

Misure di campo magnetico generato da stimolatori magnetici transcranici

Nicola Zoppetti^(1,*), Daniele Andreuccetti^(1,**),
Andrea Bogi^(2,***), Nicola Stacchini^(2,****), Iole Pinto^(2,*****)

⁽¹⁾ Istituto Fisica Applicata "Nello Carrara" del CNR (IFAC-CNR)

⁽²⁾ AUSL7, Siena

* N.Zoppetti@ifac.cnr.it

** D.Andreuccetti@ifac.cnr.it

*** a.bogi@usl7.toscana.it

**** n.stacchini@usl7.toscana.it

***** i.pinto@usl7.toscana.it

1 – Introduzione

La Regione Toscana ha organizzato un Piano Mirato Triennale per la formazione del personale dei Servizi di Prevenzione e Protezione delle 16 Aziende Sanitarie Toscane e la formulazione di specifici criteri di valutazione del rischio. Il coordinamento della parte riguardante l'esposizione a campi elettromagnetici (Area Tematica 5) è stato affidato AUSL 7 di Siena, che ne ha curato anche l'esecuzione, in collaborazione IFAC-CNR. La partecipazione a questa attività ha fornito lo spunto e le occasioni per approfondire le esposizioni professionali a campi elettromagnetici che avvengono in ambito sanitario, tra le quali quella al campo magnetico generato da apparati per la stimolazione magnetica transcranica.

In questo report, dopo un estratto del documento finale del piano mirato, in cui si introducono le caratteristiche generali degli apparati considerati, si presentano in modo dettagliato i risultati delle campagne di misura che hanno riguardato tre diversi modelli di stimolatori, risultati che sono riportati solo in modo sintetico nel già citato documento finale.

La presentazione non entra nel merito né dei metodi di valutazione applicati e neanche dei dettagli di implementazione dei metodi stessi. Per una presentazione dei metodi di valutazione applicati ci si può riferire a [1] mentre per alcuni dettagli relativi all'implementazione a [2].

2 - Generalità sulla stimolazione magnetica transcranica

La **Stimolazione Magnetica Transcranica** (TMS, dall'inglese *Transcranial Magnetic Stimulation*) è una metodica che consente di stimolare o inibire la corteccia cerebrale in modo non invasivo. La metodica fa uso di un apparecchio elettromedicale che genera un campo magnetico mediante una bobina percorsa da corrente. La TMS consiste quindi, sostanzialmente, nella generazione di un intenso campo magnetico rapidamente variabile nel tempo, che induce una corrente elettrica nel cervello. Questa corrente provoca la depolarizzazione delle cellule nervose, cioè le eccita, producendo la stimolazione o l'interruzione dell'attività cerebrale per pochi millisecondi.

La tecnologia degli stimolatori magnetici transcranici prevede due componenti fondamentali (Fig. 1):

- un generatore di impulsi di corrente (fino ad 8 kA) con la necessaria elettronica di controllo;
- un applicatore mobile a bobina (*coil*, in inglese), che durante la stimolazione viene posto a diretto contatto con lo scalpo del paziente.

I metodi di stimolazione sono essenzialmente due:

- metodo single pulse (TMS a singolo impulso): la stimolazione avviene tramite impulsi singoli, in grado di produrre risposte celeri i cui effetti decadono in breve tempo;
- metodo rTMS (TMS ripetitiva): viene erogato un treno d'impulsi in un dato periodo di tempo; per convenzione si usa definire "rTMS ad alta frequenza" la stimolazione a frequenza maggiore di 1 Hz (possono essere utilizzate frequenze fino a 20 Hz) ed "rTMS a bassa frequenza" la stimolazione a frequenza minore di 1 Hz.

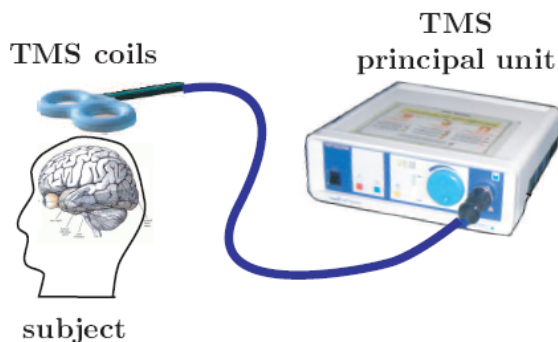


Fig. 1 – Schema di funzionamento di un apparato per stimolazione magnetica transcranica.

Le varianti di stimolatori magnetici transcranici presenti sul mercato si caratterizzano prevalentemente per il numero e la tipologia di applicatori disponibili (le cui caratteristiche determinano l'intensità e la distribuzione del campo magnetico: quindi anche la profondità di stimolazione, che solitamente si aggira sui 5-6 cm) e per la combinazione con altri sistemi per l'esecuzione di esami più completi (sistemi per elettromiografia e potenziali evocati, EEG, fMRI, etc.).

I campi dispersi da questa tipologia di apparati hanno le seguenti caratteristiche generali.

- Gli apparati per la TMS possono essere considerati come sorgenti 'intenzionali' di campo magnetico (cioè apparati il cui funzionamento è legato all'emissione di un campo magnetico, che NON può essere considerato come un effetto indesiderato). Per questo motivo in questo lavoro ci si è concentrati sull'induzione magnetica. *Non si esclude comunque che questi apparati possano generare significativi livelli di campo elettrico.*
- Si tratta di campi a bassa frequenza con forma d'onda impulsiva che può essere sia ripetitiva sia non ripetitiva (evento isolato). Ciascun evento ha una durata che può andare dalle centinaia di microsecondi a qualche millisecondo.
- L'intensità dell'induzione magnetica in prossimità (pochi centimetri) dell'applicatore può essere anche superiore ad 1 tesla.

3 - Stimolatore Medtronic-Magpro R 30+M

Lo stimolatore magnetico transcranico marca MEDTRONIC INC Modello: MAGPRO R 30+M - (DC) (Fig. 2) è stato provato con regolazione di intensità pari al 75% del massimo che è la condizione tipica usata durante gli esami diagnostici effettuati.

