

Misure di campi elettrici e magnetici generati da defibrillatori

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 elettrico e al campo magnetico generati dai defibrillatori.

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 quattro diversi modelli di defibrillatori, 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 sui defibrillatori

I defibrillatori sono una tipologia di apparati biomedicali presente sia nei presidi medici e ospedalieri sia, nella loro versione semiautomatica, in altri ambienti di vita e di lavoro come ad esempio supermercati o impianti sportivi.

Il principio di funzionamento dell'apparecchio consiste nel 'ristabilire una condizione cardiaca stazionaria in pazienti in condizione di arresto cardiaco o di fibrillazione ventricolare, attraverso l'applicazione di una scarica di corrente elettrica' impulsiva (http://it.wikipedia.org/wiki/Defibrillatore_manuale).

In particolare i defibrillatori esterni emettono un impulso elettrico di elevata intensità (2000 / 4000 volt) e breve durata (4 / 20 millisecondi) attraverso il torace del paziente verso il cuore, in modo da restaurare il normale ritmo cardiaco in pazienti in fibrillazione ventricolare o in tachicardia ventricolare non accompagnata da pulsazioni palpabili.

L'applicazione della scarica e quindi della differenza di potenziale necessaria a sostenerla, avviene attraverso due piastre mantenute a contatto del torace del paziente (mediante pressione manuale o elettrodi autoadesivi) e alimentate da due cavi collegati ad una unità principale che funge da generatore.

Un defibrillatore è tipicamente composto da:

- un alimentatore a rete e/o un pacco batterie, un dispositivo di accumulo dell'energia di scarica ed un sistema di monitoraggio del tracciato ECG, in genere integrati in un unico modulo;
- una coppia di elettrodi (piastre) per la defibrillazione;
- i cavi che uniscono le piastre all'unità centrale.

Nei defibrillatori moderni sono attualmente impiegate due tipologie di forma d'onda dell'impulso: la forma d'onda monofasica, in uso fin dagli anni'60, e la forma d'onda bifasica, di sviluppo più recente.

Nel primo caso, la corrente fluisce tra i due elettrodi in una sola direzione, mentre nel secondo essa scorre prima in una direzione e poi nell'altra. I defibrillatori bifasici risultano più efficaci nel raggiungere rapidamente la defibrillazione, impiegando un'energia più bassa ed una minor durata della scarica.

Attualmente, sul mercato nazionale, possono essere reperite due diverse tipologie di defibrillatori esterni:

- defibrillatori manuali;
- defibrillatori semiautomatici.

I primi sono caratterizzati dalla presenza di un monitor per la visualizzazione della traccia ECG in tempo reale, derivabile sia con la connessione mediante elettrodi adesivi dedicati, sia appoggiando direttamente le piastre di defibrillazione sul torace del paziente. Tali apparecchiature sono utilizzabili soltanto da personale medico che, sulla base del tracciato ECG visualizzato sul monitor, è in grado di fare una diagnosi, determinare la necessità di una defibrillazione e

stabilire il valore più adeguato dell'energia di scarica. I defibrillatori semiautomatici differiscono dai manuali in quanto incorporano un sistema per il rilevamento e l'analisi del ritmo cardiaco a mezzo di un software di interpretazione dell'ECG e sono in grado di identificare l'aritmia e predisporre automaticamente alla scarica elettrica. Questi defibrillatori guidano l'operatore attraverso una sequenza di passi di natura intuitiva, analizzano l'ECG del paziente e comunicano all'operatore se è indicata la defibrillazione. L'operatore a questo punto attiva la scarica di defibrillazione. Non essendo necessaria l'interpretazione del segnale ECG e la successiva diagnosi dell'aritmia cardiaca da parte dell'operatore, i defibrillatori semiautomatici possono essere utilizzati anche da personale non medico che abbia preventivamente seguito un corso di addestramento al primo soccorso e alla defibrillazione.

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

- I defibrillatori sono di fatto sorgenti 'NON intenzionali' di campo, cioè apparati il cui funzionamento NON è legato all'emissione di campi elettrici o magnetici, che quindi può essere considerata un effetto indesiderato.
- Si tratta di sorgenti sia di campo elettrico sia di campo magnetico a bassa frequenza con forma d'onda impulsiva non ripetitiva (evento isolato). I campi sono emessi nell'istante corrispondente alla scarica.
- L'intensità (di picco) dell'induzione magnetica in prossimità (pochi centimetri) dai cavi può essere dell'ordine delle decine di microtesla.
- L'intensità (di picco) del campo elettrico in prossimità (pochi centimetri) dai cavi può essere dell'ordine delle centinaia di V/m.
- Dal punto di vista protezionistico, generalmente, il campo elettrico è più rilevante del campo magnetico.

3 - Il defibrillatore Medtronic Life Pak 12

Il defibrillatore marca Medtronic, Modello Life Pak 12 (Fig. 1) è stato provato usando come carico il tester per defibrillatori modello Impulse 6000D della Fluke Biomedical che offre un carico resistivo fisso di 50 ohm. Il defibrillatore è stato utilizzato in modalità bifasica con energia dell'impulso pari a circa 370 J.



Fig. 1 – L'apparato testato

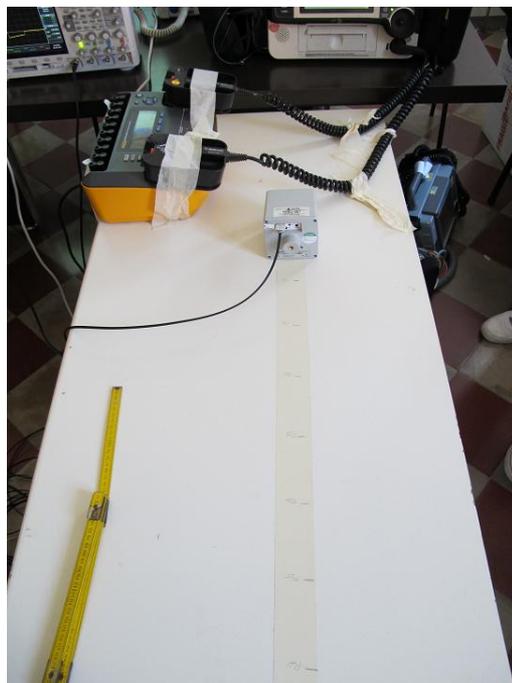


Fig. 2 – Il teatro espositivo

3.1 - Punti di misura

Sono state eseguite misure di 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 Low, in un punto fisso, a circa 10 cm dall'applicatore in direzione assiale. Inoltre sono state eseguite misure sia di campo elettrico sia di campo magnetico usando lo strumento Narda EHP50-E usato in modalità weighted peak. In particolare sono state eseguite misure dell'indice WP per i lavoratori e per le linee guida ICNIRP del 2010 [3] in punti a distanza variabile dai cavi di alimentazione delle piastre, come rappresentato nella foto di Fig. 2. In questi stessi punti si è infine misurato l'indice WP per i soli lavoratori e per le linee guida ICNIRP del 1998 [4] usando l'ELT400.

3.2 - Acquisizioni delle forme d'onda dell'induzione magnetica in un punto fisso

Le considerazioni sviluppate nel seguente paragrafo riguardano misure di induzione magnetica. Trattando però di un dispositivo assimilabile ad una *sorgente monofase di campo a bassa frequenza* (cioè caratterizzata da un unico circuito principale) chiuso su un carico puramente resistivo (50 ohm), si può supporre che la forma d'onda dell'induzione magnetica sia quella della corrente che scorre sul circuito stesso e che quest'ultima coincida con quella della differenza di potenziale sul carico. Si può pertanto concludere che la forma d'onda dell'induzione magnetica e del campo elettrico siano qualitativamente equivalenti.

3.2.1 - La forma d'onda del campo

In Fig. 3 e Fig. 4 sono rappresentate le forme d'onda delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica acquisite mediante le uscite analogiche dell'ELT400 (usato in modalità $320 \mu\text{T}$, range Low, sonda 100 cm^2) a circa 10 centimetri da uno dei cavi di alimentazione delle piastre. È stata effettuata un'acquisizione di 1 secondo in modo da essere sicuri di registrare l'evento che invece ha una durata dell'ordine delle decine di millisecondi. In particolare in Fig. 3 è rappresentata l'intera forma d'onda acquisita mentre in Fig. 4 si può osservare un 'ritaglio' di 50 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 20 millisecondi.

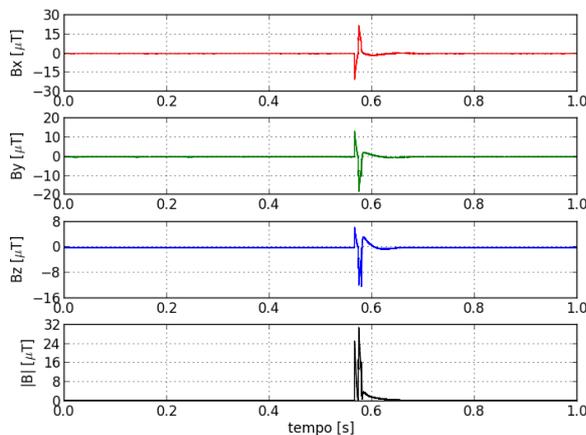


Fig. 3 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: acquisizione di 1 secondo.

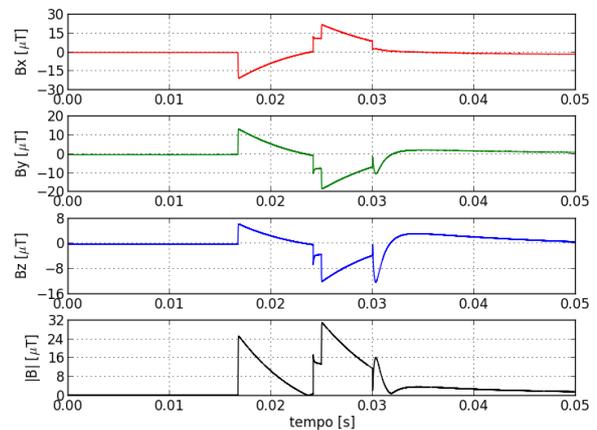


Fig. 4 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: dettaglio di 50 millisecondi centrato sul massimo.

3.2.2 - Lo spettro del campo

In Fig. 5 e Fig. 6 sono rappresentati i moduli degli spettri delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica, ottenuti mediante FFT applicata alle forme d'onda visualizzate in Fig. 3 e Fig. 4.

