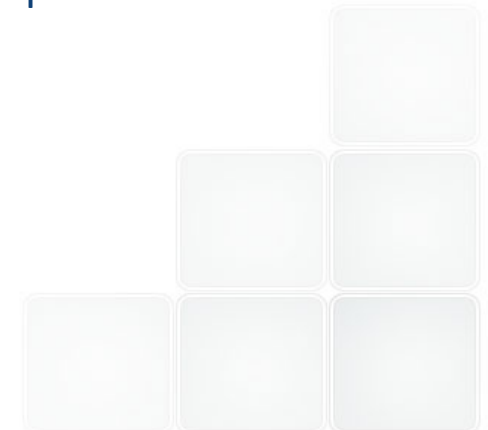
Table 7. Radiofrequency fringe field measurements, root-mean square values. Italics indicate calculated values

B_0 (T)	System	E_1 ($V\ m^{-1}$)	H_1 ($A\ m^{-1}$)	B_1 (μT)	Power density ($W\ m^{-2}$)	Distance on axis to exceed ICNIRP reference level (m)	Sequence	Reference
	ICNIRP reference level	61	0.16	0.2	10			
1.0	Philips Panorama (Philips Healthcare, Best, Netherlands)	84	0.27	0.34	22.7	0.45	Custom ^a	Capstick et al [6,78]
1.5	Philips Intera (Philips Healthcare)				0.3	<RL	MRCP-TSE	Riches et al [77]
1.5	Siemens Avanto (Siemens Healthcare, Erlangen, Germany)	33	0.36	0.45	11.9	0.20	Custom ^a	Capstick et al [6]
3.0	Philips Achieva (Philips Healthcare)	48	0.06	0.08	2.9	<RL	Custom ^a	Capstick et al [6]
7.0	Philips Intera (Philips Healthcare)	<RL	<RL	<RL	<RL	<RL	Custom ^a	Capstick et al [6]

^a ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; MRCP-TSE, MR cholangiopancreatography-turbo spin-echo; RMS, root mean square. 1 ms pulse, 5 μT peak B_1 , 33% duty cycle, 2.88 μT RMS. Italics indicate derived rather than primary measured values.

Mc Robbie 2012

I risultati mostrano che i livelli di riferimento possono essere superati in prossimità del bore
Entro i 45 cm nel caso di uno scanner aperto
Entro i 20 cm nel caso di uno scanner chiuso

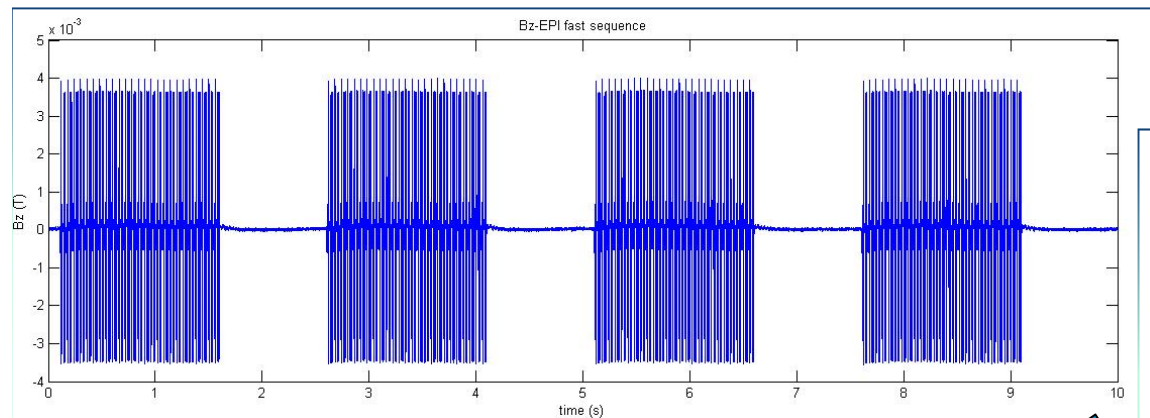


Campi di gradiente (IF)

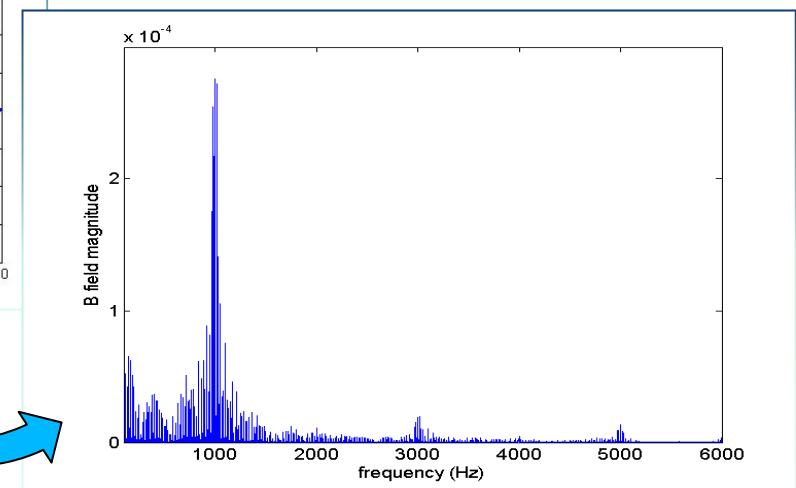
I gradienti di campo magnetico sono utilizzati per la codifica spaziale del segnale: sono creati da apposite bobine di gradiente, situate all'interno del magnete secondo i 3 assi dello spazio, che sovrappongono, per pochi millisecondi, piccoli campi magnetici supplementari al campo magnetico principale.



Segnali pulsati con componenti spettrali fino a pochi kHz



Esempio di segnale Echo Planar Imaging (EPI) con tempo di salita pari a $110 \mu\text{s}$ e componenti spettrali fino a 6 kHz



Effetti biologici a IF e quadro normativo

Per le esposizioni a campi magnetici in questo intervallo di frequenza è stato ben identificato un certo numero di effetti acuti. Questi effetti si possono tutti ricondurre alla **stimolazione diretta di muscoli e nervi** e all'induzione di **magnetofosfeni**. I limiti imposti sono tali da evitare stimolazioni al sistema nervoso centrale, periferico e di altri tessuti

Table 3. Reference levels for occupational exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).

Frequency range	E-field strength E (kV m ⁻¹)	Magnetic field strength H (A m ⁻¹)	Magnetic flux density B (T)
1 Hz–8 Hz	20	$1.63 \times 10^5/f^2$	$0.2/f$
8 Hz–25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^{-2}/f$
25 Hz–300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz–3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2.4 \times 10^5/f$	$0.3/f$
3 kHz–10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

ICNIRP 2010

Direttiva UE

I livelli di azione (LA) inferiori sono imposti per evitare gli effetti sensoriali (fino a 400 Hz) e gli effetti sanitari ($f > 400$ Hz)

I LA superiori sono definiti per evitare la stimolazione elettrica dei tessuti nervosi periferici e autonomi nella testa e nel tronco

Tabella B2

LA per esposizione a campi magnetici compresi tra 1 Hz e 10 MHz

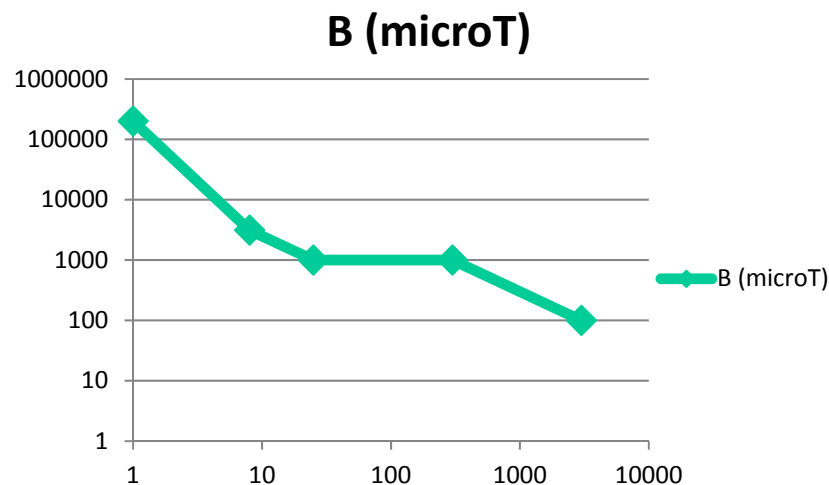
Gamma di frequenza	Induzione magnetica LA (B) inferiori [μT] (RMS)	Induzione magnetica LA (B) superiori [μT] (RMS)	Induzione magnetica LA per esposizione arti a campo magnetico localizzato [μT] (RMS)
$1 \leq f < 8$ Hz	$2,0 \times 10^5/f^2$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$8 \leq f < 25$ Hz	$2,5 \times 10^4/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$25 \leq f < 300$ Hz	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3,0 \times 10^5/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

Come valutare l'esposizione (IF)?

In questo intervallo di frequenza **i limiti variano con la frequenza** e i segnali di gradiente **non sono segnali sinusoidali.....**

In ICNIRP 1998 fu definito il cosiddetto **Metodo Standard**

$$\sum_i \frac{B_i}{BL_i} < 1$$



Le ampiezze delle singole componenti spettrali vengono pesate in modo opportuno, in funzione dei valori limite alle rispettive frequenze. Con il **MS** si assume il caso di esposizione peggiore: tutte le componenti spettrali al loro valore massimo nello stesso istante.

Rischio di valutazione forzosamente cautelativa dell'esposizione.

Statement ICNIRP 2003 (segnali complessi a BF)

Viene introdotto il **Metodo del Picco Ponderato**, in cui le componenti spettrali del segnale vengono pesate secondo i limiti di esposizione tenendo conto anche delle relazioni di fase esistenti tra di esse.

Valutazioni radioprotezionistiche appropriate, caratterizzate da un livello di cautela realmente fondato.

Il metodo del picco ponderato



Con questo metodo i contenuti frequenziali del segnale misurato devono essere pesati tenendo conto sia del modulo che della fase delle componenti spettrali del segnale stesso.