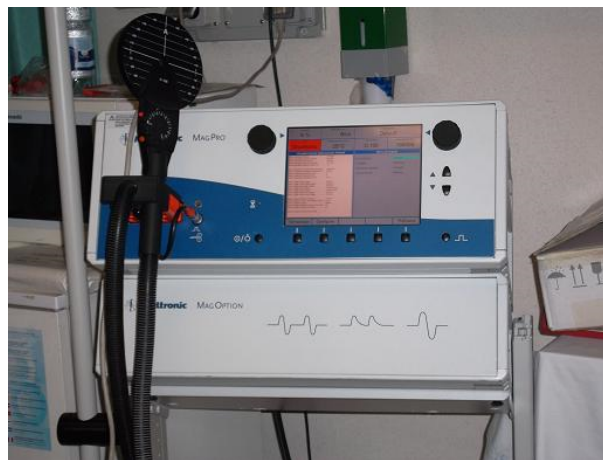


Fig. 2 – L'apparato testato

3.1 - Punti di misura

Sono state eseguite misure di induzione magnetica usando lo strumento Narda ELT-400 con sensore da 100 cm² ed in particolare:

- sono state acquisite le forme d'onda delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica mediante le uscite analogiche dell'ELT-400 usato in modalità 320 μ T Range High, in un punto fisso, a circa 45 cm dall'applicatore in direzione assiale;
- sono state eseguite misure dell'indice WP per i lavoratori e per le linee guida ICNIRP del 1998 [3] (modalità ICNIRP1998occ) in punti a distanza variabile dall'applicatore in direzione sia assiale sia radiale.

Non si può escludere che in prossimità dell'applicatore si possano registrare anche intensi campi elettrici, che eventualmente saranno oggetto di futuri approfondimenti.

3.2 - Acquisizioni delle forme d'onda del campo in un punto fisso

3.2.1 - La forma d'onda del campo

In Fig. 3 e Fig. 4 sono rappresentate le forme d'onda delle componenti dell'induzione magnetica acquisite mediante le uscite analogiche dell'ELT400 (usato in modalità 320 μT , range High, sonda 100 cm^2) a circa 45 centimetri (direzione assiale) dall'applicatore. È stata effettuata un'acquisizione di 1 secondo in modo da essere sicuri di registrare l'evento che invece ha una durata dell'ordine del millisecondo. In particolare in Fig. 3 è rappresentata l'intera forma d'onda acquisita mentre in Fig. 4 si può osservare un 'ritaglio' di 1 ms intorno al massimo. Come si può notare l'induzione magnetica ha carattere impulsivo, non ripetitivo; la durata dell'evento è pari a circa 280 microsecondi e la forma è grosso modo sinusoidale (un singolo periodo di sinusoidale).

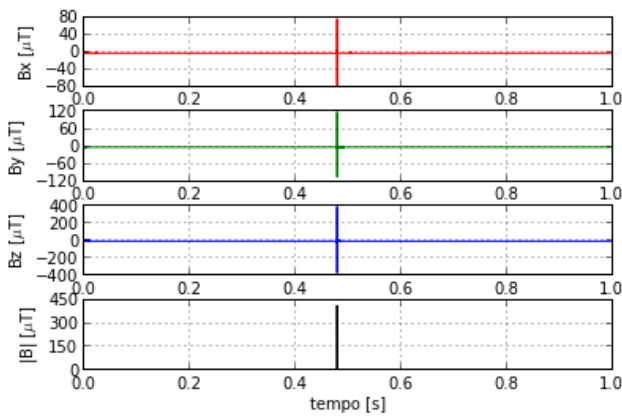


Fig. 3 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: acquisizione di 1 secondo.

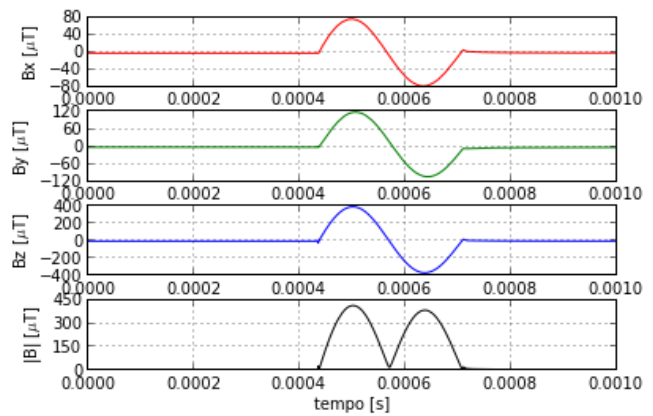


Fig. 4 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: dettaglio di 1 millisecondo centrato sul massimo.

3.2.2 - Lo spettro del campo

Nelle Fig. 5 e Fig. 6 si rappresentano i moduli degli spettri dell'induzione magnetica ottenuti mediante FFT applicata alle forme d'onda visualizzate in Fig. 3 e Fig. 4.

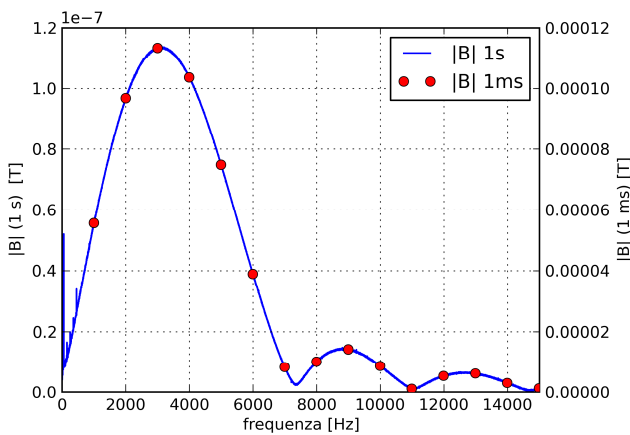


Fig. 5 – spettri delle forme d'onda di Fig. 3 e Fig. 4

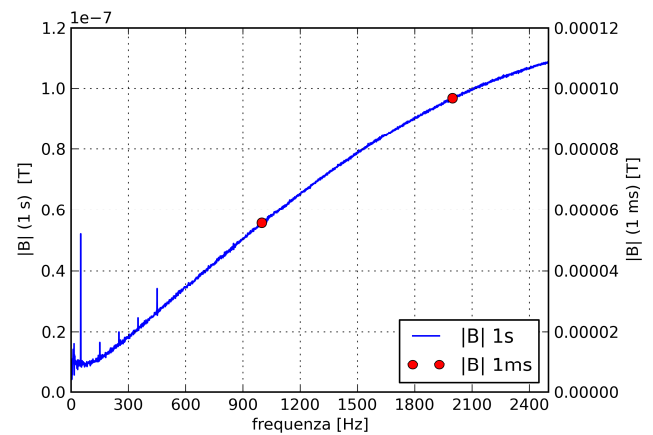


Fig. 6 – dettaglio degli spettri delle forme d'onda di Fig. 3 e Fig. 4

I due spettri sono rappresentati in scale differenti ed in particolare si può osservare che il rapporto tra l'ampiezza delle righe coincide con il rapporto tra i tempi di osservazione dei fenomeni (1ms / 1s). Si può osservare anche che lo spettro più dettagliato (quello con risoluzione spettrale pari ad 1 Hz) permette di evidenziare delle componenti non trascurabili a 50 Hz. Tuttavia, come vedremo in seguito, queste componenti non sono significative dal punto di vista degli indici di esposizione.