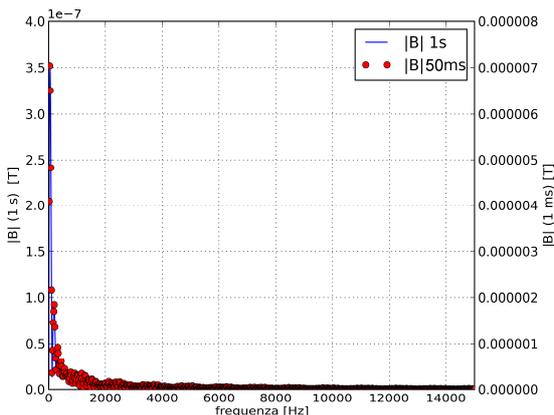


Fig. 5 – Spettri delle forme d’onda di Fig. 3 e Fig. 4

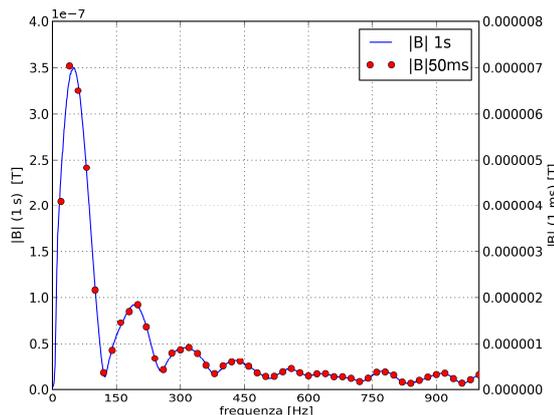


Fig. 6 – Dettaglio degli spettri delle forme d’onda di Fig. 3 e Fig. 4

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 (50ms / 1s).

3.2.3 - Indici di esposizione

Gli indici di esposizione di riferimento per campi con forma d’onda 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].

Il metodo WP è stato introdotto in uno statement dell’ICNIRP pubblicato nel 2003 [5] ed è stato esteso nelle linee guida del 2010. L’applicazione dello stesso metodo in relazione ad i livelli di riferimento definiti nelle precedenti linee guida del 1998 può essere quindi implementata secondo almeno due approcci.

- L’approccio definito nello statement dell’ICNIRP del 2003 in cui il metodo WP considera solo la frequenza caratteristica a 800/820 Hz (popolazione/lavoratori) dei livelli di riferimento ed inoltre la procedura è limitata a specifici intervalli di frequenza (8Hz-65kHz per i lavoratori, 8Hz-100kHz per la popolazione).
- Secondo l’approccio ‘esteso’ definito nelle linee guida del 2010:
 - si considerano tutte le frequenze caratteristiche dei livelli riferimento specificatamente introdotte per tenere conto degli effetti di stimolazione (cioè quelle più piccole di 1 kHz nel caso delle linee guida del 1998);
 - si estende l’applicazione del metodo a tutto l’intervallo di frequenze in cui hanno rilevanza gli effetti di stimolazione cioè le frequenze più piccole di 10MHz.

In questo documento si è applicato il secondo dei due approcci elencati.

Per completezza e nel solo caso delle misure delle forme d’onda dell’induzione magnetica eseguite in un punto di riferimento sono stati determinati i cosiddetti indici Standard, introdotti nelle linee guida del 1998 e ripresi sia nello statement del 2003 sia nelle linee guida del 2010.

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.

Tab.1 – Indici di esposizione WP per l’induzione magnetica determinati nel dominio del tempo

	WP 1998	WP 2010
popolazione	234%	45%
lavoratori	47%	12%

In Fig. 7 sono rappresentati gli andamenti degli indici nel tempo, nella quale si può notare che il massimo è raggiunto in corrispondenza del primo fronte di salita della forma d’onda di Fig. 4.

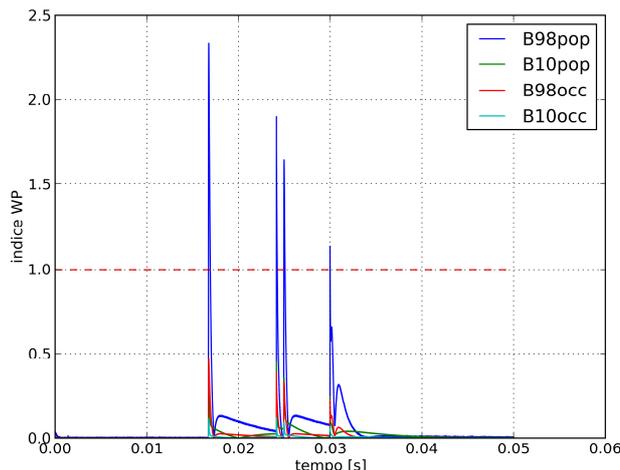


Fig. 7 – Andamento degli indici WP per l'induzione magnetica nel dominio del tempo (indici in base unitaria)

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 20 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') nelle tabelle delle rispettive linee guida.

Tab. 2 – Indici di esposizione WP per l'induzione magnetica determinati nel dominio della frequenza

	Filtri analogici		Funzioni 'piecewise'	
	WP1998	WP2010	WP1998	WP2010
Popolazione	234%	46%	210%	41%
Lavoratori	47%	12%	43%	11%

Infine, per completezza, in Tab. 3, si riportano gli indici STD per l'induzione magnetica che fanno riferimento alle definizioni dei livelli di riferimento con funzioni piecewise e che risultano come previsto sensibilmente maggiori dei corrispondenti indici WP.

Tab. 3 – Indici di esposizione STD per l'induzione magnetica

	STD 1998	STD 2010
popolazione	677%	129%
lavoratori	137%	34%

3.3 - Misure di indice WP in punti a distanza variabile dalla sorgente

Oltre alle misure di induzione magnetica in punti fissi, sono state effettuate anche delle misure di induzione magnetica e di indice WP (per il campo elettrico e per l'induzione magnetica) muovendosi intorno alla sorgente. Le misure sono state effettuate in due giornate distinte e sono riportate in Tab. 4 (21 febbraio) ed in Tab. 5 (28 febbraio).

Tab. 4 – Misure di indici WP per l'induzione magnetica e per il campo elettrico (misure 21 febbraio 2013)

Sonda	Narda ELT-400		Narda-PMM EHP-50E			
	Induzione Magnetica		Induzione Magnetica		Campo Elettrico	
Limiti	B-picco	ICNIRP-1998	ICNIRP-2010			
Distanza	[μ T]	Lavoratori	Lavoratori	Popolazione	Lavoratori	Popolazione
10	30.87	86%	24%	84%	36%	70%
20	10.40	26%	4%	17%	24%	50%
30	6.53	14%	2%	6%	15%	31%

Tab. 5 – Misure di indici WP per l'induzione magnetica e per il campo elettrico (misure 28 febbraio 2013)

Sonda	Narda-PMM EHP-50E			
	Induzione Magnetica		Campo Elettrico	
Limiti	ICNIRP-2010			
Distanza	Induzione Magnetica		Campo Elettrico	
	Lavoratori	Popolazione	Lavoratori	Popolazione
10	26%	105%	182%	370%
20	6%	24%	71%	134%
30		11%	31%	58%
40				30%

L'analisi della Tab. 4 e della Tab. 5 ed il confronto con Tab. 2 si prestano a numerosi commenti ed osservazioni, elencati nel seguito.

I dati di Tab. 2 e Tab. 4 si riferiscono alla stessa configurazione di cavi (quella delle acquisizioni in un punto fisso illustrate nei precedenti paragrafi), che è differente da quella relativa alla Tab. 5.

Gli indici WP calcolati per via numerica a partire dalle misure di campo effettuate con l'ELT400 in modalità Field Strength (Tab. 2) NON sono allineati con quelli misurati con lo stesso strumento in modalità STD (Tab. 4, WP1998 lavoratori). Ciò avviene perché i filtri di cui è equipaggiato l'ELT400 considerano la frequenza caratteristica di 65kHz (lavoratori) oltre la quale i livelli di riferimento per i lavoratori decrescono per tenere conto degli effetti termici. Al contrario la risposta in frequenza dei filtri numerici usati per determinare i dati riportati in Tab. 2 è piatta oltre 800/820Hz. Come verifica di quanto detto sopra, in Tab.6 si riportano gli indici determinati numericamente a partire dalle fdo di Fig. 4 (misurate a 20 cm) usando sia i filtri WP propriamente detti (WP1998) sia quelli che tengono conto del polo a 65/150 kHz (ICNIRP98 ELT400).

Tab.6 – Confronto tra filtri che implementano limiti piatti oltre 800/820 Hz e limiti che decrescono oltre 65/150 kHz

	WP 1998	ICNIRP98 ELT400
popolazione	234%	262%
lavoratori	47%	91%

A parità di distanza (10 cm) gli indici di esposizione misurati con l'EHP50E, relativi all'induzione magnetica e alle linee guida del 2010 riportati in Tab. 4 sono dello stesso ordine di grandezza di quelli riportati in Tab. 2 e determinati sulla base di misure di campo effettuate con l'ELT400 (detti indici possono ritenersi allineati, tenendo anche presente che i sensori hanno forma diversa e che la misura era molto vicina alla sorgente).

A parità di distanza gli indici di esposizione relativi al campo elettrico ed alle linee guida del 2010 di Tab. 4 sono almeno 3 volte più piccoli di quelli analoghi di Tab. 5. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che nelle due configurazioni misurate, la piastra più vicina fosse in un caso quella riferita a massa e nell'altro quella connessa al polo caldo del generatore. Questa ipotesi è confermata dal fatto che gli indici riferiti all'induzione magnetica sono invece molto più simili (la corrente che scorre sui due cavi è idealmente la stessa indipendentemente dall'eventuale sbilanciamento in tensione). Oppure le differenze osservate potrebbero essere imputabili alle diverse caratteristiche dei tavoli sui quali le

misure sono state effettuate o alla diversa disposizione degli elementi in gioco che nel caso del campo elettrico assume particolare rilevanza (Fig. 8 e Fig. 9).



Fig. 8 – Setup misure 21 febbraio 2013



Fig. 9 – Setup misure 28 febbraio 2013

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 riportate in Tab. 5 in modo da ottenere l'andamento nello spazio degli indici relativi ai livelli di riferimento definiti nelle linee guida ICNIRP del 1998 per la popolazione e lavoratori.