Il metodo del picco ponderato conduce alla determinazione di **un indice (WPI)**, il cui valore deve restare al di sotto dell'unità (o del 100%, se espresso in percentuale) per garantire il rispetto delle prescrizioni normative.

$$WP_{x,y,z}(t) = \sum_i \frac{B_{x,y,z}(f_i)}{B_L(f_i)\sqrt{2}} \cos[2\pi f_i t + \theta_{x,y,z}(f_i) + \varphi(f_i)]$$

$$WP \text{ Index} = \text{Max} \sqrt{WP_x^2(t) + WP_y^2(t) + WP_z^2(t)}$$

t: tempo

$B_L(f_i)$: limite di esposizione alla i^{esima} frequenza f_i

$B(f_i)$: l'ampiezza del campo alla i^{esima} frequenza f_i

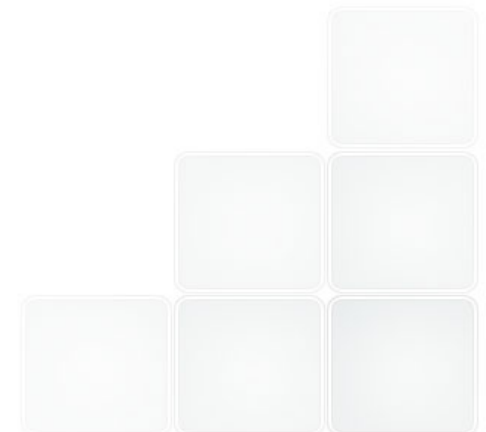
θ_i : la fase del campo alla i^{esima} frequenza f_i

$\varphi(f_i)$: rappresenta lo sfasamento che verrebbe introdotto alla frequenza f_i da una catena di filtri analogici RC del primo ordine, progettata per fornire una risposta di ampiezza in frequenza il più possibile uguale all'inverso del limite $B_L(f)$.

Implementazione nel dominio della frequenza (DF)



- Computare lo spettro del segnale in analisi per ogni componente spaziale dell'induzione magnetica $B(x,y,z)$ misurata
- Computare WPI_i per ogni componente, nel dominio della frequenza, applicando direttamente la formula
- Gli indici così valutati vengono antitrasformati nel dominio del tempo
- Per ogni istante considerato si esegue la radice quadrata della somma quadratica delle tre componenti per valutare **$WPI(t)$**
- Il massimo valore di **$WPI(t)$** è l'indice cercato



Implementazione nel dominio del tempo (DT)

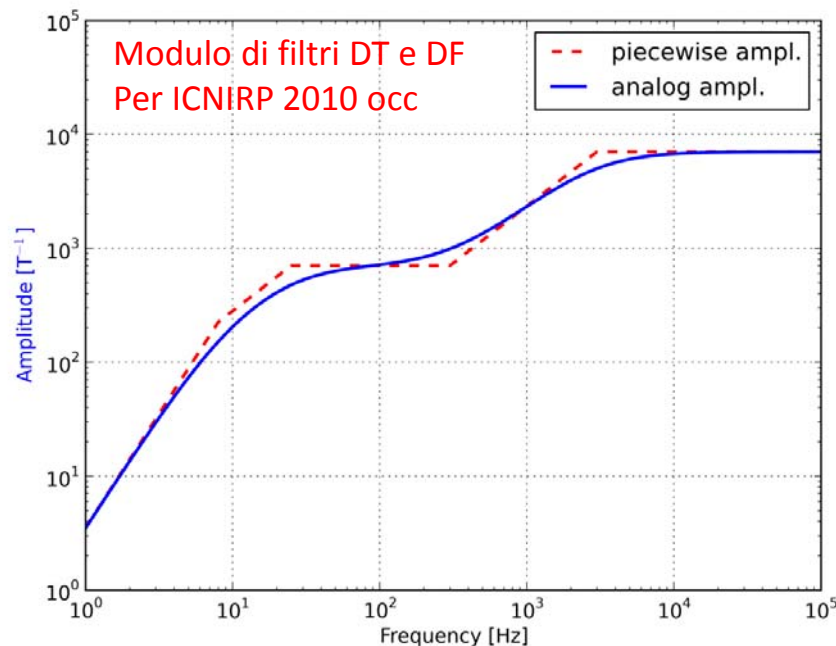


- Si realizza una catena di filtri RC analogici/digitali del primo ordine la cui risposta di ampiezza in frequenza si avvicini il più possibile (l'ICNIRP accetta uno scarto massimo di 3 dB) all'inverso del limite di riferimento.
- Si misura il campo con un sensore a risposta piatta e in grado di fornire per ogni istante le tre componenti del campo
- Si filtra il segnale misurato con il filtro preventivamente implementato in modo hardware o software: l'uscita del filtro rappresenta il WPI nel dominio del tempo per ogni componente
- Si esegue la radice quadrata della somma quadratica delle tre componenti per valutare **WPI(t)**
- Il massimo valore di **WPI(t)** è l'indice cercato

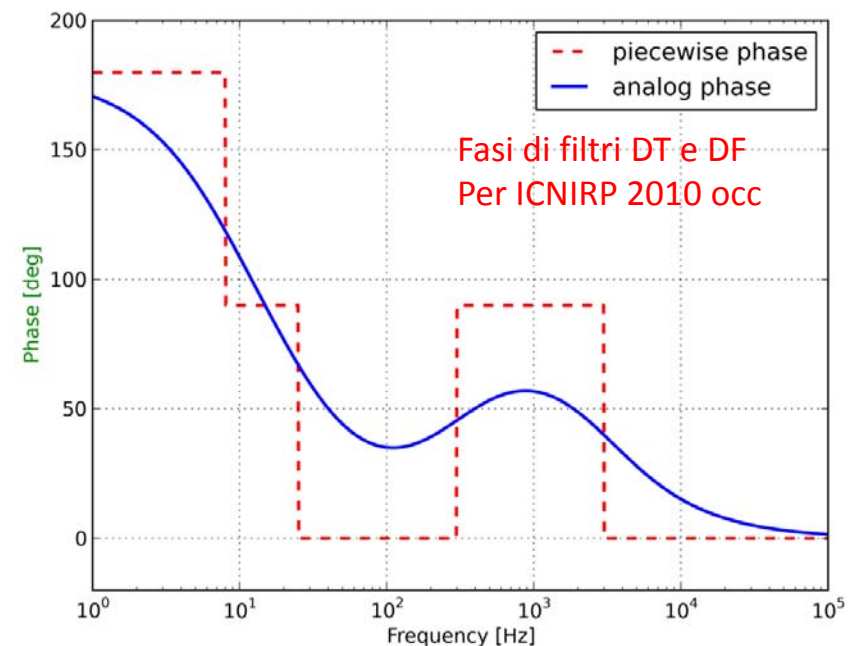


Quale differenza fra i due metodi?

L'ampiezza della funzione di trasferimento del filtro si deve avvicinare il più possibile all'inverso del limite che si vuole verificare



Nella valutazione nel dominio della frequenza viene mantenuto l'andamento a 'spezzata' della funzione di trasferimento del filtro sia per il modulo che per la fase (linea rossa)



Condizioni ICNIRP per il filtro nel dominio del tempo:

Scarto massimo di 3 dB per il modulo

Scarto massimo di 90° per la fase

Come si procede?

Acquisizione della forma d'onda opportunamente campionata del **vettore** induzione magnetica in un punto dello spazio



Implementazione hardware

- Si realizza una catena di filtri analogici RC del primo ordine, la cui risposta di ampiezza in frequenza si avvicini il più possibile all'inverso del limite che si vuole verificare
- Si filtra il segnale fornito dalla sonda
- In questo modo il modulo del segnale viene opportunamente pesato così come a ciascuna componente spettrale del segnale elaborato sarà associato uno sfasamento variabile con la frequenza uguale, per definizione, proprio allo sfasamento aggiuntivo $\phi(f)$ richiesto dalle linee guida ICNIRP.

Implementazione software

- Si applica il metodo alle sequenze misurate con approcci software nel DT o nel DF, con riferimento ai limiti normativi di volta in volta pertinenti
- Il metodo in DT può essere implementato direttamente all'interno di uno strumento per mezzo di un microprocessore e dare in tempo reale il valore dell'indice
- Il metodo in DF richiede una fase di post processing sui segnali acquisiti

Strumenti di misura (IF)

Sensori isotropi in grado di rilevare contemporaneamente le tre componenti spaziali del campo di induzione magnetica

Sensori a risposta piatta nella banda di lavoro

Sensibilità di qualche centinaio di nT

Fondo scala variabile

Per l'implementazione in tempo reale del WPI via software la banda dello strumento non può superare le poche centinaia di kHz, al fine di trovare un compromesso accettabile tra le esigenze di velocità di campionamento e capacità di memoria da una parte e di compattezza, dimensioni, isolamento e autonomia dall'altra.