Il massimo dello spettro si raggiunge a circa 3 kHz ovvero alla frequenza corrispondente al periodo di sinusoidale visualizzabile in Fig. 4.

3.2.3 - Indici di esposizione

Gli indici di esposizione di riferimento per esposizioni di tipo impulsivo sono quelli determinati secondo il metodo del picco ponderato (WP nel seguito) che può essere implementato, mediante vari approcci, sia nel dominio del tempo, sia nel dominio della frequenza [2]. Gli indici sono stati determinati con riferimento sia alle linee guida ICNIRP del 1998 sia a quelle del 2010 [4].

Indici determinati nel dominio del tempo. In Tab. 1 sono riportati gli indici WP, determinati nel dominio del tempo, a partire dai dati acquisiti e rappresentati nelle Fig. 3 e Fig. 4. I valori riportati in tabella sono determinati mediante procedure di elaborazione che fanno riferimento all'implementazione del metodo del picco ponderato mediante filtri analogici [1].

Tab. 1 – Indici di esposizione WP determinati nel dominio del tempo

	WP 1998	WP 2010
popolazione	46.82	8.24
lavoratori	9.52	2.22

In Fig. 7 sono rappresentati gli andamenti degli indici nel tempo, nella quale si può notare che il massimo è raggiunto in corrispondenza del secondo semi-periodo della sinusoidale di Fig. 4.

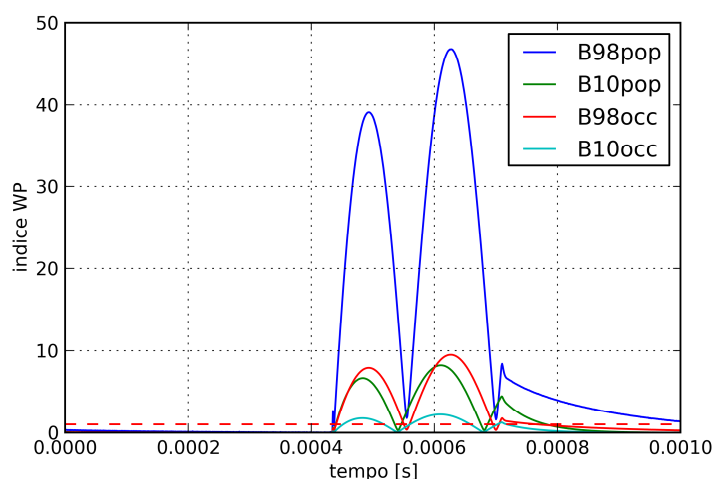


Fig. 7 – Andamento degli indici WP nel dominio del tempo

Indici determinati nel dominio della frequenza. Gli indici di esposizione riportati in Tab. 2 sono stati determinati nel dominio della frequenza a partire dallo spettro con risoluzione spettrale pari a 1000 Hz.

Come si può notare gli indici che fanno riferimento ai filtri analogici sono ben allineati con quelli calcolati nel dominio del tempo e ciò conferma come le componenti a 50 Hz che si notavano negli spettri dell'induzione magnetica di Fig. 5 e Fig. 6 non sono significative per la determinazione degli indici di esposizione.

In tabella si riportano anche gli indici determinati pesando le componenti spettrali dell'induzione magnetica con i livelli di riferimento ICNIRP definiti in termini di funzioni costanti a tratti (Funzioni 'piecewise'), come nelle tabelle delle rispettive linee guida.

Tab. 2 – Indici di esposizione WP determinati nel dominio della frequenza

Limite	Filtri analogici			Funzioni 'piecewise'		
	2003	1998	2010	2003	1998	2010
Popolazione	46.77	46.81	8.29	47.1	47.1	9.02
Lavoratori	9.51	9.54	2.23	9.59	9.59	2.42

3.3 - Misure in punti a distanza variabile dalla sorgente

Oltre alle misure di induzione magnetica in punti fissi, sono state effettuate anche delle misure di indice WP per i lavoratori e per le linee guida del 1998 muovendosi intorno alla sorgente. Le misure sono riportate in Tab. 3.

Tab. 3 – Misure di indici WP

d assiale [cm]	d radiale [cm]	MODE	Range	Detect	sonda	WP 1998 occ
40		ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	1872
50		ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	986
70		ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	395
100		ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	150
120		ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	82
170		ICNIRP1998occ	L	Stnd	100 cmq	35
175		ICNIRP1998occ	L	Stnd	100 cmq	27
	50	ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	534
	60	ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	330
	70	ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	184
	80	ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	133
	100	ICNIRP1998occ	H	Stnd	100 cmq	72

3.3.1 - Andamento nello spazio degli indici di esposizione

Supponendo che il campo sia caratterizzato dalla forma d'onda misurata in un punto fisso (mostrata nelle Fig. 3 e Fig. 4) è possibile scalare le misure di indice di Tab. 3 in modo da ottenere l'andamento nello spazio degli indici relativi ai livelli di riferimento validi per la popolazione e per le linee guida del 1998 e per le linee guida del 2010 (lavoratori e popolazione).

Nei seguenti grafici e tabelle sono presi in considerazione anche i livelli di azione definiti nella direttiva 2013/35/UE [5], ed in particolare quelli che si differenziano rispetto ai livelli di riferimento definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010.

A tal proposito è opportuno osservare che i cosiddetti limiti 'inferiori' della direttiva coincidono (sia per B/H sia per E) con i livelli di riferimento per i lavoratori definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010. La direttiva però introduce un nuovo strato di livelli di azione ('superiori') sia per il campo elettrico sia per l'induzione magnetica e, solo per quest'ultima, un ulteriore limite da applicare all'esposizione degli arti in condizioni di esposizione a distribuzioni di campo fortemente disomogenee.

Nella Fig. 8 e nella Fig. 9 sono illustrati i profili degli indici rispettivamente lungo l'asse dell'applicatore e lungo una direttrice radiale, dove la distanza è intesa dal centro dell'applicatore stesso.