Ciò è possibile sia per gli indici validi per l'induzione magnetica sia per quelli relativi al campo elettrico in quanto, trattando di misure su carico resistivo e di una sorgente assimilabile ad una sorgente monofase, si può supporre che campo elettrico e campo magnetico siano caratterizzati dalla stessa forma d'onda.

Nei seguenti grafici e tabelle sono presi in considerazione anche i livelli di azione definiti nella direttiva 2013/35/UE [6], 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. 10 e nella Fig 11 sono illustrati i profili degli indici WP rispettivamente per l'induzione magnetica e per il campo elettrico dove la distanza è intesa dal cavo di alimentazione della piastra più vicina (Fig. 2).

Per i motivi esposti in precedenza (a proposito degli indici WP per l'induzione magnetica misurati con l'ELT400) si considerano come riferimento le sole misure di indice WP effettuate mediante EHP50E.

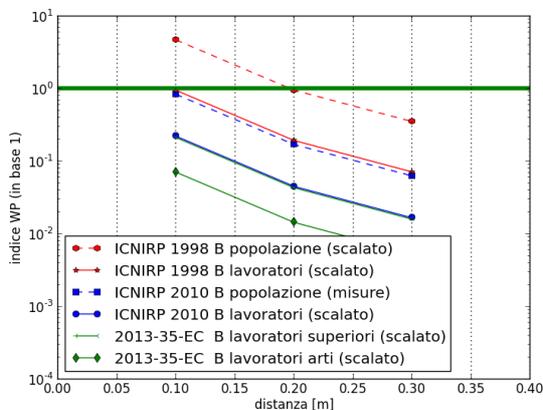


Fig. 10 – Andamento degli indici di esposizione WP per l'induzione magnetica in funzione della distanza da uno dei cavi di alimentazione delle piastre

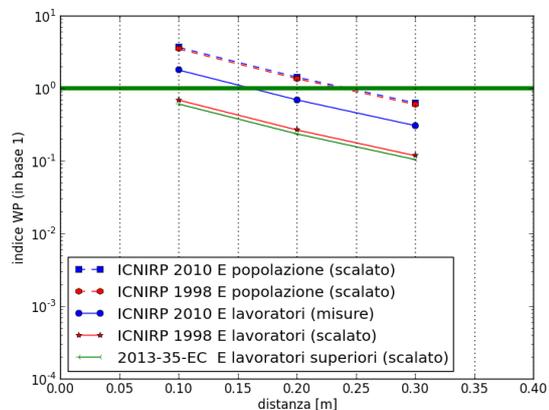


Fig. 11 – Andamento degli indici di esposizione WP per il campo elettrico in funzione della distanza da uno dei cavi di alimentazione delle piastre

3.4 - Distanze di rispetto

In Tab.7 e Tab.8 sono riportate le distanze di rispetto approssimativamente ricavate dalla Fig. 10 e dalla Fig 11. Come si può notare il campo elettrico risulta dare luogo a distanze di rispetto simili a quelle relative all'induzione magnetica. È necessario però considerare che qualsiasi confronto tra risultati relativi al campo elettrico ed induzione magnetica dipende fortemente dal carico su cui sono chiuse le piastre; in particolare con carichi maggiori dei 50 ohm usati per le misure qui presentate ci si può aspettare che il campo elettrico tenda a dare luogo a distanze di rispetto maggiori rispetto all'induzione magnetica e viceversa.

Tab.7 – Distanze di rispetto per l'induzione magnetica.

	Distanze di rispetto per l'induzione magnetica [m]			
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/UE sup.	2013/35/UE arti.
popolazione	0.25	0.10		
lavoratori	0.10	<0.10	<0.10	<0.10

Tab.8 – Distanze di rispetto per il campo elettrico.

	Distanze di rispetto per il campo elettrico [m]		
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/UE sup.
popolazione	0.25	0.26	
lavoratori	<0.10	0.17	<0.10

4 - Il defibrillatore Medtronic Life Pak 15

Il defibrillatore marca Medtronic, Modello Life Pak 15 (Fig. 12) è stato provato usando come carico il tester per defibrillatori modello Impulse 6000D della Fluke Biomedical che offre un carico resistivo fisso di 50 ohm. Il defibrillatore è stato utilizzato in modalità bifasica con energia dell'impulso pari a circa 370 J.



Fig. 12 – L'apparato testato

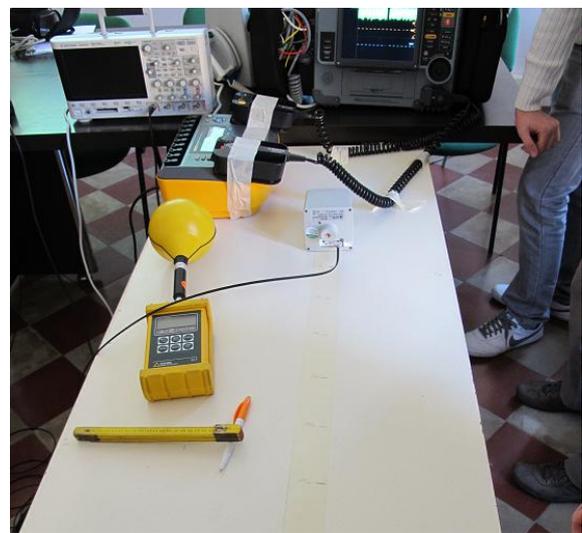


Fig. 13 – Il teatro espositivo

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 320μT Range Low, in un punto fisso, a circa 10 cm dall'applicatore in direzione assiale;

Inoltre sono state eseguite misure sia di campo elettrico sia di campo magnetico usando lo strumento Narda EHP50-E usato in modalità weighted peak. In particolare sono state eseguite misure dell'indice WP per i lavoratori e

per le linee guida ICNIRP del 2010 in punti a distanza variabile dai cavi di alimentazione delle piastre, come rappresentato nella foto di Fig. 13 In questi stessi punti si è infine misurato l'indice WP per i soli lavoratori e per le linee guida ICNIRP del 1998 usando l'ELT400.

4.2 - Acquisizioni delle forme d'onda dell'induzione magnetica in un punto fisso

Le considerazioni sviluppate nel seguente paragrafo riguardano misure di induzione magnetica. Trattando però di un dispositivo assimilabile ad una *sorgente monofase di campo a bassa frequenza* (cioè caratterizzata da un unico circuito principale) chiuso su un carico puramente resistivo (50 ohm), si può supporre che la forma d'onda dell'induzione magnetica sia quella della corrente che scorre sul circuito stesso e che quest'ultima coincida con quella della differenza di potenziale sul carico. Si può pertanto concludere che la forma d'onda dell'induzione magnetica e del campo elettrico siano qualitativamente equivalenti.

4.2.1 - La forma d'onda del campo

In Fig. 14 e Fig.15 sono rappresentate le forme d'onda delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica acquisite mediante le uscite analogiche dell'ELT400 (usato in modalità 320 μT , range Low, sonda 100 cm^2) a circa 10 centimetri da uno dei cavi di alimentazione delle piastre. Le misure sono state effettuate in data 21 febbraio 2013. È stata effettuata un'acquisizione di 1 secondo in modo da essere sicuri di registrare l'evento che invece ha una durata dell'ordine delle decine di millisecondi. In particolare in Fig. 14 è rappresentata l'intera forma d'onda acquisita mentre in Fig.15 si può osservare un 'ritaglio' di 50 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 20 millisecondi.

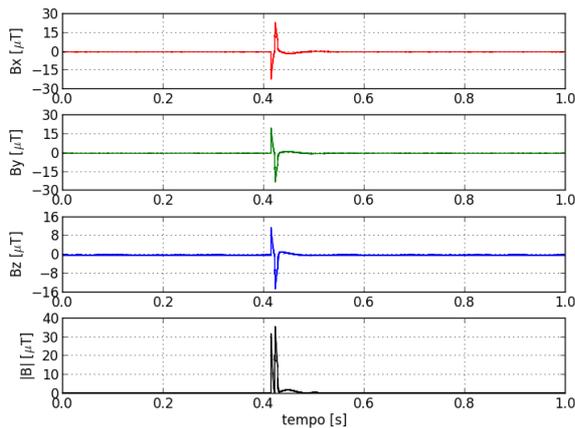


Fig. 14 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: acquisizione di 1 secondo.

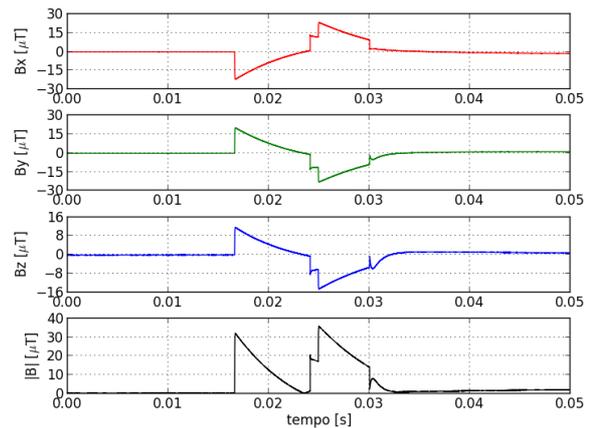


Fig.15 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: dettaglio di 50 millisecondi centrato sul massimo.

4.2.2 - Lo spettro del campo

In Fig. 16 e Fig. 17 si rappresentano i moduli degli spettri delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica ottenuti mediante FFT applicata alle forme d'onda visualizzate in Fig. 14 e Fig.15.

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 (50ms / 1s).

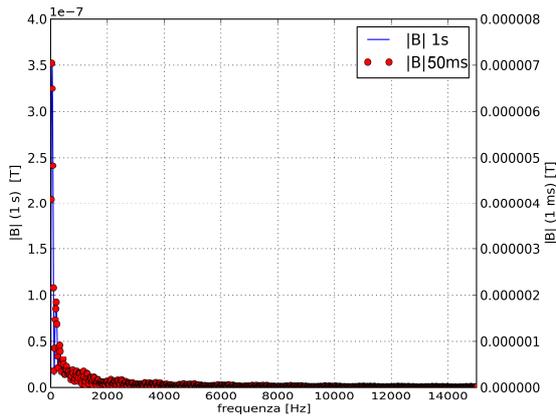


Fig. 16 – Spettri delle forme d'onda di Fig. 14 e Fig. 15.