ELT 400 (1 Hz- 400 kHz)



EHP 50E (1 Hz- 400 kHz)

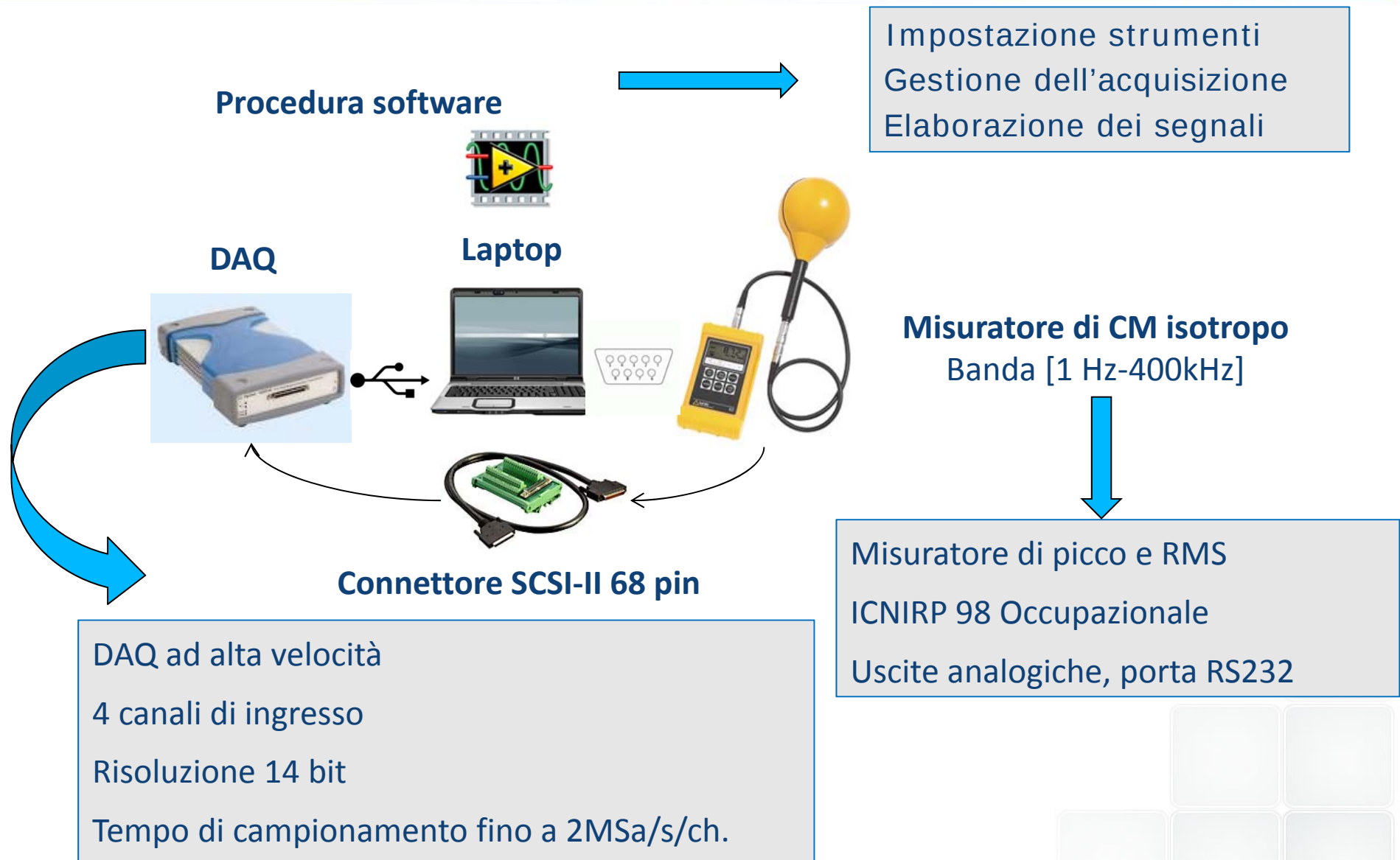


3 T Siemens Magnetom Skyra MRI a corpo intero

Nell'uso pediatrico della risonanza il personale medico può essere presente durante le scansioni per prendersi cura dei pazienti



Catena di misura (IF)



Protocollo di misura



Caratteristiche

14 punti di misura

2 sequenze EPI e 2 sequenze TRUFI

10 s acquisizione

50kS/s/ch

Metodo del picco ponderato nel dominio della frequenza (WPI-DF) e del tempo (WPI-DT)

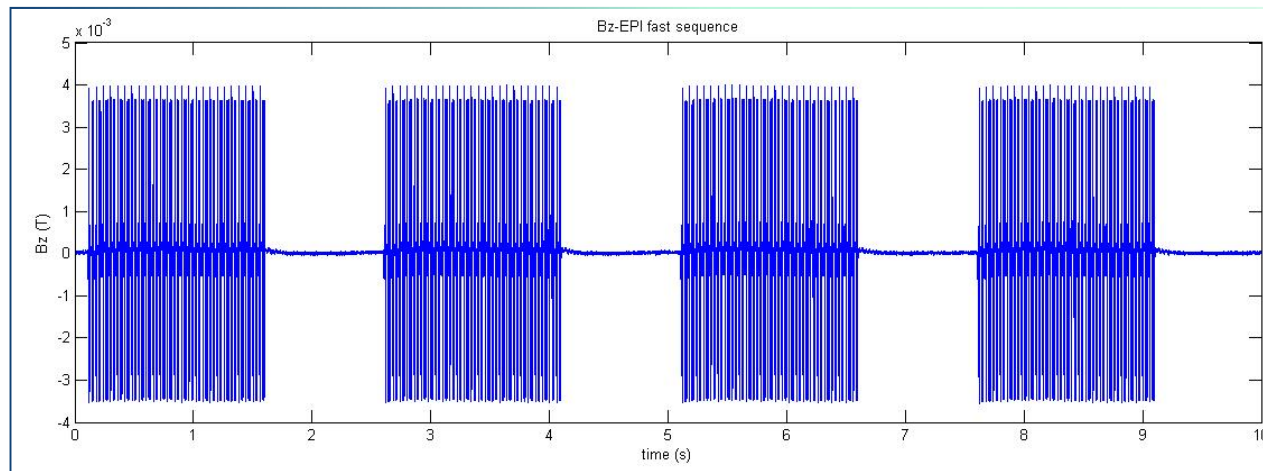
Valutazione del WPI mediante post processing

Posizione del personale medico

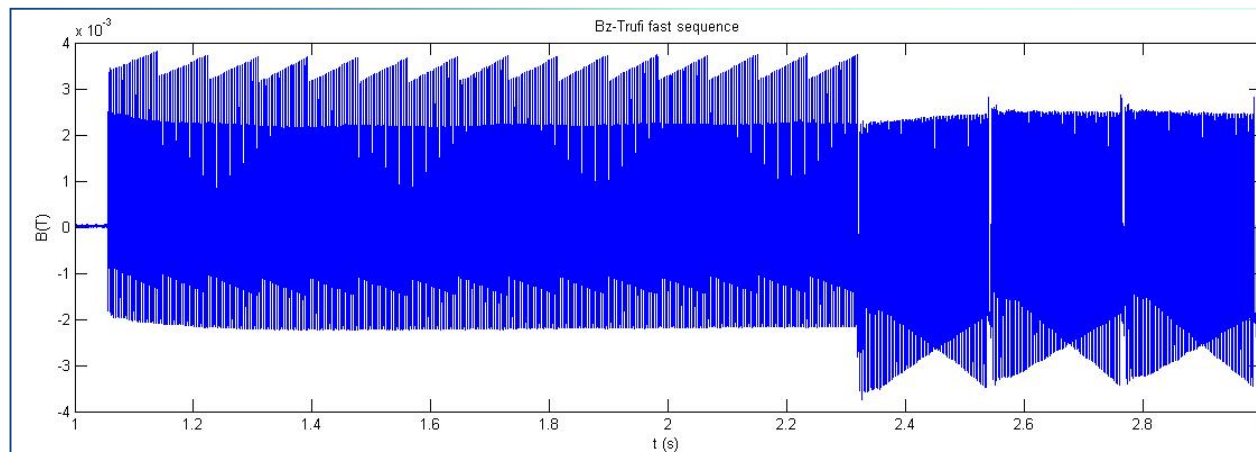
Posizione	Distanza dal bore [cm]	Distanza dal centro del lettino [cm]	Altezza da terra [cm]
P1	50	67	70
P1	50	67	120
P3	50	67	170
P4	100	67	120
P5	150	67	120

Segnali misurati

Quattro diversi segnali: due Echo Planar Imaging (EPI) e due fast imaging with steady precession (TRUFI)



EPI fast



TRUFI fast

Sequenza	Tempo di salita [μs]
EPI norm	130
EPI fast	110
TRUFI norm	176
TRUFI fast	160

Risultati: valutazioni di conformità

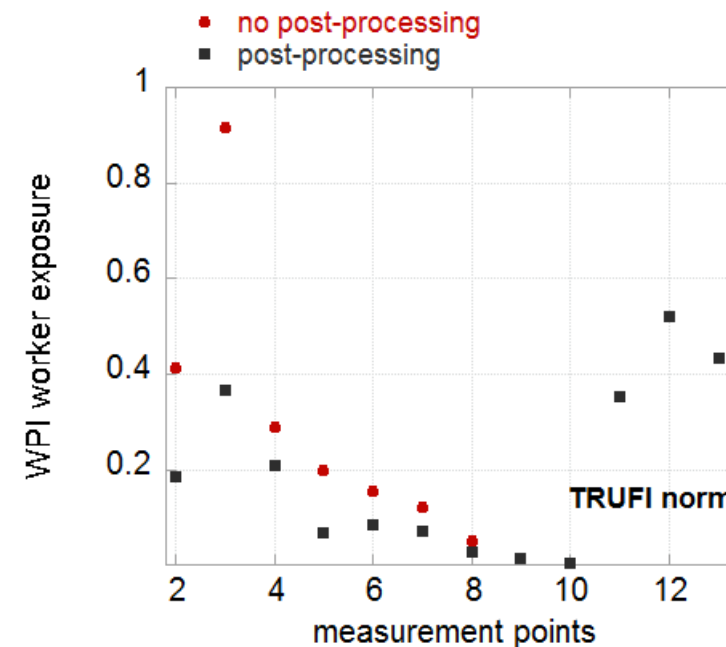
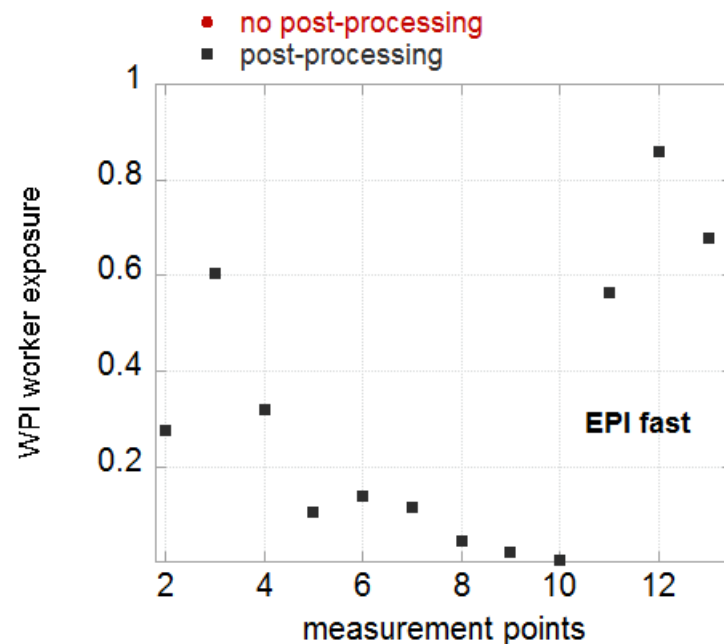