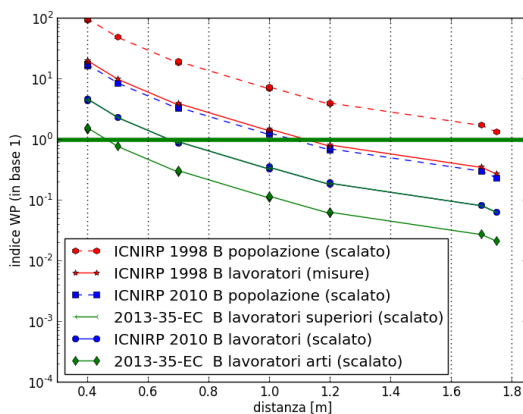


Fig. 8 – Andamento degli indici di esposizione WP in funzione della distanza lungo l'asse della spira/applicatore

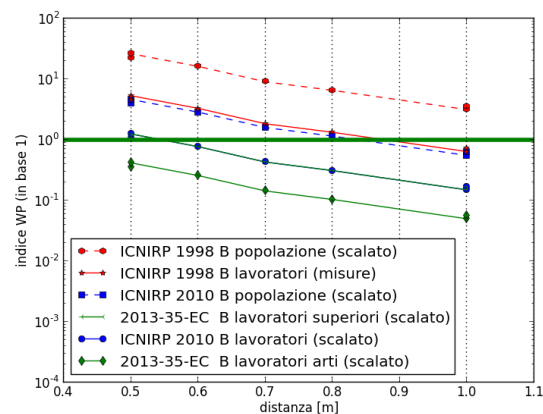


Fig. 9 – Andamento degli indici di esposizione WP in funzione della distanza lungo il raggio della spira/applicatore

3.4 - Distanze di rispetto

In Tab. 4 sono riportate le distanze di rispetto dal centro dell'applicatore, in direzione assiale, approssimativamente ricavate dalla Fig. 8.

Tab. 4 – Distanze di rispetto.

	Distanze di rispetto [m]			
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/EU sup.	2013/35/EU arti.
popolazione	>1.75	1.10		
lavoratori	1.10	0.70	0.70	0.50

4 - Lo stimolatore Magstim 200

Lo stimolatore magnetico transcranico marca: MAGSTIM CO LTD, Modello MAGSTIM 200 (Fig. 10) è stato provato con regolazione di intensità pari al 80% del massimo che è la condizione tipica usata durante gli esami diagnostici effettuati.



Fig. 10 – L'apparato testato

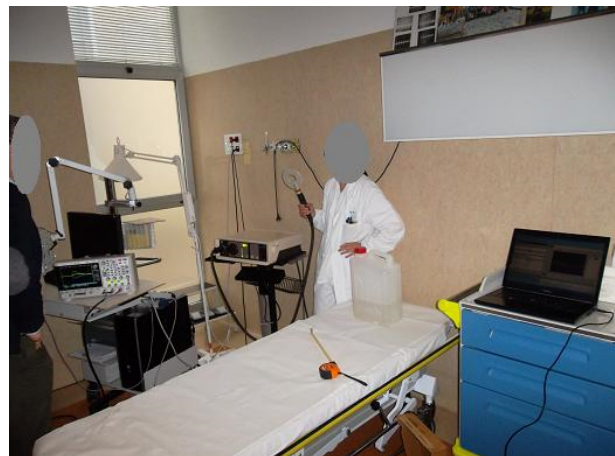


Fig. 11 – Il teatro espositivo

4.1 - Punti di misura

Sono state eseguite misure di induzione magnetica usando lo strumento Narda ELT-400 con sensore da 100 cm² ed in particolare:

- sono state acquisite le forme d'onda delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica mediante le uscite analogiche dell'ELT-400 usato in modalità 320 μ T Range High, in un punto fisso, a circa 80 cm dall'applicatore in direzione assiale;
- sono state eseguite misure dell'indice WP per i lavoratori e per le linee guida ICNIRP del 1998 (modalità ICNIRP1998occ) in punti a distanza variabile dall'applicatore in direzione sia assiale sia radiale.

Non si può escludere che in prossimità dell'applicatore si possano registrare anche intensi campi elettrici, che eventualmente saranno oggetto di futuri approfondimenti.

4.2 - Acquisizioni delle forme d'onda del campo in un punto fisso

4.2.1 - La forma d'onda del campo

In Fig. 12 e Fig. 13 sono rappresentate le forme d'onda delle componenti dell'induzione magnetica acquisite mediante le uscite analogiche dell'ELT400 (usato in modalità 320 μT , range High, sonda 100 cm^2) a circa 80 centimetri (direzione assiale) dall'applicatore. È stata effettuata un'acquisizione di 1 secondo in modo da essere sicuri di registrare l'evento che invece ha una durata dell'ordine del millisecondo. In particolare in Fig. 12 è rappresentata l'intera forma d'onda acquisita mentre in Fig. 13 si può osservare un 'ritaglio' di 10 ms intorno al massimo. Come si può notare l'induzione magnetica ha carattere impulsivo, non ripetitivo; e la durata dell'evento è pari a circa 3 millisecondi.

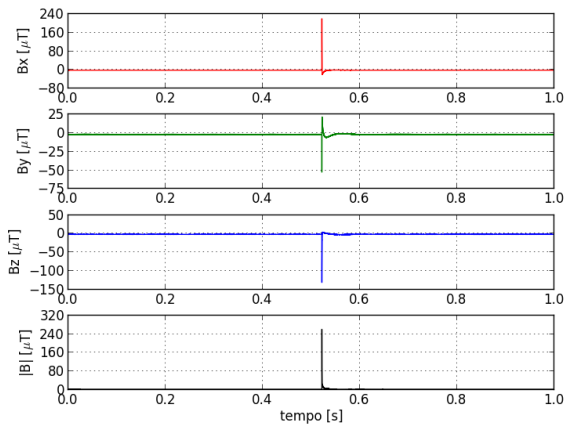


Fig. 12 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: acquisizione di 1 secondo.

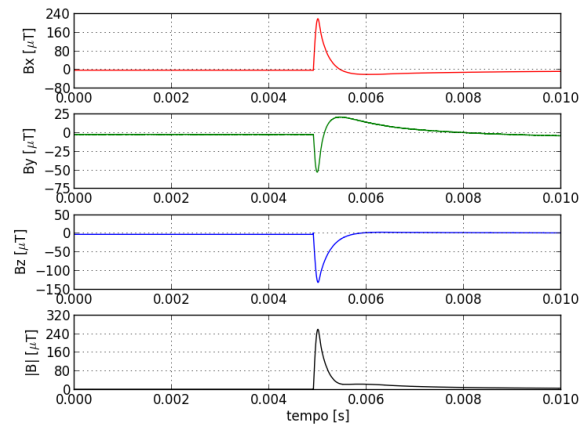


Fig. 13 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: dettaglio di 10 millisecondi centrato sul massimo.

4.2.2 - Lo spettro del campo

Nelle Fig. 14 e Fig. 15 si rappresentano i moduli degli spettri delle componenti dell'induzione magnetica ottenuti mediante FFT applicata alle forme d'onda visualizzate in Fig. 12 e Fig. 13.