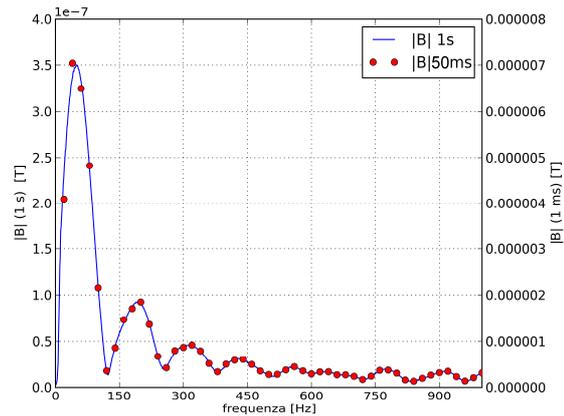


Fig. 17 – Dettaglio degli spettri delle forme d'onda di Fig. 14 e Fig. 15.

4.2.3 - Indici di esposizione

Gli indici di esposizione di riferimento per campi con forma d'onda 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.

Il metodo WP è stato completamente caratterizzato e definito solo nelle linee guida del 2010. L'applicazione dello stesso metodo in relazione ai livelli di riferimento definiti nelle precedenti linee guida può essere implementata secondo almeno due approcci.

- L'approccio definito nello statement dell'ICNIRP in cui il metodo WP viene introdotto per la prima volta considera solo la frequenza caratteristica a 800/820 Hz (popolazione/lavoratori) dei livelli di riferimento ed inoltre la procedura è limitata a specifici intervalli di frequenza (8Hz-65kHz per i lavoratori, 8Hz-100kHz per la popolazione).
- In modo analogo a quanto viene fatto nelle linee guida del 2010, vale a dire:
 - considerando tutte le frequenze caratteristiche dei livelli riferimento specificatamente introdotte per tenere conto degli effetti di stimolazione (cioè quelle più piccole di 1 kHz nel caso delle linee guida del 1998);
 - estendendo l'applicazione del metodo all'intervallo delle frequenze più piccole di 10MHz.

In questo documento si è applicato il secondo dei due approcci elencati.

Per completezza e nel solo caso delle misure delle forme d'onda dell'induzione magnetica eseguite in un punto di riferimento sono stati determinati i cosiddetti indici Standard, introdotti nelle linee guida del 1998 e ripresi sia nello statement del 2003 sia nelle linee guida del 2010.

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. 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.

Tab. 9 – Indici di esposizione WP l'induzione magnetica determinati nel dominio del tempo

	WP 1998	WP 2010
popolazione	300%	55%
lavoratori	61%	15%

In Fig. 18 sono rappresentati gli andamenti degli indici nel tempo, nella quale si può notare che il massimo è raggiunto in corrispondenza del primo fronte di salita della forma d'onda di Fig.15.

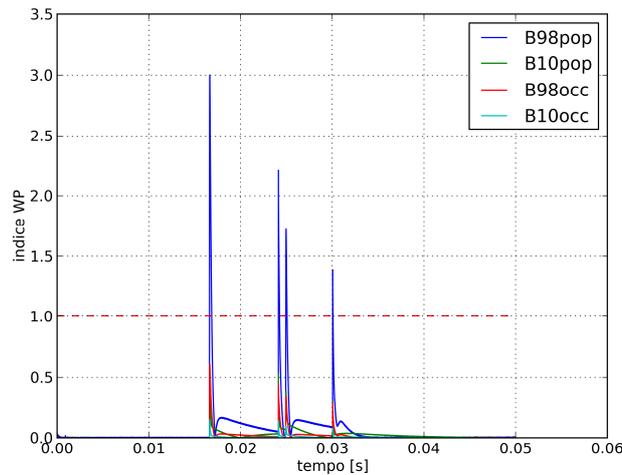


Fig. 18 – Andamento degli indici WP (in base unitaria) per l'induzione magnetica nel dominio del tempo

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 20 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') nelle tabelle delle rispettive linee guida.

Tab. 10 – Indici di esposizione WP per l'induzione magnetica determinati nel dominio della frequenza

	Filtri analogici		Funzioni 'piecewise'	
	WP1998	WP2010	WP1998	WP2010
Popolazione	300%	56%	268%	52%
Lavoratori	61%	15%	54%	14%

Infine, per completezza, in Tab 11, si riportano gli indici STD per l'induzione magnetica che fanno riferimento alle definizioni dei livelli di riferimento con funzioni piecewise e che risultano come previsto sensibilmente maggiori dei corrispondenti indici WP.

Tab 11 – Indici di esposizione STD per l'induzione magnetica

	STD 1998	STD 2010
popolazione	792%	152%
lavoratori	161%	40%

4.3 - Misure di indice WP in punti a distanza variabile dalla sorgente

Oltre alle misure di induzione magnetica in punti fissi, sono state effettuate anche delle misure di induzione magnetica e di indice WP (per il campo elettrico e per l'induzione magnetica) muovendosi intorno alla sorgente. Le misure sono state effettuate in due giornate distinte e sono riportate in Tab.12 (21 febbraio) ed in Tab. 13 (28 febbraio).

Tab.12 – Misure di indici WP per l'induzione magnetica e per il campo elettrico (misure 21 febbraio 2013)

Sonda	Narda ELT-400		Narda-PMM EHP-50E			
	Induzione Magnetica		Induzione Magnetica		Campo Elettrico	
Limiti	B-picco	ICNIRP-1998	ICNIRP-2010			
Distanza	[μ T]	Lavoratori	Lavoratori	Popolazione	Lavoratori	Popolazione
10	35.72	105%	22%	82%	31%	59%
20	12.39	36%	5%	20%	20%	40%
30	5.59	16%	2%	8%	13%	27%

Tab. 13 – Misure (28 febbraio 2013) di indici WP per l'induzione magnetica e per il campo elettrico

Sonda	Narda-PMM EHP-50E			
Limiti	ICNIRP-2010			
	Induzione Magnetica		Campo Elettrico	
Distanza	Lavoratori	Popolazione	Lavoratori	Popolazione
10		129%		362%
20		30%		135%
30		10%		61%
34				44%

L'analisi della Tab.12 e della Tab. 13 ed il confronto con Tab. 10 si prestano a numerosi commenti ed osservazioni, elencati nel seguito.

I dati di Tab. 10 e Tab.12 si riferiscono alla stessa configurazione di cavi (quella delle acquisizioni in un punto fisso illustrate nei precedenti paragrafi), che è differente da quella relativa alla Tab. 13.

Gli indici WP calcolati per via numerica a partire dalle misure di campo effettuate con l'ELT400 in modalità Field Strength (Tab. 9 e Tab. 10) NON sono allineati con quelli misurati con lo stesso strumento in modalità STD (Tab.12, WP1998 lavoratori). Ciò avviene perché i filtri di cui è equipaggiato l'ELT400 considerano la frequenza caratteristica di 65kHz (lavoratori) oltre la quale i livelli di riferimento per i lavoratori decrescono per tenere conto degli effetti termici. Al contrario la risposta in frequenza dei filtri numerici usati per determinare i dati riportati in Tab. 10 è piatta oltre 800/820Hz.

Tab. 14 – Confronto tra filtri che implementano limiti piatti oltre 800/820 Hz e limiti che decrescono oltre 65/150 kHz

	WP 1998	ICNIRP98 ELT400
popolazione	300%	306%
lavoratori	61%	102%

A parità di distanza (10 cm) gli indici di esposizione misurati con l'EHP50E, relativi all'induzione magnetica e alle linee guida del 2010 riportati in Tab.12 sono dello stesso ordine di grandezza di quelli riportati in Tab. 10 (determinati sulla base di misure di campo effettuate con l'ELT400). Si ritiene che detti indici possano ritenersi allineati, tenendo anche presente che i sensori hanno forma diversa e che la misura è stata effettuata in un punto vicino alla sorgente nel quale il campo è caratterizzato da forti gradienti spaziali.

A parità di distanza gli indici di esposizione relativi al campo elettrico ed alle linee guida del 2010 di Tab.12 sono almeno 3 volte più piccoli di quelli analoghi di Tab. 13. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che nelle due configurazioni misurate, la piastra più vicina fosse in un caso quella riferita a massa e nell'altro quella connessa al polo caldo del generatore. Questa ipotesi è confermata dal fatto che gli indici riferiti all'induzione magnetica sono invece molto più simili (la corrente che scorre sui due cavi è idealmente la stessa indipendentemente dall'eventuale sbilanciamento in tensione). Oppure le differenze osservate potrebbero essere imputabili alle diverse caratteristiche dei tavoli sui quali le misure sono state effettuate o alla diversa disposizione degli elementi in gioco che nel caso del campo elettrico assume particolare rilevanza (Fig. 19 e Fig. 20).



Fig. 19 – Setup misure 21 febbraio 2013

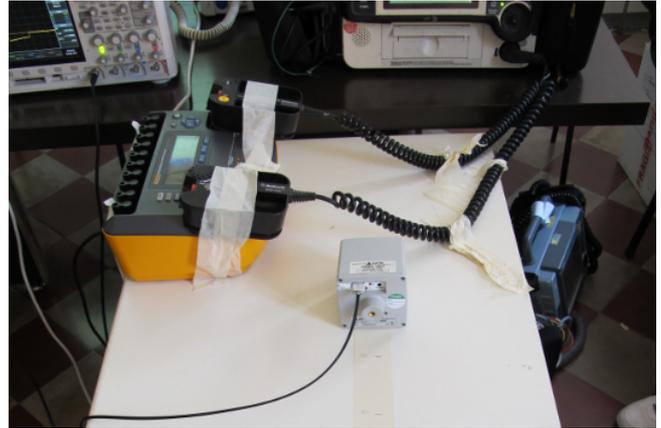


Fig. 20 – Setup misure 28 febbraio 2013

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 in Fig. 14 e Fig. 15) è possibile scalare le misure di indice riportate in Tab. 13 in modo da ottenere l'andamento nello spazio degli indici relativi ai livelli di riferimento definiti nelle linee guida ICNIRP del 1998 per la popolazione e lavoratori.

Ciò è possibile sia per gli indici validi per l'induzione magnetica sia per quelli relativi al campo elettrico in quanto, trattando di misure su carico resistivo e di una sorgente assimilabile ad una sorgente monofase, si può supporre che campo elettrico e campo magnetico siano caratterizzati dalla stessa forma d'onda.

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. 21 e nella Fig. 22 sono illustrati i profili degli indici WP rispettivamente per l'induzione magnetica e per il campo elettrico dove la distanza è intesa dal cavo di alimentazione della piastra più vicina.