Posizione	WPI_occ DF EPI fast	WPI_occ DT EPI fast
P1	0.11	0.09
P2	0.14	0.12
P3	0.11	0.09
P4	0.05	0.04
P5	0.02	0.02

L'esposizione occupazionale risulta conforme ai livelli di riferimento stabiliti da ICNIRP 2010 per tutte le sequenze misurate

Valutazione nel dominio della frequenza

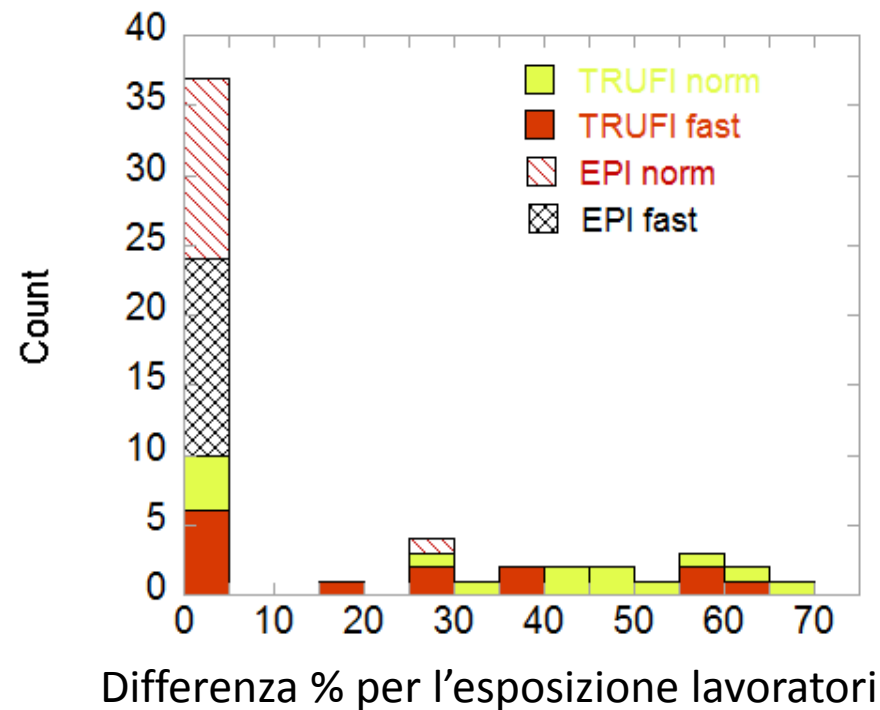
WPI valutati per EPI fast e Trufi norm nei diversi punti di misura



- Le operazioni di trasformati e antitrasformati possono introdurre degli artefatti nei primi e ultimi campioni di WPI(t)
- Togliere i primi e gli ultimi 9 campioni di WPI(t) (su 500.000) è sufficiente per eliminare gli artefatti (post-processing)
- Per le sequenze periodiche (EPI) c'è un effetto trascurabile dell'algoritmo di finestratura della FFT, non così per le frequenze non periodiche (TRUFI)

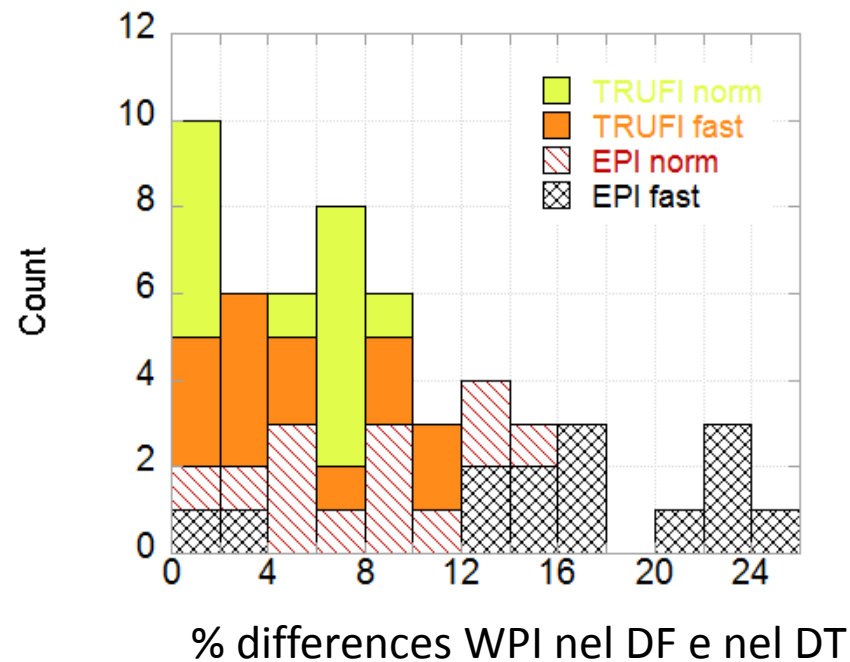
L'effetto del post-processing

Differenze percentuali fra i WPI calcolati nel DF per tutti i segnali con e senza post-processing



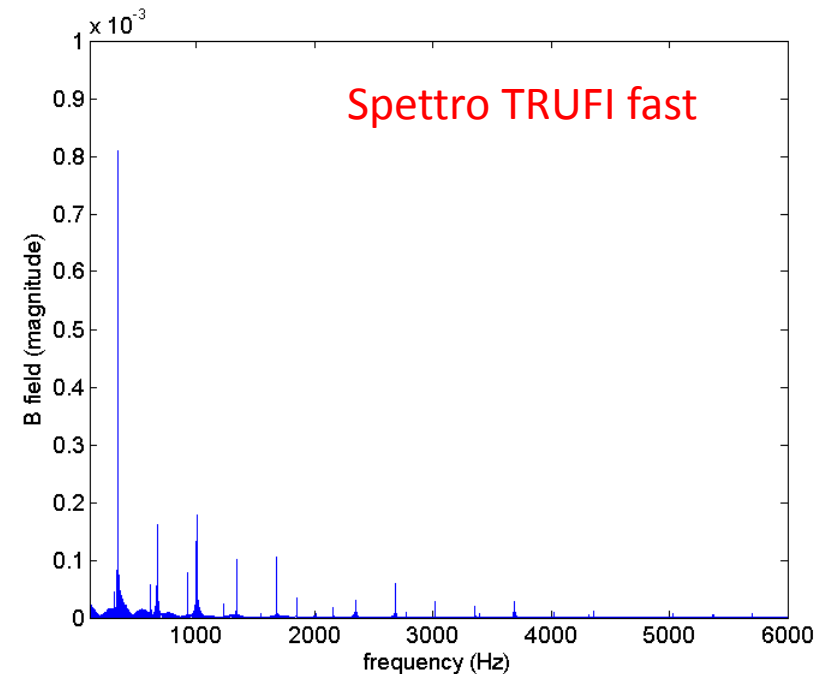
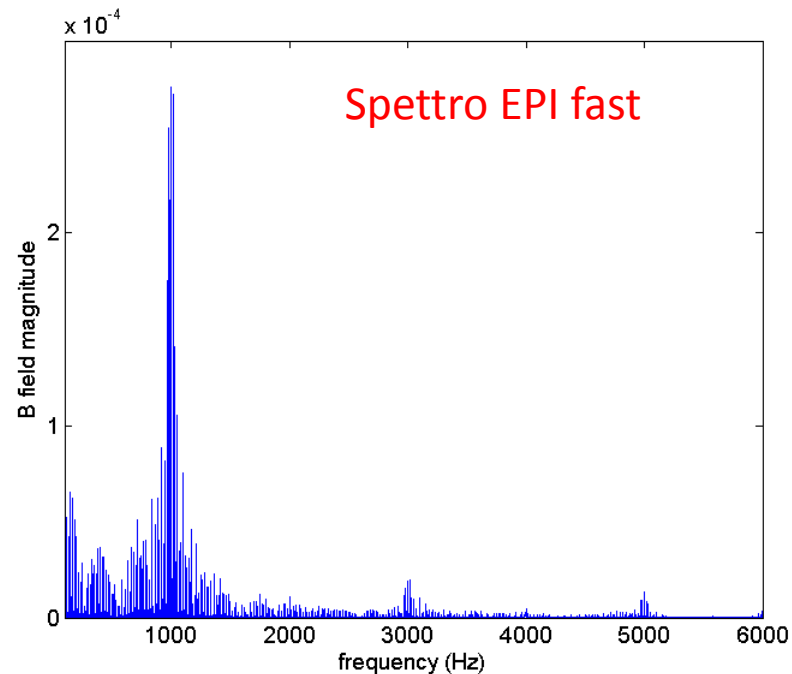
Nell'implementazione nel DT esiste lo stesso problema quando il gradiente è 'acceso' all'inizio del tempo di misura, a causa dell'effetto transitorio del filtro. In questo caso è necessario togliere solo i primi elementi di $WPI(t)$

Analisi DF versus analisi DT



- Entrambi i WPI valutati (DT e DF) sono conformi alle linee guida ICNIRP 2010
- Le differenze maggiori (>24%) per le sequenze EPI
- Le differenze riscontrate sono dovute ai diversi metodi di implementazione nel DF e nel DT
- Si ricorda che i filtri sono diversi anche se in accordo con i requisiti richiesti dalla linee guida

Analisi DF versus analisi DT



Il contenuto spettrale delle sequenze EPI è molto diverso da quello delle TRUFI. Questo rende più evidente l'effetto della differenza dei filtri utilizzati nei due metodi

Campo Statico (0-1 Hz)

Il campo magnetico statico di una risonanza magnetica è prodotto da un solenoide composto da un magnete superconduttore in grado di generare alti campi di induzione magnetica.