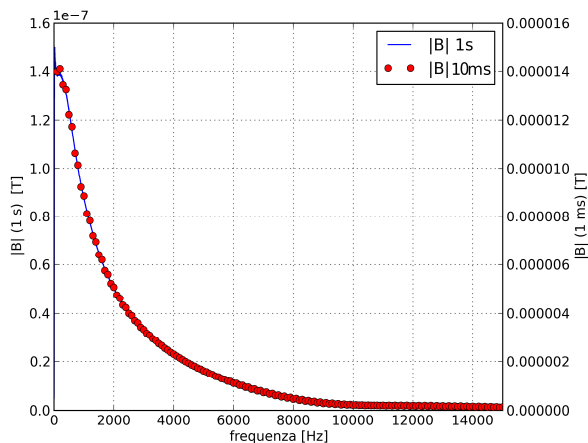


Fig. 14 – Spettri delle forme d'onda di Fig. 3 e Fig. 4

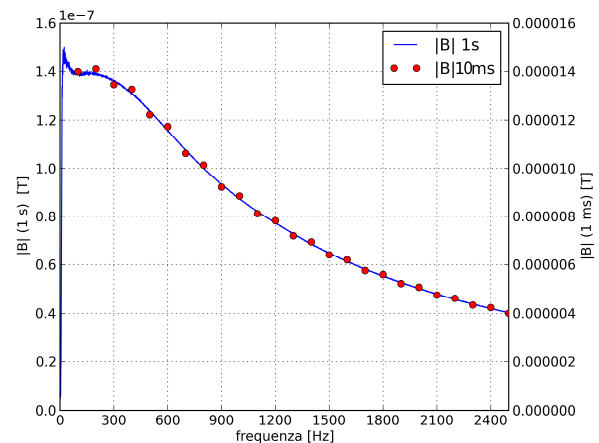


Fig. 15 – Dettaglio degli spettri delle forme d'onda di Fig. 12 e Fig. 13

I due spettri sono rappresentati in scale differenti ed in particolare si può osservare che il rapporto tra l'ampiezza delle righe coincide con il rapporto tra i tempi di osservazione dei fenomeni (10ms / 1s).

4.2.3 - Indici di esposizione

Gli indici di esposizione di riferimento per esposizioni di tipo impulsivo sono quelli determinati secondo il metodo del picco ponderato (WP nel seguito) che può essere implementato, mediante vari approcci, sia nel dominio del tempo, sia nel dominio della frequenza [1].

Indici determinati nel dominio del tempo. In Tab. 5 sono riportati gli indici WP, determinati nel dominio del tempo, a partire dai dati acquisiti e rappresentati nelle Fig. 12 e Fig. 13. I valori riportati in tabella sono determinati mediante procedure di elaborazione che fanno riferimento all'implementazione del metodo del picco ponderato mediante filtri analogici [1].

Tab. 5 – Indici di esposizione WP determinati nel dominio del tempo

	WP 1998	WP 2010
popolazione	22.69	3.6
lavoratori	4.59	0.95

In Fig. 16 sono rappresentati gli andamenti degli indici nel tempo, nella quale si può notare che il massimo è raggiunto in corrispondenza del fronte di salita dell'impulso di Fig. 13.

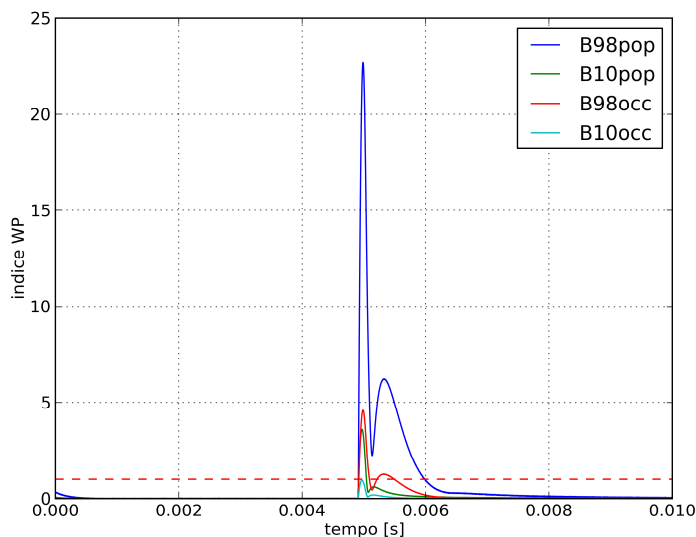


Fig. 16 – Andamento degli indici WP nel dominio del tempo

Indici determinati nel dominio della frequenza. Gli indici di esposizione riportati in Tab. 6 sono stati determinati nel dominio della frequenza a partire dallo spettro con risoluzione spettrale pari a 100 Hz.

Come si può notare gli indici che fanno riferimento ai filtri analogici sono ben allineati con quelli calcolati nel dominio del tempo.

In tabella si riportano anche gli indici determinati pesando le componenti spettrali dell'induzione magnetica con i livelli di riferimento ICNIRP definiti in termini di funzioni costanti a tratti (Funzioni 'piecewise'), come nelle tabelle delle rispettive linee guida.

Tab. 6 – Indici di esposizione WP determinati nel dominio della frequenza

	Filtri analogici		Funzioni 'piecewise'	
	WP1998	WP2010	WP1998	WP2010
Popolazione	22.7	3.63	20.82	3.23
Lavoratori	4.6	0.95	4.23	0.85

4.3 - Misure in punti a distanza variabile dalla sorgente

Oltre alle misure di induzione magnetica in punti fissi, sono state effettuate anche delle misure di indice WP per i lavoratori e per le linee guida del 1998 muovendosi intorno alla sorgente. Le misure sono riportate in Tab. 7.

Tab. 7 – Misure di indici WP

d assiale [cm]	d radiale [cm]	MODE	Range	Detect	sonda	Display
40		ICNIRP1998occ	H	Std	3 cmq	3054
60		ICNIRP1998occ	H	Std	3 cmq	1000
80		ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	495
100		ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	320
120		ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	200
140		ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	183
160		ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	140
180		ICNIRP1998occ	L	Std	100 cmq	53
160		ICNIRP1998occ	L	Std	100 cmq	120
180		ICNIRP1998occ	L	Std	100 cmq	53
200		ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	30
220		ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	21
	60	ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	549
	80	ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	238
	100	ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	127
	120	ICNIRP1998occ	H	Std	100 cmq	74

4.3.1 - Andamento nello spazio degli indici di esposizione

Supponendo che il campo sia caratterizzato dalla forma d'onda misurata in un punto fisso (mostrata nelle Fig. 12 e Fig. 13) è possibile scalare le misure di indice di Tab. 7 in modo da ottenere l'andamento nello spazio degli indici relativi ai livelli di riferimento validi per la popolazione e per le linee guida del 1998 e per le linee guida del 2010 (lavoratori e popolazione).