Per i motivi esposti in precedenza (a proposito degli indici WP misurati con l'ELT400) si considerano come riferimento le sole misure di indice WP effettuate mediante EHP50E.

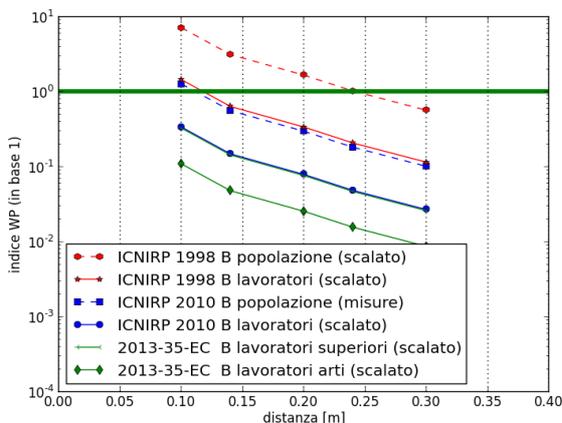


Fig. 21 – Andamento degli indici di esposizione WP per l'induzione magnetica in funzione della distanza da uno dei cavi di alimentazione delle piastre (misure EHP50E 28 febbraio)

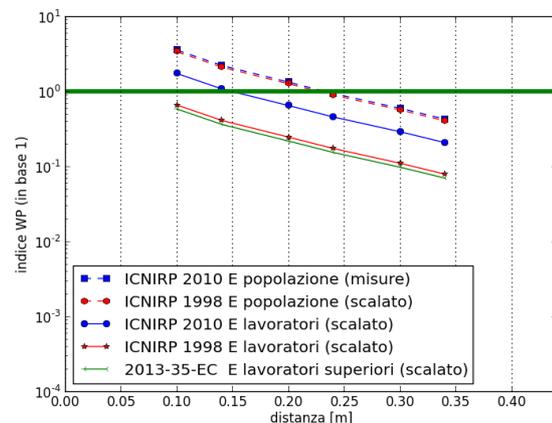


Fig. 22 – Andamento degli indici di esposizione WP per il campo elettrico in funzione della distanza da uno dei cavi di alimentazione delle piastre (misure EHP50E 28 febbraio)

4.4 - Distanze di rispetto

In Tab. 15 e Tab. 16 sono riportate le distanze di rispetto approssimativamente ricavate dalla Fig. 21 e dalla Fig. 22. Come si può notare il campo elettrico risulta dare luogo a distanze di rispetto simili a quelle relative all'induzione magnetica.

È necessario però considerare che qualsiasi confronto tra risultati relativi al campo elettrico ed induzione magnetica dipende fortemente dal carico su cui sono chiuse le piastre; in particolare con carichi maggiori dei 50 ohm usati per le misure qui presentate ci si può aspettare che il campo elettrico tenda a dare luogo a distanze di rispetto maggiori rispetto all'induzione magnetica e viceversa.

Tab. 15 – Distanze di rispetto per l'induzione magnetica.

	Distanze di rispetto per l'induzione magnetica [m]			
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/UE sup.	2013/35/UE arti.
popolazione	0.24	0.12		
lavoratori	0.12	<0.10	<0.10	<0.10

Tab. 16 – Distanze di rispetto per il campo elettrico.

	Distanze di rispetto per il campo elettrico [m]		
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/UE sup.
popolazione	0.23	0.24	
lavoratori	<0.10	0.15	<0.10

5 - Il defibrillatore Shiller Defigard 5000

Il defibrillatore marca Shiller Medical, Modello Defigard 5000 (Fig. 23) è stato provato usando come carico il tester per defibrillatori modello Impulse 6000D della Fluke Biomedical che offre un carico resistivo fisso di 50 ohm. Il defibrillatore è stato utilizzato in modalità bifasica con energia dell'impulso variabile tra 173 e 176 J.



Fig. 23 – L'apparato testato

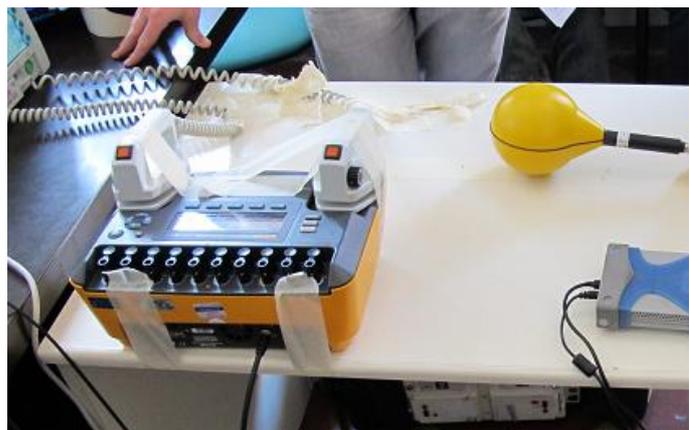


Fig. 24 – Il teatro espositivo

5.1 - 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 me-

dianche le uscite analogiche dell'ELT-400 usato in modalità 320 μT Range Low, in un punto fisso, a circa 10 cm dall'applicatore in direzione assiale.

Inoltre sono state eseguite misure sia di campo elettrico sia di campo magnetico usando lo strumento Narda EHP50-E usato in modalità weighted peak. In particolare sono state eseguite misure dell'indice WP per i lavoratori e per le linee guida ICNIRP del 2010 in punti a distanza variabile dai cavi di alimentazione delle piastre, come rappresentato nella foto di Fig 24. In questi stessi punti si è infine misurato l'indice WP per i soli lavoratori e per le linee guida del 1998 usando l'ELT400.

5.2 - Acquisizioni delle forme d'onda dell'induzione magnetica in un punto fisso

Le considerazioni sviluppate nel seguente paragrafo riguardano misure di induzione magnetica. Trattando però di un dispositivo assimilabile ad una *sorgente monofase di campo a bassa frequenza* (cioè caratterizzata da un unico circuito principale) chiuso su un carico puramente resistivo (50 ohm), si può supporre che la forma d'onda dell'induzione magnetica sia quella della corrente che scorre sul circuito stesso e che quest'ultima coincida con quella della differenza di potenziale sul carico. Si può pertanto concludere che la forma d'onda dell'induzione magnetica e del campo elettrico siano qualitativamente equivalenti.

5.2.1 - La forma d'onda del campo

In Fig. 25 e Fig. 26 sono rappresentate le forme d'onda delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica acquisite mediante le uscite analogiche dell'ELT400 (usato in modalità 320 μT , range Low, sonda 100 cm^2) a circa 20 centimetri da uno dei cavi di alimentazione delle piastre. È stata effettuata un'acquisizione di 1 secondo in modo da essere sicuri di registrare l'evento che invece ha una durata dell'ordine delle decine di millisecondi. In particolare in Fig. 25 è rappresentata l'intera forma d'onda acquisita mentre in Fig. 26 si può osservare un 'ritaglio' di 20 ms intorno al massimo. Come si può notare l'induzione magnetica ha carattere impulsivo, non ripetitivo; e la durata dell'evento è inferiore a 10 millisecondi.

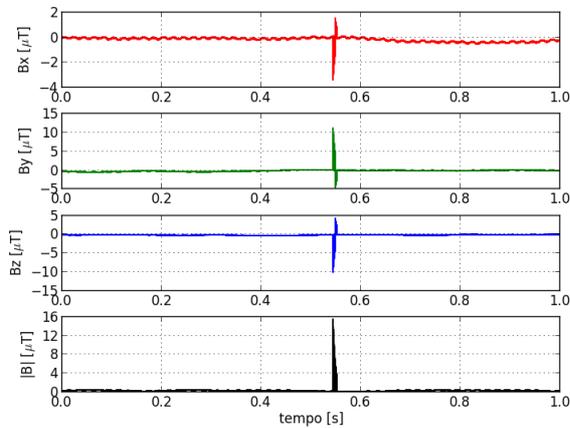


Fig. 25 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: acquisizione di 1 secondo.

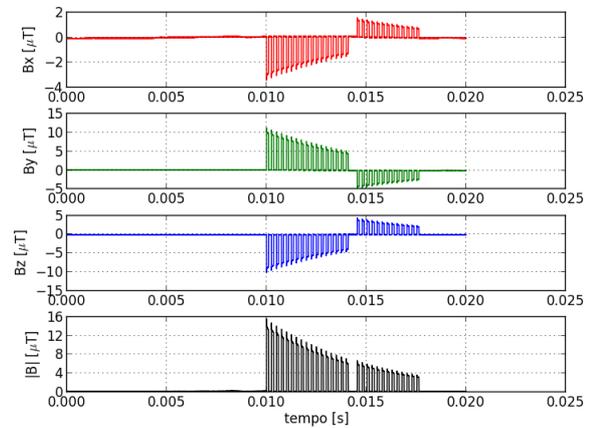


Fig. 26 – Forme d'onda dell'induzione magnetica: dettaglio di 20 millisecondi centrato sul massimo.

5.2.2 - Lo spettro del campo

In Fig. 27 e Fig. 28 si rappresentano i moduli degli spettri dell'induzione magnetica ottenuti mediante FFT applicata alle forme d'onda visualizzate in Fig. 25 e Fig. 26.

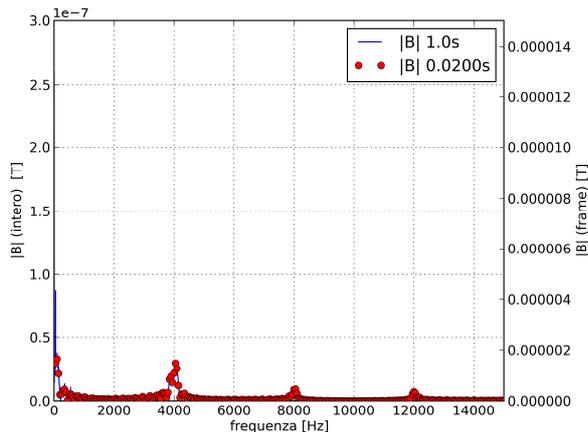


Fig. 27 – Spettri delle forme d’onda di Fig. 25 e Fig. 26.