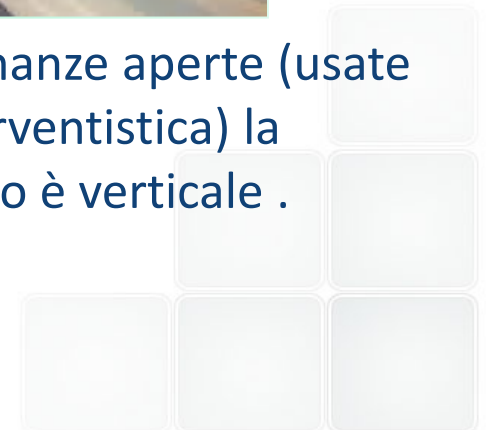
Il campo magnetico statico si estende oltre i confini del bore (fringe field) .



Nel caso dei sistemi chiusi la direzione del campo è orizzontale lungo l'asse del bore.



Nel caso delle risonanze aperte (usate ad esempio in interventistica) la direzione del campo è verticale .



Effetti biologici e quadro normativo



Gli unici effetti riscontrati sono effetti **transitori** di nausea, vertigine, mal di testa, sentore di sapore metallico in bocca ed altri effetti di tipo sensoriale (magnetofosfeni). Sono per lo più legati al movimento della persona in un gradiente spaziale di campo magnetico.

Table 2. Limits of exposure^a to static magnetic fields.

Exposure characteristics	Magnetic flux density
Occupational ^b	
Exposure of head and of trunk	2 T
Exposure of limbs ^c	8 T

ICNIRP 2009

esposizione non controllata: qualsiasi tipo di esposizione occupazionale (**2 T**)

esposizione controllata: i lavoratori sono informati ed addestrati a pratiche di lavoro finalizzate a controllare gli effetti indotti dal movimento in campo magnetico statico (**8 T**)

Per l'esposizione a campi magnetici statici (0 Hz) ICNIRP 2009 e Direttiva UE coincidono



Quadro normativo: DIRETTIVA 2013/35/EU



DIRECTIVE 2013/35/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL

of 26 June 2013

on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC

Table A1

ELVs for external magnetic flux density (B_0) from 0 to 1 Hz

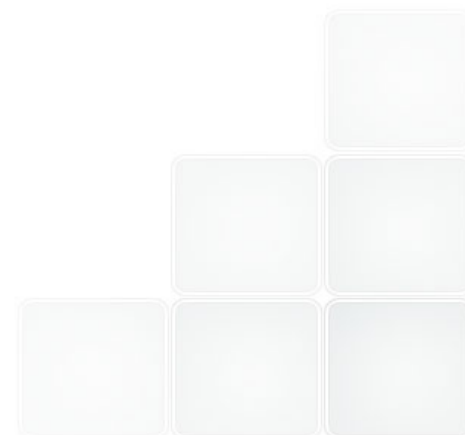
	Sensory effects ELVs
Normal working conditions	2 T
Localised limbs exposure	8 T
	Health effects ELVs
Controlled working conditions	8 T

The health effects ELV for controlled working conditions (Table A1) is applicable on a temporary basis during the shift when justified by the practice or process, provided that preventive measures, such as controlling movements and providing information to workers, have been adopted.

Quadro normativo (0-1 Hz) ICNIRP



- A Marzo 2014 sono uscite le linee guida ICNIRP volte a proteggere i lavoratori dagli effetti derivati dall'esposizione a campi magnetici tempo-variabili al di sotto di 1 Hz
- Effetti sensoriali transitori che possono inficiare l'abilità lavorativa
- Effetti di stimolazione del sistema nervoso periferico provocati dal campo elettrico indotto dal campo magnetico variabile nel tempo.
- Sono di fatto dedicate quasi esclusivamente agli operatori di risonanza magnetica.
- Anche in questo caso c'è la distinzione fra esposizione controllata e non controllata



Quadro normativo (0-1 Hz) 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

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

Table 1. Exposure restrictions for controlling movement in a static magnetic field and exposure to a time-varying magnetic field below 1 Hz. Above 1 Hz the basic restrictions and the reference levels are presented in the ICNIRP (2010) guidelines. For uncontrolled exposure the reference levels for a magnetic flux density may be converted to dB/dt by using (eqn 5).

Basic restrictions		
Frequency f (Hz)	ΔB (T) ^a	$B_{\text{peak to peak}}$ (T)
Critical effect	Vertigo due to movement in static B field	Vertigo due to time-varying B field
Exposure condition ^b	Uncontrolled	Uncontrolled
0	2	
0–1		2
0–0.66		
0.66–1 ^c		

ICNIRP 2014

The objective of this guideline is to prevent peripheral nerve stimulation and to minimize the possibility of transient sensory effects as a consequence of electric fields induced in the human body by movements in static magnetic

^aThe maximum change of magnetic flux density ΔB is determined over any 3 s period.

^bFor controlled exposure conditions, a ΔB of 2 T may be exceeded.

Quadro normativo (0-1 Hz) ICNIRP



Table 1. Exposure restrictions for controlling movement in a static magnetic field and exposure to a time-varying magnetic field below 1 Hz. Above 1 Hz the basic restrictions and the reference levels are presented in the ICNIRP (2010) guidelines. For uncontrolled exposure the reference levels for a magnetic flux density may be converted to dB/dt by using (eqn 5).

Frequency f (Hz)	Basic restrictions				Reference levels	
	ΔB (T) ^a	$B_{\text{peak to peak}}$ (T)	Internal electric field strength [V m ⁻¹ (peak)]		dB/dt [T s ⁻¹ (peak)]	
Critical effect	Vertigo due to movement in static B field	Vertigo due to time-varying B field	PNS effects due to movement in static B field and due to time-varying B field	Phosphenes due to movement in static B field and due to time-varying B field	PNS effects due to movement in static B field and due to time-varying B field	Phosphenes due to movement in static B field and due to time-varying B field
Exposure condition ^b	Uncontrolled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled
0	2					
0-1		2				
0-0.66			1.1	1.1	2.7	2.7
0.66-1 ^c			1.1	0.7/f	2.7	1.8/f

HEALTH

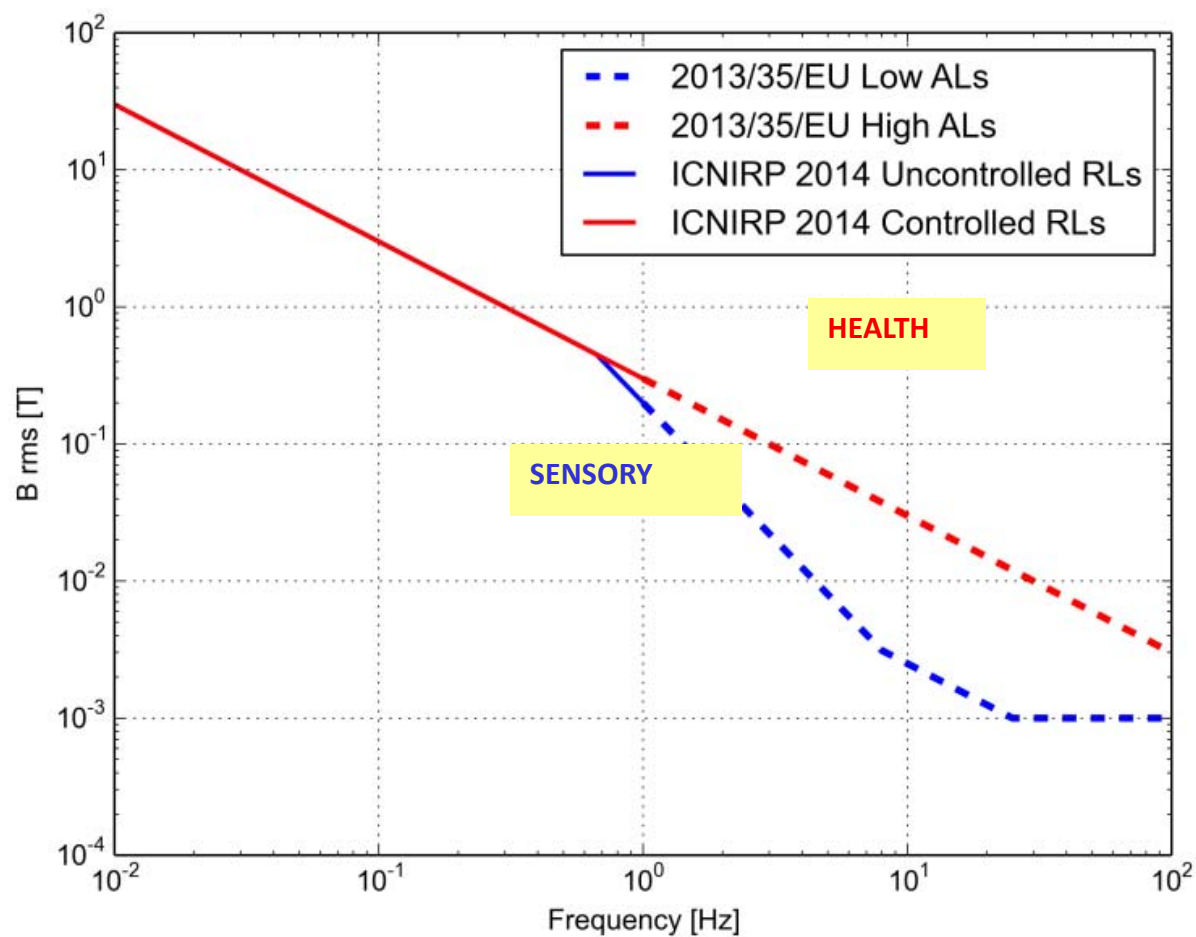
SENS.