Nei seguenti grafici e tabelle sono presi in considerazione anche i livelli di azione definiti nella direttiva 2013/35/UE, ed in particolare quelli che si differenziano rispetto ai livelli di riferimento definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010.

A tal proposito è opportuno osservare che i cosiddetti limiti 'inferiori' della direttiva coincidono (sia per B/H sia per E) con i livelli di riferimento per i lavoratori definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010. La direttiva però introduce un nuovo strato di livelli di azione ('superiori') sia per il campo elettrico sia per l'induzione magnetica e, solo per quest'ultima, un ulteriore limite da applicare all'esposizione degli arti in condizioni di esposizione a distribuzioni di campo fortemente disomogenee.

Nella Fig. 17 e nella Fig. 18 sono illustrati i profili degli indici rispettivamente lungo l'asse dell'applicatore e lungo una direttrice radiale, dove la distanza è intesa dal centro dell'applicatore stesso.

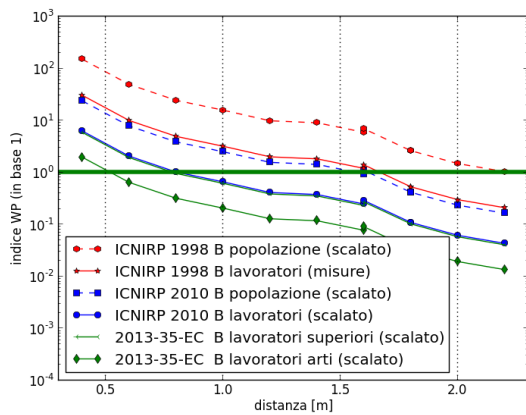


Fig. 17 – Andamento degli indici di esposizione WP in funzione della distanza lungo l’asse della spira/applicatore

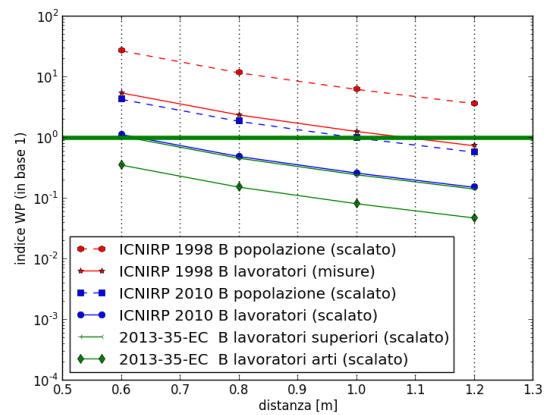


Fig. 18 – Andamento degli indici di esposizione WP in funzione della distanza lungo il raggio della spira/applicatore

4.4 - Distanze di rispetto

In Tab. 8 sono riportate le distanze di rispetto dal centro dell’applicatore, in direzione assiale, ricavate dalla Fig. 17.

Tab. 8 – Distanze di rispetto.

	Distanze di rispetto [m]			
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/EU sup.	2013/35/EU arti.
popolazione	>2.20	1.60		
lavoratori	1.70	0.80	0.80	0.55

5 - Lo stimolatore Medtronic Magpro Compact

Lo stimolatore magnetico transcranico marca: MEDTRONIC Modello: MAGPRO COMPACT (Fig. 19) è stato provato con regolazione di intensità pari all’ 80% del massimo che è la condizione tipica usata durante gli esami diagnostici effettuati.



Fig. 19 – L’apparato testato

5.1 - Punti di misura

Sono state eseguite misure di sola induzione magnetica usando lo strumento Narda ELT-400 con sensore da 100 cm^2 ed in particolare:

- sono state acquisite le forme d'onda delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica mediante le uscite analogiche dell'ELT-400 usato in modalità $320 \mu\text{T}$ Range High, in un punto fisso, a circa 45 cm dall'applicatore in direzione assiale;
- sono state eseguite misure dell'indice WP per i lavoratori e per le linee guida ICNIRP del 1998 (modalità ICNIRP1998occ) in punti a distanza variabile dall'applicatore in direzione sia assiale sia radiale.

Non si può escludere che in prossimità dell'applicatore si possano registrare anche intensi campi elettrici, che eventualmente saranno oggetto di futuri approfondimenti.

5.2 - Acquisizioni delle forme d'onda del campo in un punto fisso

5.2.1 - La forma d'onda del campo

In Fig. 20 e Fig. 21 sono rappresentate le forme d'onda delle componenti dell'induzione magnetica acquisite mediante le uscite analogiche dell'ELT400 (usato in modalità $320 \mu\text{T}$, range High, sonda 100 cm^2) a circa 45 centimetri (direzione assiale) dall'applicatore. È stata effettuata un'acquisizione di 1 secondo in modo da essere sicuri di registrare l'evento che invece ha una durata dell'ordine del millisecondo. In particolare in Fig. 20 è rappresentata l'intera forma d'onda acquisita mentre in Fig. 21 si può osservare un 'ritaglio' di 1 ms intorno al massimo. Come si può notare l'induzione magnetica ha carattere impulsivo, non ripetitivo; la durata dell'evento è pari a circa 280 microsecondi e la forma è grosso modo sinusoidale (un singolo periodo di sinusoida).

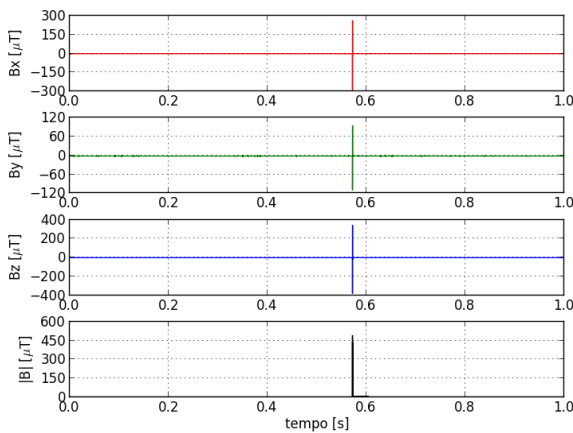


Fig. 20 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: acquisizione di 1 secondo.