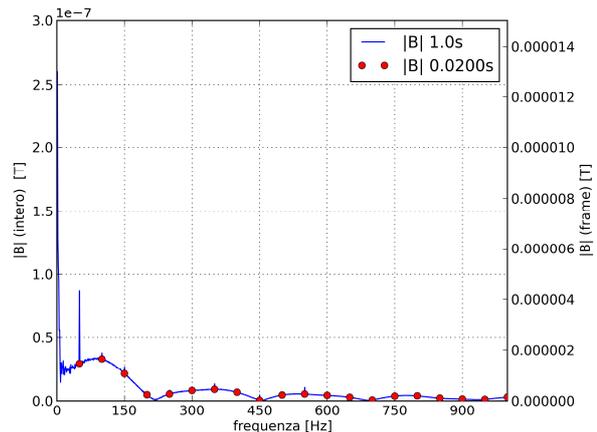


Fig. 28 – Dettaglio degli spettri delle forme d’onda di Fig. 25 e Fig. 26.

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 (20ms / 1s).

5.2.3 - Indici di esposizione

Gli indici di esposizione di riferimento per campi con forma d’onda 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.

Il metodo WP è stato completamente caratterizzato e definito solo nelle linee guida del 2010. L’applicazione dello stesso metodo in relazione ad i livelli di riferimento definiti nelle precedenti linee guida può essere implementata secondo almeno due approcci.

- L’approccio definito nello statement dell’ICNIRP in cui il metodo WP viene introdotto per la prima volta considera solo la frequenza caratteristica a 800/820 Hz (popolazione/lavoratori) dei livelli di riferimento ed inoltre la procedura è limitata a specifici intervalli di frequenza (8Hz-65kHz per i lavoratori, 8Hz-100kHz per la popolazione).
- In modo analogo a quanto viene fatto nelle linee guida del 2010, vale a dire:
 - considerando tutte le frequenze caratteristiche dei livelli riferimento specificatamente introdotte per tenere conto degli effetti di stimolazione (cioè quelle più piccole di 1 kHz nel caso delle linee guida del 1998);
 - estendendo l’applicazione del metodo all’intervallo delle frequenze più piccole di 10MHz.

In questo documento si è applicato il secondo dei due approcci elencati.

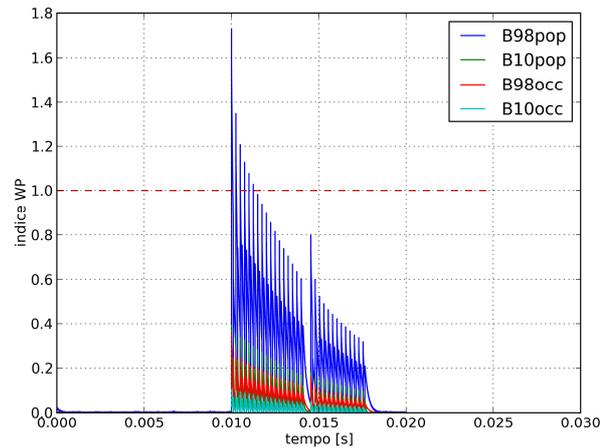
Per completezza e nel solo caso delle misure delle forme d’onda dell’induzione magnetica eseguite in un punto di riferimento sono stati determinati i cosiddetti indici Standard, introdotti nelle linee guida del 1998 e ripresi sia nello statement del 2003 sia nelle linee guida del 2010.

Indici determinati nel dominio del tempo. In Tab. 17 sono riportati gli indici WP, determinati nel dominio del tempo, a partire dai dati acquisiti e rappresentati nelle Fig. 25 e Fig. 26. 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. 17 – Indici di esposizione WP l'induzione magnetica determinati nel dominio del tempo

	WP 1998	WP 2010
popolazione	173%	39%
lavoratori	35%	11%

In Fig. 29 sono rappresentati gli andamenti degli indici nel tempo, nella quale si può notare che il massimo è raggiunto in corrispondenza del primo fronte di salita della forma d'onda di Fig. 26.

**Fig. 29** – Andamento degli indici WP (in base unitaria) per l'induzione magnetica nel dominio del tempo

Indici determinati nel dominio della frequenza. Gli indici di esposizione riportati in Tab. 18 sono stati determinati nel dominio della frequenza a partire dallo spettro con risoluzione spettrale pari a 50 Hz.

Come si può notare gli indici che fanno riferimento ai filtri analogici sono ben allineati con quelli calcolati nel dominio del tempo. È opportuno notare che, analogamente a quanto fatto nel dominio del tempo e coerentemente con la definizione del metodo del picco ponderato, l'implementazione nel dominio della frequenza dei filtri relativi alle linee guida del 1998 non considera le frequenze caratteristiche dei livelli di riferimento a 65 kHz (lavoratori) e 150 kHz (popolazione).

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') nelle tabelle delle rispettive linee guida.

Tab. 18 – Indici di esposizione WP per l'induzione magnetica determinati nel dominio della frequenza

	Filtri analogici		Funzioni 'piecewise'	
	WP1998	WP2010	WP1998	WP2010
Popolazione	175%	40%	157%	30%
Lavoratori	36%	11%	32%	8%

Infine, per completezza, in Tab.19, si riportano gli indici STD per l'induzione magnetica che fanno riferimento alle definizioni dei livelli di riferimento con funzioni piecewise e che risultano come previsto sensibilmente maggiori dei corrispondenti indici WP.

Tab.19 – Indici di esposizione STD per l'induzione magnetica

	STD 1998	STD 2010
popolazione	660%	147%
lavoratori	134%	39%

5.3 - Misure di indice WP 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 il campo elettrico e per l'induzione magnetica) muovendosi intorno alla sorgente. Le misure di indice (in scala percentuale) sono riportate in Tab. 20.

Tab. 20 – Misure di indici WP per l'induzione magnetica e per il campo elettrico

Sonda	Narda ELT-400		Narda-PMM EHP-50E			
	Induzione Magnetica		Induzione Magnetica		Campo Elettrico	
Limiti	B-picco	ICNIRP-1998	ICNIRP-2010			
Distanza	[μ T]	Lavoratori	Lavoratori	Popolazione	Lavoratori	Popolazione
10	44.70	255.40%	41.10%	142.5%	457.80%	932.10%
20	15.30	85.30%	11.30%	40.70%	205.90%	354.00%
30				18.40%	100.80%	195.00%
40					51.10%	101.00%
50					31.00%	63.00%
80					20.00%	40.00%

A parità di distanza (20 cm) gli indici di esposizione relativi all'induzione magnetica (misurati con ELT400 in modalità STD), riportati in Tab. 20 sono allineati a quelli di Tab. 17 solo per i livelli di riferimento che fanno campo alle linee guida del 2010. Gli indici relativi ai lavoratori e alle linee guida del 1998, misurati con l'ELT400 sono sensibilmente maggiori di quelli determinati a partire da misure di induzione magnetica effettuate con l'ELT400 opportunamente campionate ed elaborate nel dominio del tempo. Ciò è dovuto al fatto che i filtri di cui è equipaggiato l'ELT400 considerano impropriamente la frequenza caratteristica di 65kHz (lavoratori) oltre la quale i livelli di riferimento per i lavoratori decrescono per tenere conto degli effetti termici. Come verifica di quanto detto sopra, in Tab. 21 si riportano gli indici determinati numericamente a partire dalle forme d'onda di Fig. 26 (misurate a 20 cm) usando sia i filtri WP propriamente detti (WP1998) sia quelli che tengono conto del polo a 65/150 kHz (Filtri ELT400).

Tab. 21 – Confronto tra filtri che implementano limiti piatti oltre 800/820 Hz e limiti che decrescono oltre 65/150 kHz

	WP 1998	Filtri ELT400
popolazione	173%	241%
lavoratori	35%	85%

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. 25 e Fig. 26) è possibile scalare le misure di indice riportate in Tab. 20 in modo da ottenere l'andamento nello spazio degli indici relativi ai livelli di riferimento definiti nelle linee guida ICNIRP del 1998 e del 2010 per la popolazione e lavoratori.

Ciò è possibile sia per gli indici validi per l'induzione magnetica sia per quelli relativi al campo elettrico in quanto, come già accennato, trattando di misure su carico resistivo e di una sorgente assimilabile ad una sorgente mono-fase, si può supporre che le componenti del campo elettrico e del campo magnetico siano caratterizzate dalla stessa forma d'onda.

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.

Per i motivi esposti in precedenza (a proposito degli indici WP per l'induzione magnetica misurati con l'ELT400) si considerano come riferimento le sole misure di indice WP effettuate mediante EHP50E.

Nella Fig. 30 e nella Fig. 31 sono illustrati i profili degli indici WP rispettivamente per l'induzione magnetica e per il campo elettrico dove la distanza è intesa dal cavo di alimentazione della piastra più vicina (Fig 24).

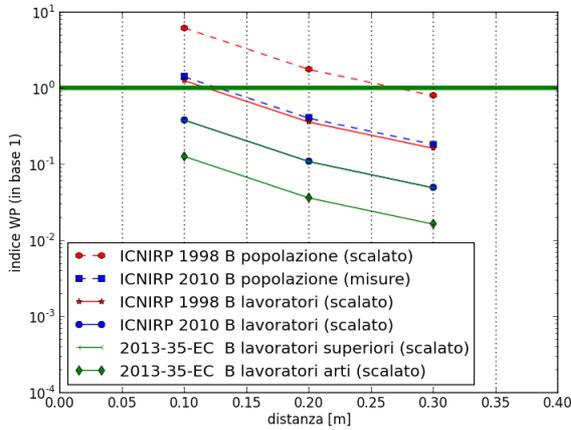


Fig. 30 – Andamento degli indici di esposizione WP per l'induzione magnetica in funzione della distanza da uno dei cavi di alimentazione delle piastre (misure EHP50E)

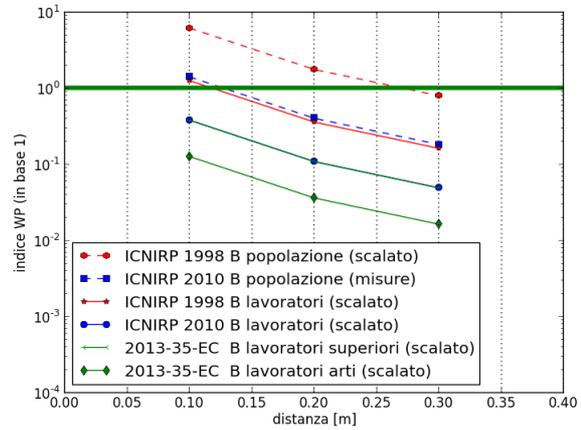


Fig. 31 – Andamento degli indici di esposizione WP per il campo elettrico in funzione della distanza da uno dei cavi di alimentazione delle piastre (Misure EHP50E)

5.4 - Distanze di rispetto

In Tab. 22 e Tab. 23 sono riportate le distanze di rispetto approssimativamente ricavate dai profili di Fig. 30 e Fig. 31. Come si può notare il campo elettrico risulta dare luogo a distanze di rispetto più grandi rispetto all'induzione magnetica.