Table B2

ALs for exposure to magnetic fields from 1 Hz to 10 MHz

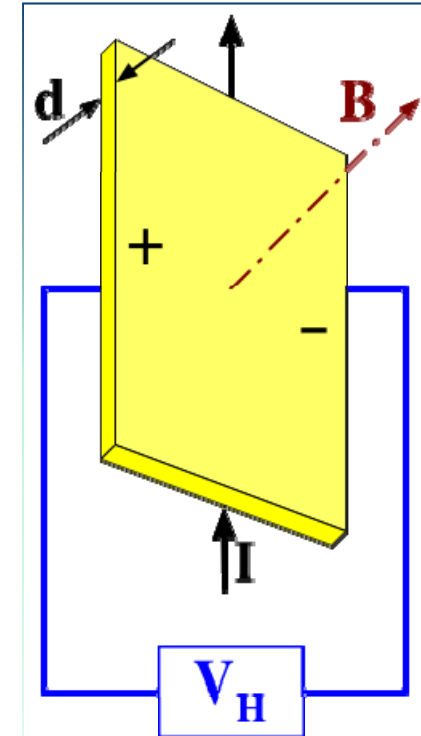
Frequency range	HEALTH	SENS.
	Magnetic flux density Low ALs(B) [μT] (RMS)	Magnetic flux density High ALs(B) [μT] (RMS)
$1 \leq f < 8$ Hz	$2,0 \times 10^5 / f^2$	$3,0 \times 10^5 / f$

Come arrivare a una sintesi?



Sensori per la misura di B (0-1 Hz)

In un circuito elettrico di sezione S e percorso da corrente I , sottoposto a un campo di induzione magnetica B ortogonale al verso di percorrenza della corrente, si verifica **l'effetto Hall**, che consiste nella formazione di una differenza di potenziale elettrico (V_H) fra i capi della sezione del circuito. Collegando questi capi ad un voltmetro è possibile risalire all'intensità del campo magnetico essendo questo in relazione con la differenza di potenziale misurata.



- All'interno del bore il campo B ha una componente unica.
- Nella zona di fringe field esistono anche le altre componenti quindi è necessario l'utilizzo di un **sensore isotropo**.
- Sensori con banda passante di **qualche kHz**
- Fondo scala di almeno **3 T**

Alcune valutazioni di campo statico



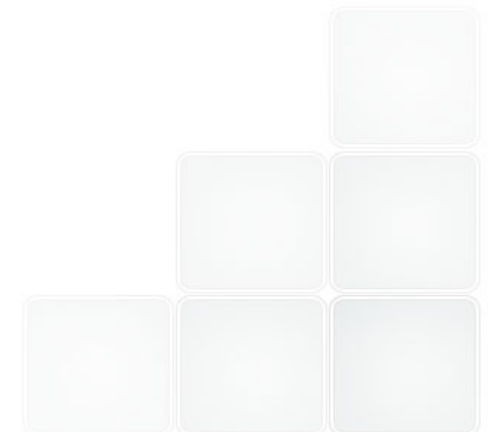
Table 5. B_0 fringe field measurements (from bore entrance)

B_0 (T)	System	B_0 at bore entrance (T)	Distance on z-axis to 200 mT (m)	Distance on z-axis to 500 mT (m)	Reference
1.0	Philips Panorama ^a (Philips Healthcare, Best, Netherlands)	0.2	1.35 ^a	0.90 ^a	Capstick et al [6]
1.5	Philips Intera (Philips Healthcare)	0.9	0.42	0.19	Riches et al [74]
1.5	Siemens Avanto (Siemens Healthcare)	0.9	0.45	0.21	Capstick et al [6]
3.0	Philips Achieva (Philips Healthcare)	1.2	0.55	0.27	Capstick et al [6]
7.0	Philips Intera (unshielded) (Philips Healthcare)	1.9	1.50	0.68	Capstick et al [6]

^aDistance measured from isocentre.

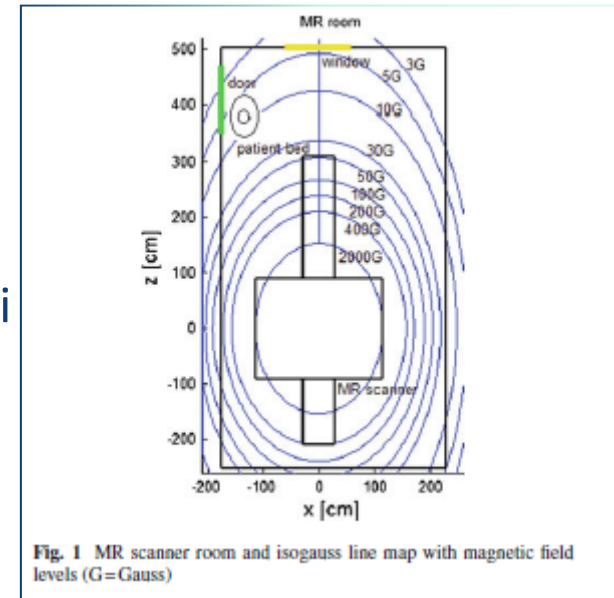
Mc Robbie 2012

Il limite a 2T della Direttiva e di ICNIRP 2009 non viene mai superato neanche all'ingresso del bore



E il movimento in campo magnetico statico?

- Misurazione delle isolinee di B nella sala magnete
- Calcolo del campo B in ogni punto della stanza a partire dalle isolinee misurate e usando algoritmi di interpolazione adeguati
- Simulazione di un movimento del lavoratore per mezzo di un'interfaccia grafica, selezionando un percorso e impostando la velocità del movimento
- Calcolo di $B(t)$ associato al movimento con un codice di calcolo opportuno



Hartwig 2011

- Posizionamento di un sensore isotropo su un caschetto indossato da un operatore
- Misurazione diretta di $B(t)$ durante il movimento dell'operatore in sala magnete.
- In questo caso si considerano movimenti realistici



Andreuccetti 2013

L'esperienza ENEA



Il volontario esegue i movimenti tipici ("azioni") del personale in sala magnete. Il sensore registra i valori di campo B misurati in un "dataset"

Sensore isotropo a effetto Hall

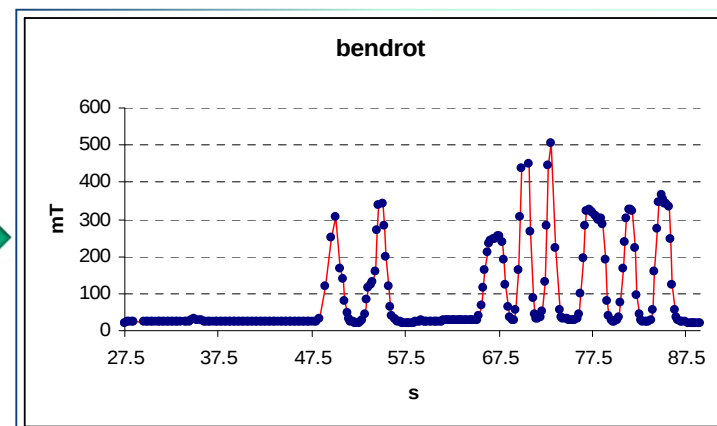
Narda, Metrolab THM1176

Bandapassante [DC ÷ 1kHz]

Periodo di campionamento: 0.1 s
Media su 10 campioni



Il lavoratore è esposto a un campo $B(t)$ con componenti frequenziali di pochi Hz.



Campagne di misura

Philips Achieva (1.5 T)

Ospedale Pediatrico
Bambino Gesù in
Palidoro
8 “azioni” (1 dataset per
azione)



Magnetom Skyra (3 T)

Ospedale Pediatrico
Bambino Gesù a
Gianicolo in Roma
11 “azioni” (1 dataset
per azioni)



Campagne di misura



General Electric Discovery MR950 (7 T)

Fondazione Imago 7,
Calambrone, Pisa

6 “azioni” con ripetizioni (36
datasets in totale).

Ripetizioni finalizzate allo
studio delle condizioni di
riproducibilità:

- Stesse condizioni
- Cambiando la sonda
- Cambiando il soggetto (3 volontari)
- Cambiando la posizione della sonda (testa, cintola)

Post processing



10 campioni
vettoriali al
secondo

Block	Bx	By	Bz	Units	Temperature	Timestamp	Serial No.	Comment
0	0.243756	0.209189	-0.032619	0.120802	MT	29631 2015.03.17 14:47:26.466081921		
0	0.246230	0.214336	-0.046613	0.111876	MT	29631 2015.03.17 14:47:26.566081921		
0	0.244504	0.209215	-0.037619	0.120813	MT	29631 2015.03.17 14:47:26.666081921		
0	0.229943	0.191237	-0.041714	0.120675	MT	29631 2015.03.17 14:47:26.766081921		
0	0.232676	0.185968	-0.018700	0.138579	MT	29631 2015.03.17 14:47:26.866081921		
0	0.264851	0.217905	-0.022508	0.148851	MT	29631 2015.03.17 14:47:26.966081921		
0	0.254804	0.227236	-0.027545	0.111938	MT	29631 2015.03.17 14:47:27.066081921		
0	0.234440	0.200116	-0.018667	0.120695	MT	29631 2015.03.17 14:47:27.166081921		
0	0.252794	0.214221	-0.046581	0.125875	MT	29631 2015.03.17 14:47:27.266081921		
0	0.228578	0.176927	-0.018736	0.143505	MT	29631 2015.03.17 14:47:27.366081921		
1	0.275138	0.213716	-0.022477	0.171818	MT	29654 2015.03.17 14:47:27.466519838		
1	0.237388	0.200095	-0.022656	0.125704	MT	29654 2015.03.17 14:47:27.566519838		
1	0.236679	0.214325	-0.022646	0.097820	MT	29654 2015.03.17 14:47:27.666519838		
1	0.256066	0.213988	-0.022552	0.138819	MT	29654 2015.03.17 14:47:27.766519838		
1	0.231294	0.200104	-0.008679	0.115672	MT	29654 2015.03.17 14:47:27.866519838		
1	0.215622	0.173123	-0.027798	0.125494	MT	29654 2015.03.17 14:47:27.966519838		
1	0.259919	0.209006	-0.041555	0.148822	MT	29654 2015.03.17 14:47:28.066519838		
1	0.233882	0.209263	-0.018661	0.102770	MT	29654 2015.03.17 14:47:28.166519838		
1	0.235321	0.195063	-0.022673	0.129663	MT	29654 2015.03.17 14:47:28.266519838		
1	0.222576	0.191211	-0.022735	0.111631	MT	29654 2015.03.17 14:47:28.366519838		
2	0.198043	0.163165	-0.013883	0.111380	MT	29633 2015.03.17 14:47:28.466957755		
2	0.227715	0.173142	-0.051768	0.138549	MT	29633 2015.03.17 14:47:28.566957755		
2	0.215235	0.186338	-0.032782	0.102613	MT	29633 2015.03.17 14:47:28.666957755		
2	0.209979	0.186394	-0.027805	0.092602	MT	29633 2015.03.17 14:47:28.766957755		
2	0.202181	0.173265	-0.018851	0.102474	MT	29633 2015.03.17 14:47:28.866957755		
2	0.243405	0.200074	-0.032635	0.134727	MT	29633 2015.03.17 14:47:28.966957755		
2	0.218472	0.167969	-0.018795	0.138431	MT	29633 2015.03.17 14:47:29.066957755		