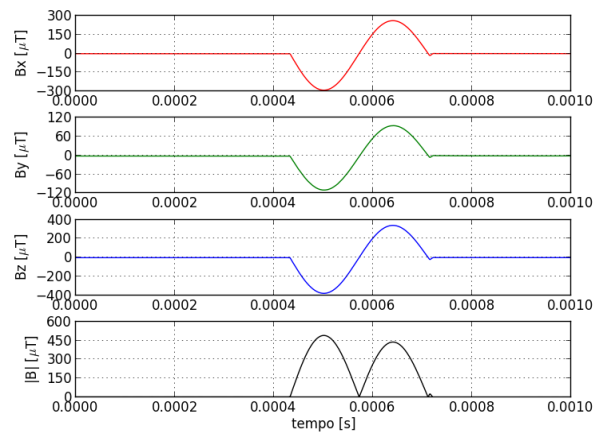


Fig. 21 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: dettaglio di 1 millisecondo centrato sul massimo.

5.2.2 - Lo spettro del campo

Nelle Fig. 22 e Fig. 23 si rappresentano i moduli degli spettri delle componenti cartesiane del modulo dell'induzione magnetica ottenuti mediante FFT applicata alle forme d'onda visualizzate in Fig. 20 e Fig. 21.

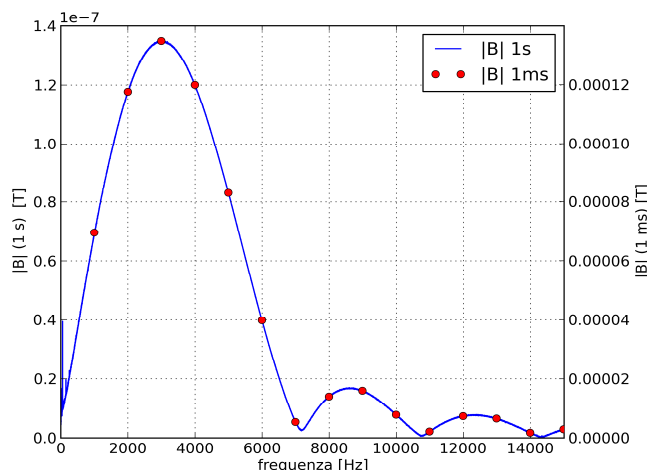


Fig. 22 – Spettri delle forme d’onda di Fig. 3 e Fig. 4

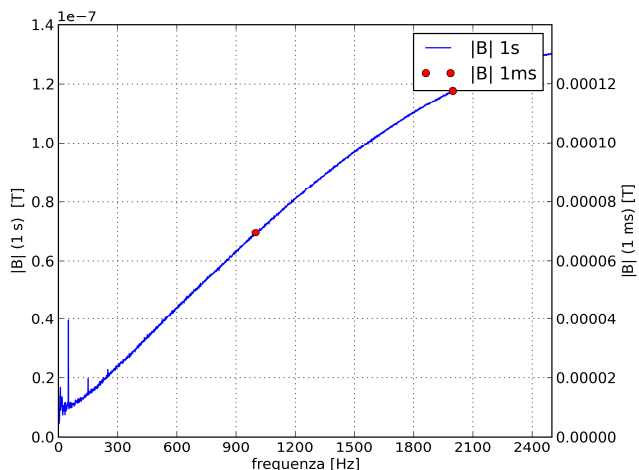


Fig. 23 – Dettaglio degli spettri delle forme d’onda di Fig. 20 e Fig. 21

I due spettri sono rappresentati in scale differenti ed in particolare si può osservare che il rapporto tra l’ampiezza delle righe coincide con il rapporto tra i tempi di osservazione dei fenomeni (1ms / 1s). Si può osservare anche che lo spettro più dettagliato (quello con risoluzione spettrale pari ad 1 Hz) permette di evidenziare delle componenti non trascurabili a 50 Hz. Tuttavia, come vedremo in seguito, queste componenti non sono significative dal punto di vista degli indici di esposizione

Il massimo dello spettro si raggiunge a circa 3 kHz ovvero alla frequenza corrispondente al periodo di sinusoidale visualizzabile in Fig. 4.

5.2.3 - Indici di esposizione

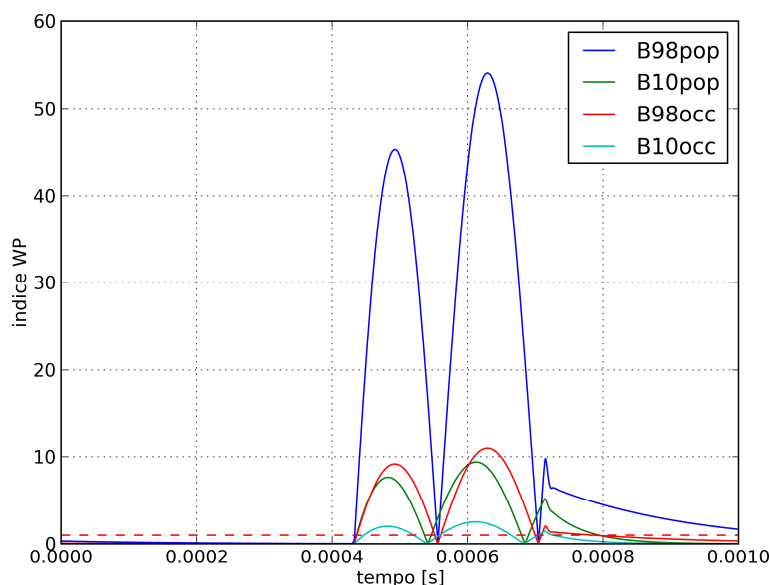
Gli indici di esposizione di riferimento per esposizioni di tipo impulsivo sono quelli determinati secondo il metodo del picco ponderato (WP nel seguito) che può essere implementato, mediante vari approcci, sia nel dominio del tempo, sia nel dominio della frequenza.

Indici determinati nel dominio del tempo. In Tab. 9 sono riportati gli indici WP, determinati nel dominio del tempo, a partire dai dati acquisiti e rappresentati nelle Fig. 20 e Fig. 21. I valori riportati in tabella sono determinati mediante procedure di elaborazione che fanno riferimento all’implementazione del metodo del picco ponderato mediante filtri analogici.

Tab. 9 – Indici di esposizione WP determinati nel dominio del tempo

	WP 1998	WP 2010
popolazione	54.08	9.41
lavoratori	11	2.54

In Fig. 24 sono rappresentati gli andamenti degli indici nel tempo, nella quale si può notare che il massimo è raggiunto in corrispondenza del secondo semi-periodo della sinusoide di Fig. 21.

**Fig. 24** – Andamento degli indici WP nel dominio del tempo

Indici determinati nel dominio della frequenza. Gli indici di esposizione riportati in Tab. 10 sono stati determinati nel dominio della frequenza a partire dallo spettro con risoluzione spettrale pari a 1000 Hz.

Come si può notare gli indici che fanno riferimento ai filtri analogici sono ben allineati con quelli calcolati nel dominio del tempo e ciò conferma come le componenti a 50 Hz che si notavano negli spettri dell'induzione magnetica di Fig. 22 e Fig. 23 non sono significative per la determinazione degli indici di esposizione.