È necessario però considerare che qualsiasi confronto tra risultati relativi al campo elettrico ed induzione magnetica dipende fortemente dal carico su cui sono chiuse le piastre; in particolare con carichi maggiori dei 50 ohm usati per le misure qui presentate ci si può aspettare che il campo elettrico sia ancora più preminente rispetto all'induzione magnetica. Viceversa con carichi più piccoli di 50 ohm ci si può aspettare che l'induzione magnetica tenda ad acquisire maggiore rilevanza dal punto di vista di indici di esposizione.

Tab. 22 – Distanze di rispetto per l'induzione magnetica.

	Distanze di rispetto per l'induzione magnetica [m]			
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/UE sup.	2013/35/UE arti.
popolazione	0.28	0.14		
lavoratori	0.13	<0.10	<0.10	<0.10

Tab. 23 – Distanze di rispetto per il campo elettrico.

	Distanze di rispetto per il campo elettrico [m]		
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/UE sup.
popolazione	0.40	0.41	
lavoratori	0.14	0.30	0.14

6 - Il defibrillatore Shiller Fred Easy

Il defibrillatore marca Shiller Medical, Modello Fred-Easy (Fig. 32) è stato provato usando come carico il tester per defibrillatori modello Impulse 6000D della Fluke Biomedical che offre un carico resistivo fisso di 50 ohm. Il defibrillatore è stato utilizzato in modalità bifasica con energia dell'impulso variabile tra 144 e 146 J.



Fig. 32 – L'apparato testato

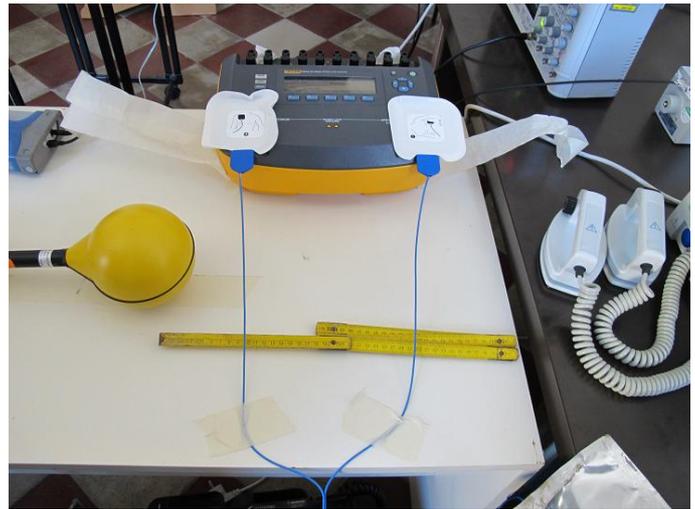


Fig. 33 – Il teatro espositivo

6.1 - 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 Low, in un punto fisso, a circa 10 cm dal cavo di alimentazione della piastra più vicina.

Inoltre sono state eseguite misure sia di campo elettrico sia di campo magnetico usando lo strumento Narda EHP50-E usato in modalità weighted peak. In particolare sono state eseguite misure dell'indice WP per i lavoratori e per le linee guida ICNIRP del 2010 in punti a distanza variabile dai cavi di alimentazione delle piastre, come rappresentato nella foto di Fig. 33. In questi stessi punti si è infine misurato l'indice WP per i soli lavoratori e per le linee guida del 1998 usando l'ELT400.

6.2 - Acquisizioni delle forme d'onda dell'induzione magnetica in un punto fisso

Le considerazioni sviluppate nel seguente paragrafo riguardano misure di induzione magnetica. Trattando però di un dispositivo assimilabile ad una *sorgente monofase di campo a bassa frequenza* (cioè caratterizzata da un unico circuito principale) chiuso su un carico puramente resistivo (50 ohm), si può supporre che la forma d'onda dell'induzione magnetica sia quella della corrente che scorre sul circuito stesso e che quest'ultima coincida con quella della differenza di potenziale sul carico. Si può pertanto concludere che la forma d'onda dell'induzione magnetica e del campo elettrico siano qualitativamente equivalenti.

6.2.1 - La forma d'onda del campo

In Fig. 34 e Fig. 35 sono rappresentate le forme d'onda delle componenti cartesiane dell'induzione magnetica acquisite mediante le uscite analogiche dell'ELT400 (usato in modalità 320 μ T, range Low, sonda 100 cm²) a circa 20 centimetri da uno dei cavi di alimentazione delle piastre. È stata effettuata un'acquisizione di 1 secondo in modo da essere sicuri di registrare l'evento che invece ha una durata dell'ordine delle decine di millisecondi. In particolare in Fig. 34 è rappresentata l'intera forma d'onda acquisita mentre in Fig. 35 si può osservare un 'ritaglio' di 20 ms intorno al massimo. Come si può notare l'induzione magnetica ha carattere impulsivo, non ripetitivo; e la durata dell'evento è inferiore a 10 millisecondi.

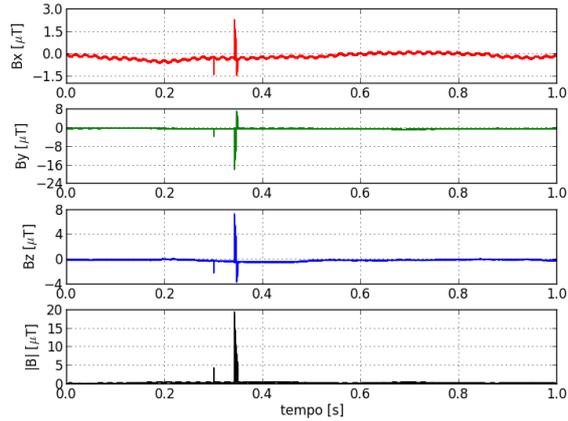


Fig. 34 – Forme d’onda dell’induzione magnetica: acquisizione di 1 secondo.

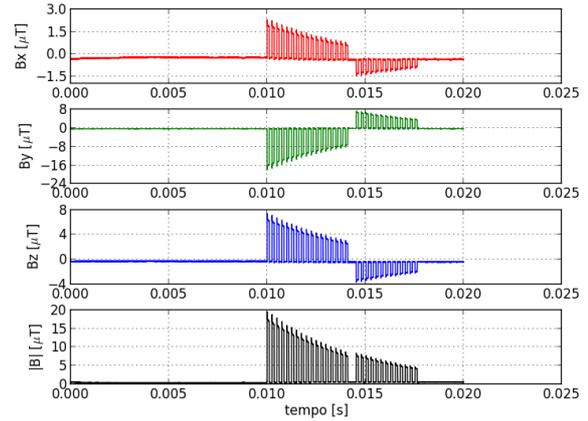


Fig. 35 – Forme d’onda dell’induzione magnetica: dettaglio di 20 millisecondi centrato sul massimo.

6.2.2 - Lo spettro del campo

In Fig. 36 e Fig. 37 si rappresentano i moduli degli spettri dell’induzione magnetica ottenuti mediante FFT applicata alle forme d’onda visualizzate in Fig. 34 e Fig. 35.

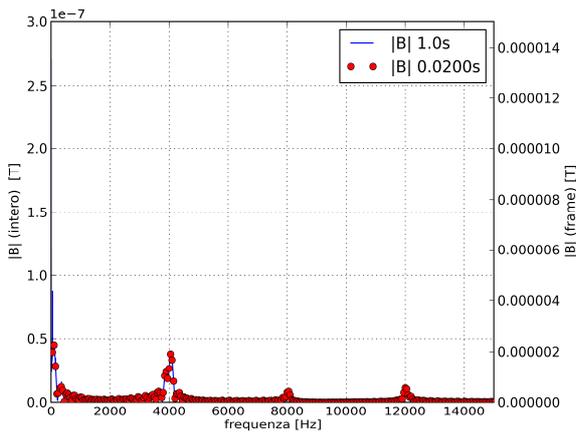


Fig. 36 – Spettri delle forme d’onda di Fig. 34 e Fig. 35.

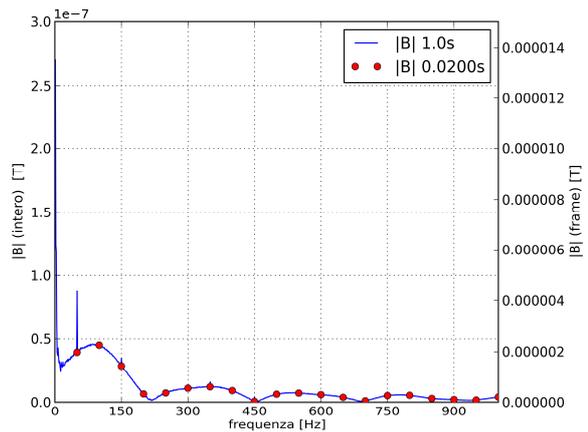


Fig. 37 – Dettaglio degli spettri delle forme d’onda di Fig. 34 e Fig. 35.

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 (20ms / 1s).

6.2.3 - Indici di esposizione

Gli indici di esposizione di riferimento per campi con forma d’onda 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.

Il metodo WP è stato completamente caratterizzato e definito solo nelle linee guida del 2010. L’applicazione dello stesso metodo in relazione ad i livelli di riferimento definiti nelle precedenti linee guida può essere implementata secondo almeno due approcci.

- L’approccio definito nello statement dell’ICNIRP in cui il metodo WP viene introdotto per la prima volta considera solo la frequenza caratteristica a 800/820 Hz (popolazione/lavoratori) dei livelli di riferimento ed inoltre la procedura è limitata a specifici intervalli di frequenza (8Hz-65kHz per i lavoratori, 8Hz-100kHz per la popolazione).
- In modo analogo a quanto viene fatto nelle linee guida del 2010, vale a dire:

- considerando tutte le frequenze caratteristiche dei livelli riferimento specificatamente introdotte per tenere conto degli effetti di stimolazione (cioè quelle più piccole di 1 kHz nel caso delle linee guida del 1998);
- estendendo l'applicazione del metodo all'intervallo delle frequenze più piccole di 10MHz.