[3]

Metodo del picco
pesato

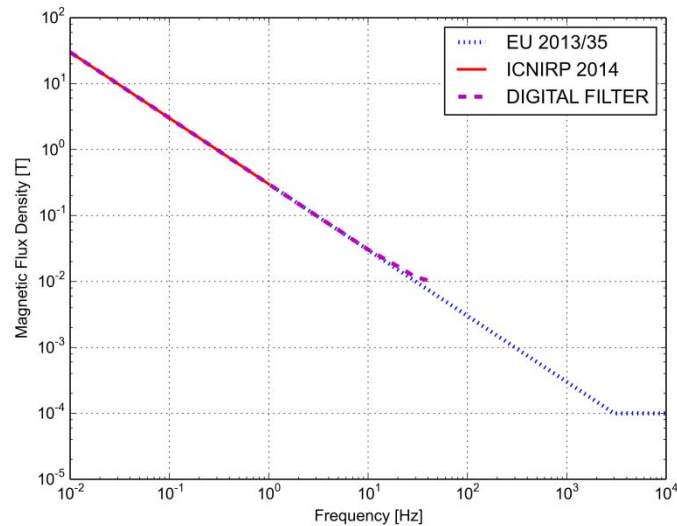
[1]

B picco

[2]

$$\text{Max } \Delta B(3s) = \text{Max} \left\{ \left| \mathbf{B}(t_i) - \mathbf{B}(t_j) \right| \quad \forall i, j \quad |t_i - t_j| \leq 3s \right\}$$

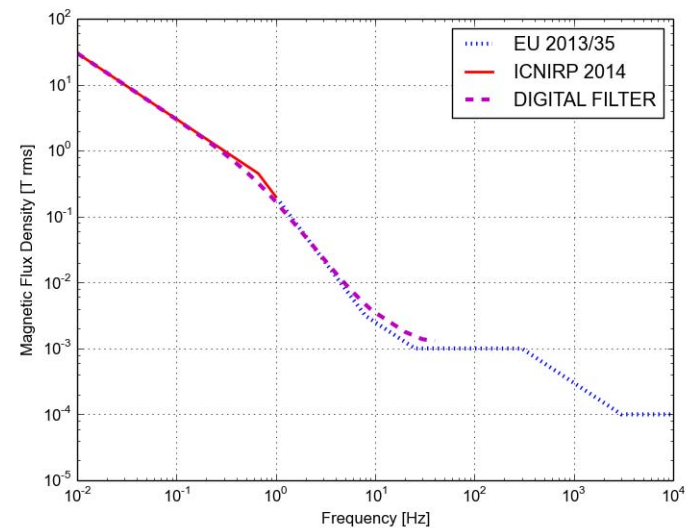
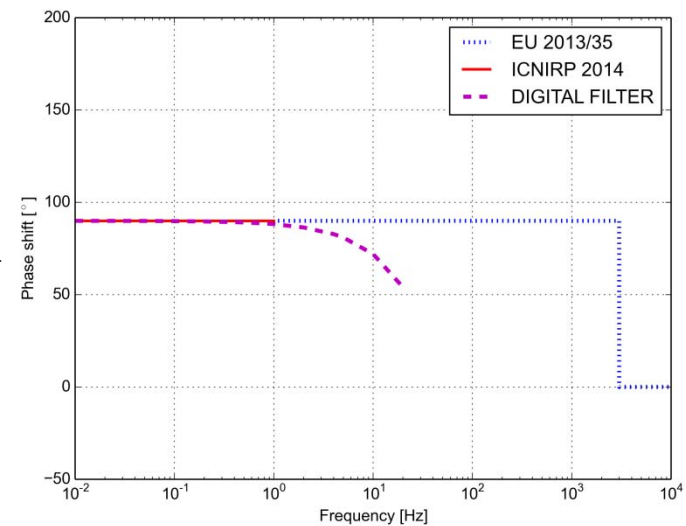
I filtri digitali per la valutazione del WP nel DT



HLTH-WP

Amplitude

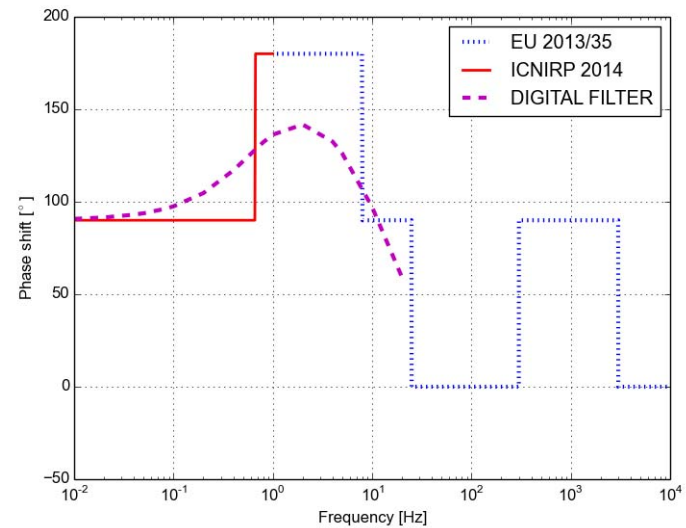
Fase



SENS-WP

Amplitude

Fase



Risultati delle campagne 1.5 T e 3 T



[1]

EU-2013 VLE per campi statici

*Tutte le misure sono risultate conformi al limite di 8T per le condizioni di lavoro **controllate** (effetti sanitari).*

*Tutte le misure a 1.5 T sono risultate conformi al limite di 2T per le condizioni di lavoro **non controllate** (effetti sensoriali).*

*Tutte le misure a 3 T sono risultate conformi al limite di 2T per le condizioni di lavoro **non controllate** (effetti sensoriali)*

[2]

ICNIRP-2014 RB per effetti di vertigine in condizioni non controllate ($\Delta B(3s) < 2T$)

Tutte le azioni a 1,5 T e a 3 T sono risultate conformi a questa restrizione di base.

[3]

EU-2013 ALs + ICNIRP-2014 RLs effetti di stimolazione

SENS-WP<1 (condizioni non controllate): tutte le azioni tranne una a 1.5 T sono conformi. In questa azione il volontario introduceva la testa nel bore per simulare il soccorso veloce a un paziente in difficoltà

HLTH-WP<1 (condizioni controllate): tutte le azioni sono risultate conformi

Alcuni risultati della campagna 7 T

Action	Dataset				Duration [s]	B peak [T]	Max ΔB [T] over 3s	EU-2013/35+ICNIRP-2014		dB/dt peak [T/s]
	Subject	Probe	Probe pos.	Run				SENS-WP	HLTH-WP	
A20	A	MF	Head-Right	1	111.0	1.16	1.39	4.9	<u>2.2</u>	<u>5.6</u>
A20	A	HF	Head-Right	Single	91.0	<u>1.55</u>	1.84	<u>7.7</u>	2.1	4.9
A20	B	MF	Head-Right	2	86.0	1.46	<u>1.96</u>	3.0	1.7	4.3
A21	A	MF	Head-Right	2	98.0	0.92	1.07	<u>5.1</u>	1.2	2.6
A21	A	MF	Head-Right	3	105.0	<u>1.20</u>	<u>1.33</u>	3.7	<u>1.6</u>	<u>3.8</u>
A22	A	HF	Head-Right	Single	86.0	2.58	2.24	6.9	<u>2.8</u>	<u>7.1</u>
A22	B	MF	Head-Right	1	91.0	2.94	<u>3.34</u>	3.0	1.6	3.5
A22	B	MF	Head-Right	2	88.0	<u>3.02</u>	3.16	<u>7.3</u>	2.8	6.9
A23	B	MF	Hip-Left	Single	189.1	<u>1.67</u>	1.86	2.7	1.4	3.6
A23	B	MF	Head-Right	2	203.1	1.40	<u>1.93</u>	<u>5.1</u>	<u>2.1</u>	<u>5.2</u>
A24	B	MF	Head-Right	1	234.1	1.70	1.70	<u>3.4</u>	1.1	2.7
A24	B	MF	Head-Left	Single	219.1	<u>2.01</u>	<u>2.35</u>	2.2	<u>1.2</u>	<u>2.9</u>
A25	B	MF	Head-Right	1	76.0	2.05	<u>2.06</u>	9.9	2.8	6.4
A25	B	MF	Head-Right	2	67.0	<u>2.06</u>	2.04	<u>13.1</u>	<u>3.7</u>	<u>8.5</u>

Risultati della campagna 7 T



EU-2013 VLE per campi statici

[1]

Tutte le misure sono risultate conformi al limite di 8T per le condizioni di lavoro controllate (effetti sanitari).

9 azioni su 36 hanno mostrato valori di picco superiori al limite di 2T per le condizioni di lavoro non controllate (effetti sensoriali).