In tabella si riportano anche gli indici determinati pesando le componenti spettrali dell'induzione magnetica con i livelli di riferimento ICNIRP definiti in termini di funzioni costanti a tratti (Funzioni 'piecewise'), come nelle tabelle delle rispettive linee guida.

Tab. 10 – Indici di esposizione WP determinati nel dominio della frequenza

Limite	Filtri analogici			Funzioni 'piecewise'		
	2003	1998	2010	2003	1998	2010
Popolazione	54.02	54.07	9.49	54.88	54.88	10.36
Lavoratori	10.99	11.02	2.55	11.17	11.17	2.78

5.3 - Misure in punti a distanza variabile dalla sorgente

Oltre alle misure di induzione magnetica in punti fissi, sono state effettuate anche delle misure di indice WP per i lavoratori e per le linee guida del 1998 muovendosi intorno alla sorgente. Le misure sono riportate in **Tab. 11**.

Tab. 11 – Misure di indici WP

d assiale [cm]	d radiale [cm]	MODE	Range	WP 1998 occ
50		ICNIRP1998occ	H	1222
60		ICNIRP1998occ	H	765
70		ICNIRP1998occ	H	430
80		ICNIRP1998occ	H	317
100		ICNIRP1998occ	H	145
120		ICNIRP1998occ	H	97
190		ICNIRP1998occ	L	31
200		ICNIRP1998occ	H	23
210		ICNIRP1998occ	L	25
220		ICNIRP1998occ	L	22.5
	50	ICNIRP1998occ	H	566
	60	ICNIRP1998occ	H	474
	80	ICNIRP1998occ	H	226
	100	ICNIRP1998occ	H	87

5.3.1 - Andamento nello spazio degli indici di esposizione

Supponendo che il campo sia caratterizzato dalla forma d'onda misurata in un punto fisso (mostrata nelle Fig. 20 e Fig. 21) è possibile scalare le misure di indice di **Tab. 11** in modo da ottenere l'andamento nello spazio degli indici relativi ai livelli di riferimento validi per la popolazione e per le linee guida del 1998 e per le linee guida del 2010 (lavoratori e popolazione).

Nei seguenti grafici e tabelle sono presi in considerazione anche i livelli di azione definiti nella direttiva 2013/35/UE, ed in particolare quelli che si differenziano rispetto ai livelli di riferimento definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010. A tal proposito è opportuno osservare che i cosiddetti limiti 'inferiori' della direttiva coincidono (sia per B/H sia per E) con i livelli di riferimento per i lavoratori definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010. La direttiva però introduce un nuovo strato di livelli di azione ('superiori') sia per il campo elettrico sia per l'induzione magnetica e, solo per quest'ultima, un ulteriore limite da applicare all'esposizione degli arti in condizioni di esposizione a distribuzioni di campo fortemente disomogenee.

Nella Fig. 25 e nella Fig. 26 sono illustrati i profili degli indici rispettivamente lungo l'asse dell'applicatore e lungo una direttrice radiale, dove la distanza è intesa dal centro dell'applicatore stesso.

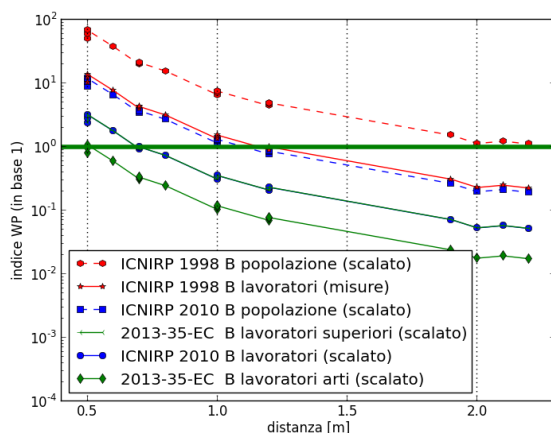


Fig. 25 – Andamento degli indici di esposizione WP in funzione della distanza lungo l'asse della spira/applicatore

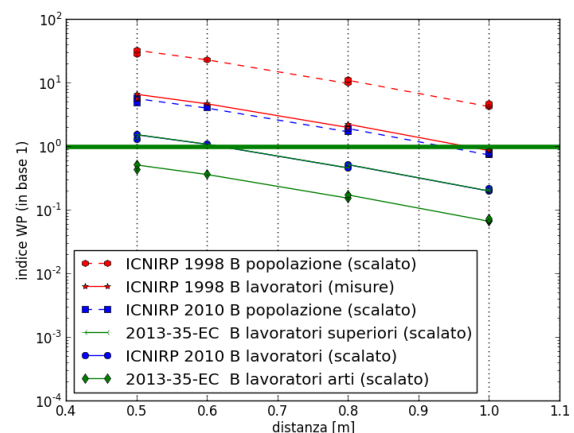


Fig. 26 – Andamento degli indici di esposizione WP in funzione della distanza lungo il raggio della spira/applicatore

5.4 - Distanze di rispetto

In Tab. 12 sono riportate le distanze di rispetto dal centro dell'applicatore, in direzione assiale, approssimativamente ricavate dalla Fig. 25.

Tab. 12 – Distanze di rispetto.

	Distanze di rispetto [m]			
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/EU sup.	2013/35/EU arti.
popolazione	>2.20	1.10		
lavoratori	1.20	0.70	0.70	0.50

Bibliografia

- 1 D.Andreuccetti, A.Bogi, N.Zoppetti: "Procedura di verifica del rispetto dei livelli di riferimento dell'induzione magnetica in presenza di forme d'onda complesse con frequenze fino a 100 khz - parte I: aspetti generali". Collana Technical, Scientific And Research Reports Vol.2 n.65-1 report n. CNR-IFAC-TR-02-010 (ISSN 2035-5831), Febbraio 2010.
- 2 N.Zoppetti, D.Andreuccetti, A.Bogi, I.Pinto: "Impatto dell'evoluzione normativa sulla valutazione del rischio da esposizione occupazionale a campi magnetici fino a 100 kHz in ambito industriale e sanitario". Atti (su supporto elettronico) del Quinto Convegno Nazionale "Il controllo degli agenti fisici: ambiente, salute e qualità della vita", 6-7-8 Giugno 2012, Novara (ISBN 978-88-7479-118-7).
- 3 ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)". Aprile 1998, Health Physics, Vol.74, N.4, pp.494-522.
- 4 ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)". Dicembre 2010, Health Physics, Vol.99, N.6, pp.818-836.
- 5 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). Gazzetta ufficiale dell'Unione europea - L 179/1, 29 Giugno 2013.