In questo documento si è applicato il secondo dei due approcci elencati.

Per completezza e nel solo caso delle misure delle forme d'onda dell'induzione magnetica eseguite in un punto di riferimento sono stati determinati i cosiddetti indici Standard, introdotti nelle linee guida del 1998 e ripresi sia nello statement del 2003 sia nelle linee guida del 2010.

Indici determinati nel dominio del tempo. In Tab. 24 sono riportati gli indici WP, determinati nel dominio del tempo, a partire dai dati acquisiti e rappresentati nelle Fig. 34 e Fig. 35. 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. 24 – Indici di esposizione WP l'induzione magnetica determinati nel dominio del tempo

	WP 1998	WP 2010
popolazione	219%	5%
lavoratori	45%	14%

In Fig. 38 sono rappresentati gli andamenti degli indici nel tempo, nella quale si può notare che il massimo è raggiunto in corrispondenza del primo fronte di salita della forma d'onda di Fig. 35.

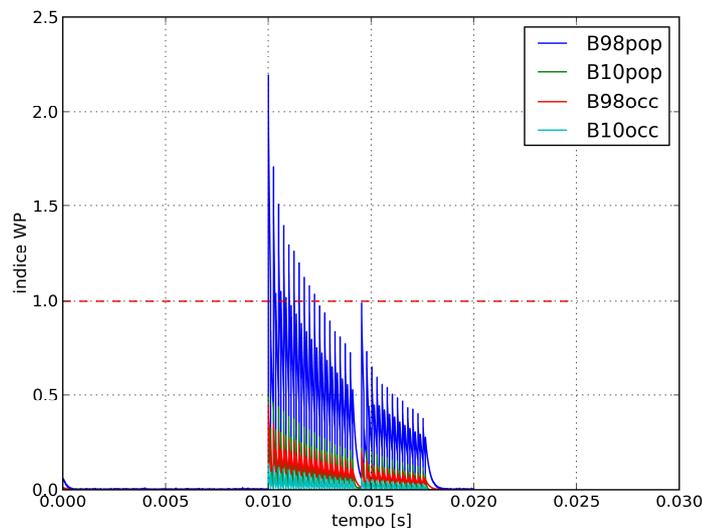


Fig. 38 – Andamento degli indici WP (in base unitaria) per l'induzione magnetica nel dominio del tempo

Indici determinati nel dominio della frequenza. Gli indici di esposizione riportati in Tab. 25 sono stati determinati nel dominio della frequenza a partire dallo spettro con risoluzione spettrale pari a 50 Hz.

Come si può notare gli indici che fanno riferimento ai filtri analogici sono ben allineati con quelli calcolati nel dominio del tempo. È opportuno notare che, analogamente a quanto fatto nel dominio del tempo e coerentemente con la definizione del metodo del picco ponderato, l'implementazione nel dominio della frequenza dei filtri relativi alle linee guida del 1998 non considera le frequenze caratteristiche a 65 kHz (lavoratori) e 150 kHz (popolazione).

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') nelle tabelle delle rispettive linee guida.

Tab. 25 – Indici di esposizione WP per l'induzione magnetica determinati nel dominio della frequenza

	Filtri analogici		Funzioni 'piecewise'	
	WP1998	WP2010	WP1998	WP2010
Popolazione	222%	51%	198%	37%
Lavoratori	45%	14%	40%	10%

Infine, per completezza, in Tab. 26, si riportano gli indici STD per l'induzione magnetica che fanno riferimento alle definizioni dei livelli di riferimento con funzioni piecewise e che risultano come previsto sensibilmente maggiori dei corrispondenti indici WP.

Tab. 26 – Indici di esposizione STD per l'induzione magnetica

	STD 1998	STD 2010
popolazione	855%	189%
lavoratori	174%	51%

6.3 - Misure di indice WP 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 il campo elettrico e per l'induzione magnetica) muovendosi intorno alla sorgente. Le misure di indice (in scala percentuale) sono riportate in Tab. 27.

Tab. 27 – Misure di indici WP per l'induzione magnetica e per il campo elettrico

Sonda	Narda ELT-400	Narda-PMM EHP-50E			
Limiti	ICNIRP-1998	ICNIRP-2010			
	Induzione Magnetica	Induzione Magnetica		Campo Elettrico	
Distanza	Lavoratori	Lavoratori	Popolazione	Lavoratori	Popolazione
10	347%	36%	170%	702%	1262%
20	102%				
30	43%		23%	180%	
40	21%				
50				57%	127%
80					46%

A parità di distanza (20 cm) l'indice di esposizione relativo all'induzione magnetica misurato con ELT400 in modalità STD, riportato in Tab. 27 relativi ai lavoratori e alle linee guida del 1998 è sensibilmente maggiore di quello determinato a partire da misure di induzione magnetica effettuate con l'ELT400 opportunamente campionate ed elaborate nel dominio del tempo. Ciò è dovuto al fatto che i filtri di cui è equipaggiato l'ELT400 considerano (impropriamente) la frequenza caratteristica di 65kHz (lavoratori) oltre la quale i livelli di riferimento per i lavoratori decrescono per tenere conto degli effetti termici. Come verifica di quanto detto sopra, in Tab. 28 si riportano gli indici determinati numericamente a partire dalle fdo di Fig. 35 (misure a 20 cm) usando sia i filtri WP propriamente detti (WP1998) sia quelli che tengono conto del polo a 65/150 kHz (ICNIRP98 ELT400).

Tab. 28 – Confronto tra filtri che implementano limiti piatti oltre 800/820 Hz e limiti che decrescono oltre 65/150 kHz

	WP 1998	ICNIRP98 ELT400
popolazione	219%	308%
lavoratori	45%	107%

6.3.1 - 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. 34 e Fig. 35) è possibile scalare le misure di indice riportate in Tab. 27 in modo da ottenere l'andamento nello spazio degli indici relativi ai livelli di riferimento definiti nelle linee guida ICNIRP del 1998 per la popolazione e lavoratori.

Ciò è possibile sia per gli indici validi per l'induzione magnetica sia per quelli relativi al campo elettrico in quanto, come già accennato, trattando di misure su carico resistivo e di una sorgente assimilabile ad una sorgente mono-fase, si può supporre che le componenti del campo elettrico e del campo magnetico siano caratterizzate dalla stessa forma d'onda. Per i motivi esposti in precedenza (a proposito degli indici WP misurati con l'ELT400) si considerano come riferimento le sole misure di indice WP effettuate mediante EHP50E.

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.

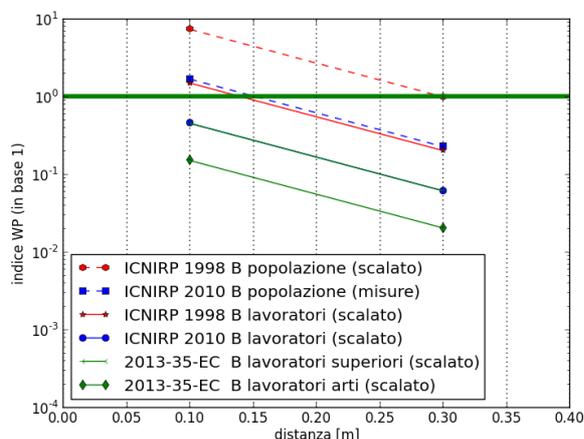


Fig. 39 – Andamento degli indici di esposizione WP per l'induzione magnetica in funzione della distanza da uno dei cavi di alimentazione delle piastre (misure EHP50E)

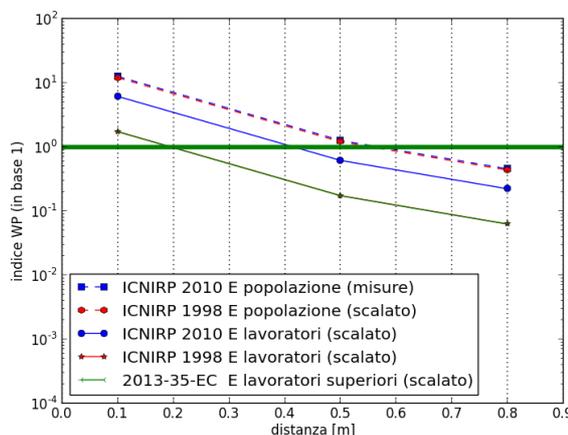


Fig. 40 – Andamento degli indici di esposizione WP per il campo elettrico in funzione della distanza da uno dei cavi di alimentazione delle piastre (Misure EHP50E)

Nella Fig. 39 e nella Fig. 40 sono illustrati i profili degli indici WP rispettivamente per l'induzione magnetica e per il campo elettrico dove la distanza è intesa dal cavo di alimentazione della piastra più vicina (Fig. 33).

6.4 - Distanze di rispetto

In Tab. 29 e Tab. 30 sono riportate le distanze di rispetto approssimativamente ricavate dai profili di Fig. 39 e Fig. 40. Come nelle figure le distanze si intendono determinate dal cavo di alimentazione della piastra più vicina. Come si può notare il campo elettrico risulta dare luogo a distanze di rispetto più grandi rispetto all'induzione magnetica. È necessario però considerare che qualsiasi confronto tra risultati relativi al campo elettrico ed induzione magnetica dipende fortemente dal carico su cui sono chiuse le piastre; in particolare con carichi maggiori dei 50 ohm usati per le misure qui presentate ci si può aspettare che il campo elettrico sia ancora più preminente rispetto all'induzione magnetica. Viceversa con carichi più piccoli di 50 ohm ci si può aspettare che l'induzione magnetica tenda ad acquisire maggiore rilevanza dal punto di vista di indici di esposizione.

Tab. 29 – Distanze di rispetto per l'induzione magnetica.

	Distanze di rispetto per l'induzione magnetica [m]			
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/UE sup.	2013/35/UE arti.
popolazione	0.30	0.20		
lavoratori	0.18	<0.10	<0.10	<0.10

Tab. 30 – Distanze di rispetto per il campo elettrico.

Distanze di rispetto per il campo elettrico [m]			
	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	2013/35/UE sup.
popolazione	0.58	0.60	0.29
lavoratori	0.29	0.47	

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 and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)". Dicembre 2010, Health Physics, Vol.99, N.6, pp.818-836.
- 4 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.
- 5 ICNIRP: "Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines". Marzo 2003, Health Physics, Vol.84, N.3, pp.383-387.
- 6 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.