In tutte le azioni (tre) in cui avveniva il superamento del limite il sensore era fissato sulla testa

[2]

ICNIRP-2014 RB per effetti di vertigine in condizioni non controllate ($\Delta B(3s) < 2T$)

Il limite è stato superato in 6 dataset su 36 corrispondenti alle tre azioni in cui si è verificato il superamento del limite di 2T

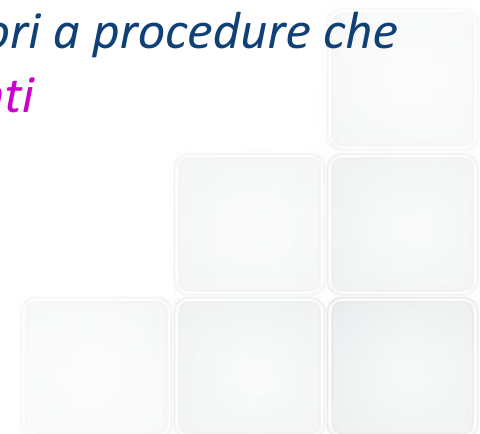
Questo si traduce nella necessità di addestrare i lavoratori a procedure che prevedano il controllo della velocità dei loro movimenti

[3]

EU-2013 ALs + ICNIRP-2014 RLs per effetti di stimolazione

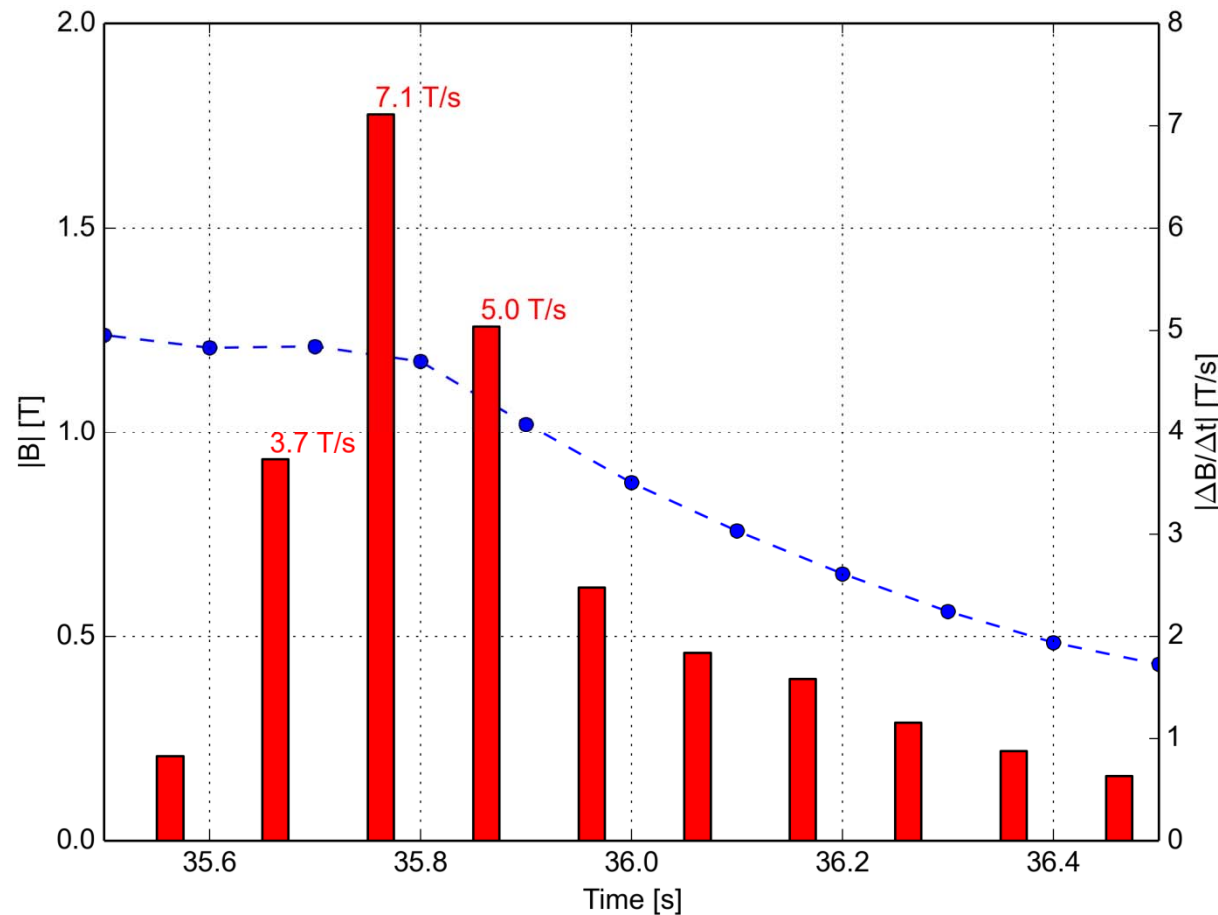
SENS-WP<1 : tutte le azioni sono risultate non conformi

HLTH-WP<1 : 26 dataset sono risultati non conformi



Indagando.....

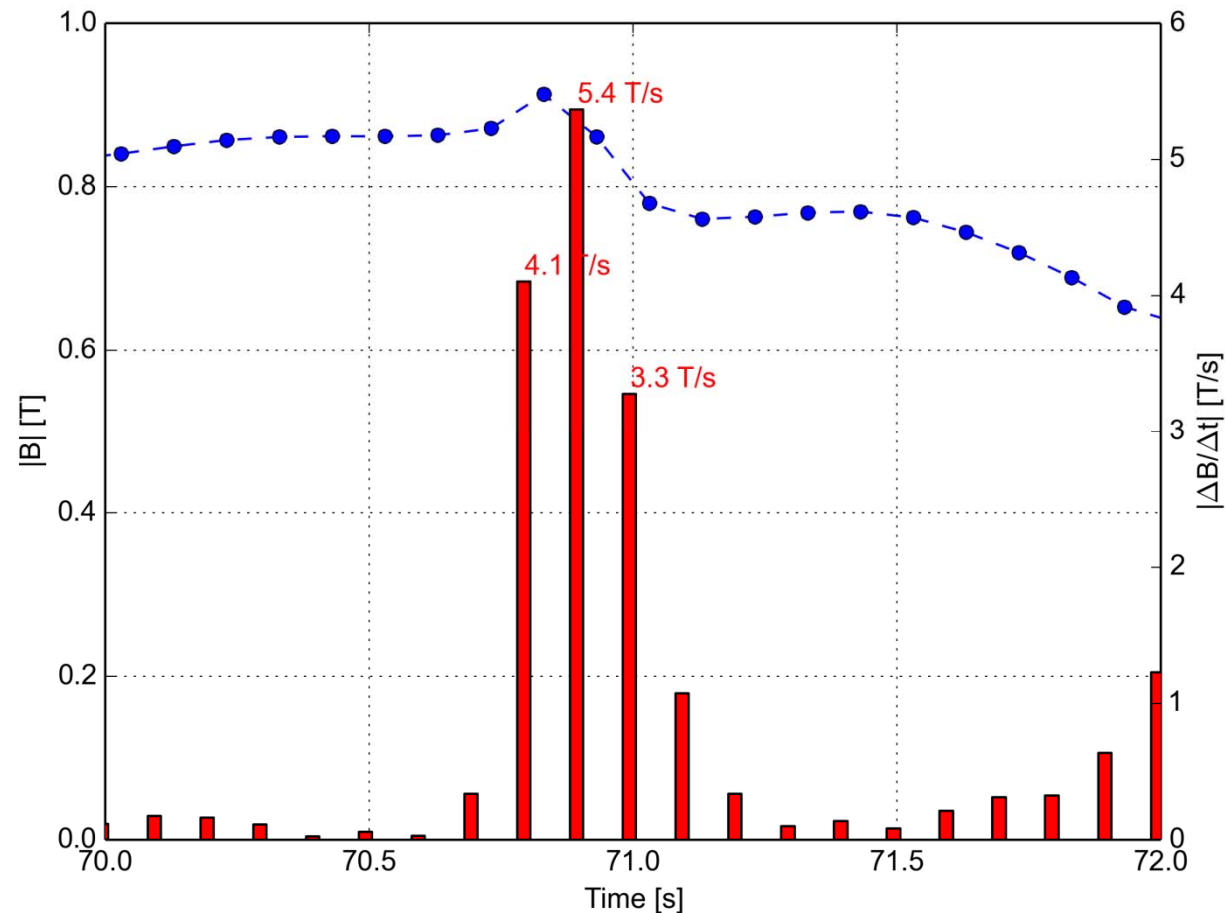
Azione A22: risposta a una chiamata di emergenza: **SENS-WP = 6.9**, **HLTH-WP = 2.8**



Il valore massimo del rapporto incrementale (barra rossa), e quindi di HLTH-WP, si trova in un intervallo in cui il modulo del campo B rimane quasi costante. Evidentemente il volontario ha eseguito *una rapida rotazione della testa in una zona dove il campo B è relativamente omogeneo*

Indagando.....

Azione A22: risposta a una chiamata di emergenza: **SENS-WP = 3.0**, **HLTH-WP = 1.6**



I valori massimi dei rapporti incrementali (barra rossa), e quindi di HLTH-WP, si raggiungono probabilmente perché il volontario ha eseguito *uno spostamento veloce in un'area dove il campo B ha un altro gradiente spaziale*

Cosa ne deduciamo.....



Per 3 dataset a 7 T si ha un superamento del limite di 2T su $\Delta B(3s)$ per le vertigini ma il valore di picco misurato di B non supera mai i 2 T: questo è dipeso da quanto velocemente il volontario si è mosso nell'area dove il campo eccedeva i 2 T, questo suggerisce che la conformità al limite di base per il campo statico previsto nella Direttiva può non essere sufficiente a assicurare la conformità al limite imposto da ICNIRP per la protezione dalle vertigini in ambienti non controllati

Controllare la velocità dei movimenti è una buona pratica: traslazioni lente dove il gradiente spaziale di campo è elevato e limitazione delle rotazioni della testa dove il campo è intenso

La conformità ai limiti della direttiva non assicura la conformità ai livelli di riferimento di ICNIRP 2014 per la limitazione degli effetti di stimolazione quando le forme d'onda acquisite sono processate con il metodo del picco ponderato

Nessuno dei volontari ha riportato effetti durante le azioni