



Associazione Italiana
di Radioprotezione

2012
bollettino

Anno XXXIX | volume 171 | numero 3,4 | agosto 2012 | ISSN 1591-3481 | e-ISSN 2281-180X



1

ANNO I - MAGGIO - GIUGNO
PUBBLICAZIONE PERIODICA BIMESTRILE
SPEDIZIONE IN ABBON POSTALE GRUPPO

BOLLETTINO
della Associazione Italiana
di Fisica Sanitaria
e Protezione contro le Radiazioni



a della

BOLLETTINO
della Associazione Italiana
di Fisica Sanitaria
e Protezione contro le Radiazioni

APR



Anno XXXIX Volume 171 n. 3, 4 - agosto 2012

ISSN 1591-3481 | e-ISSN 2281-180X

Associazione Italiana
di Radioprotezione
AIRP

affiliata alla
International Radiation Protection
Association (IRPA)

Consiglio Direttivo 2010 | 2012

Sandro Sandri, *Presidente*
Marie Claire Cantone, *Vicepresidente*
Mauro Magnoni, *Segretario*
Claudia Fontana, *Tesoriera*
Daniele Giuffrida
Sabrina Romani
Rosabianca Trevisi

2012

Direttore responsabile
Marie Claire Cantone

Comitato di redazione
Daniela de Bartolo
Francesco Mancini

Tipografia
Pixart Printing

Progetto grafico
MV Comunicazione, Milano

Per informazioni
e corrispondenza
T 02 50317212
F 02 50317630

Registrazione del Tribunale di Milano
n. 228 del 10 aprile 2008

Distribuzione gratuita ai soci AIRP

Tutti i soci dell'AIRP sono vivamente invitati a contribuire al Bollettino inviando articoli, commenti, recensioni, notizie e informazioni su argomenti di specifico interesse per la radioprotezione. I contributi dovranno essere firmati dall'autore o dagli autori. Gli articoli pubblicati riflettono esclusivamente le opinioni degli autori.

Editoriale

G. d'Amore e M. Magnoni 3

Radiazioni Ionizzanti | Articoli

Sovrapposizione delle tracce nei dosimetri a tracce nucleari:
caratterizzazione della risposta ad elevate concentrazioni di Radon
D. Franci, F. Cardellini, T. Aureli 7

Aspetti tecnici e metodologici nella bonifica dal radon
nelle strutture scolastiche della provincia di Lecce
A. P. Caricato, M. Fernández, F. Leonardi, S. Tonnarini,
R. Trevisi, T. Tunno, M. Veschetti, G. Zannoni 13

L'influenza di un disegno campionario preferenziale
sulle statistiche aggregate per aree territoriali:
il caso delle campagne di misura della concentrazione
di radon indoor in Lombardia
R. Borgoni, D. de Bartolo 21

Sistemi informativi territoriali: studio dei parametri correlati
alla distribuzione di radon indoor in Friuli Venezia Giulia
C. Giovani, M. Garavaglia, S. Pividore, F. Cucchi, L. Zini 29

Aspetti di radioprotezione nell'ambito delle gammagrafie industriali
C. Giovani C., M. Garavaglia, P. Di Marco, L. Piccini 37

Misure di ⁹⁰Sr per effetto Cerenkov impiegando un rivelatore
a scintillazione liquida: possibile utilizzo in caso di emergenza nucleare
M.C. Losana, G. Garbarino, M. Magnoni 43

Misura dell'attività alfa-beta totale nelle acque mediante LSC:
influenza dello spillover e ottimizzazione dei parametri sperimentali
M. Forte, R. Rusconi, P. Badalamenti., S. Costantino, D. Lunesu 51

Accumulo di radionuclidi naturali ed artificiali in formazioni crioconicitiche
di alcuni ghiacciai delle Alpi Occidentali
M. Faure Ragani, C. Operti, G. Agnesod, S. Bertino,
G. Garbarino, M. Magnoni, M. Ghione 59

Modello per la stima delle concentrazioni alfa totale e beta totale
nel particolato atmosferico in situazioni di emergenza
L. Albertone, L. Porzio 65

Radiazioni Non Ionizzanti | Articoli

Strumenti e metodi a basso costo per monitoraggio selettivo
dell'esposizione umana a segnali Wi-Fi
A. Rodríguez de la Concepción, D. Renga, R. Stefanelli, D. Trincherò 75

Misure di campo elettrico da stazioni radio base UMTS
e analisi della relazione con la potenza in antenna
M. Mathiou, V. Bottura, M. Cappio Borlino, D. Vaccarone, S. D'Elia, S. Adda 81

Stima del rischio di superamento del valore di attenzione sulla base
di misure spot di campo magnetico generato da linee ad alta tensione
S. Adda, E. Caputo, L. Anglesio, G. d'Amore, 91

Monitoraggio nel dominio dei codici di celle UMTS/HSPA e misura del parametro p_{CA} <i>A. Barellini, G. Licitra, A. Pinzauti, A. M. Silvi</i>	97
Modelli semplificati per la dosimetria elettromagnetica in regime quasi-stazionario <i>Bottauscio O., Chiampi M., Zilberti L.</i>	103
Il fattore di rischio ambientale da radiazione solare UV-A <i>B. H. Petkov, C. Lanconelli, V. Vitale, C. Tomasi, E. Gadaleta, M. Mazzola, A. Lupi, M. Busetto</i>	111
Esposizione occupazionale a campi magnetici con forma d'onda complessa: tre casi studio in ambito industriale e sanitario <i>N. Zoppetti, D. Andreuccetti, A. Bogj, I. Pinto</i>	119
Intervento di mitigazione su una linea a 132 kV nella città di Pisa e riduzione dell'esposizione della popolazione <i>N. Colonna, G. Licitra</i>	127
Metodi e procedure per l'analisi di emissioni elettromagnetiche generate da impianti HVDC <i>M. Borsero, O. Bottauscio, M. Chiampi, G. Crotti, L. Zilberti</i>	135
Metodi di indagine per studi epidemiologici di coorte di popolazioni esposte a livelli elevati di campo magnetico a 50 Hz <i>L. Fazzo, A. Polichetti, P. Comba</i>	143
Circuito d'Interconfronto ISPRA IC015 Misure selettive di campi elettromagnetici ad alta frequenza: Analisi dei fattori d'influenza attraverso l'elaborazione statistica dei risultati <i>L. Ardoino, E. Barbieri, S. Barbizzi, L. Anglesio, G. d'Amore, A.M. Silvi</i>	149
Misure mediante dosimetria a polisolfone per la quantificazione dell'esposizione individuale alla radiazione solare ultravioletta <i>G. R. Casale, A. M. Siani, S. Modesti, H. Diémoz, G. Agnesod, A. Colosimo</i>	157
Risultati della prima campagna di interconfronto italiana di strumentazione per la misura della radiazione ultravioletta solare <i>H. Diémoz, A. M. Siani, G. R. Casale, A. di Sarra, B. Serpillo, B. Petkov, S. Scaglione, A. Bonino, S. Facta, F. Fedele, D. Grifoni, L. Verdi, G. Zipoli</i>	165
Caratterizzazione di radiometri ultravioletti solari a banda larga presso il Laboratorio di Ottica dell'ARPA Piemonte e interconfronto con altri laboratori europei <i>S. Facta, S. Saudino Fusette, A. Bonino, H. Diémoz, M. Vaccarone, L. Anglesio, G. d'Amore, J. Gröbner</i>	171
Dosimetria numerica a bassa frequenza: risultati preliminari di un interconfronto tra diversi software <i>R. Falsaperla, D. Andreuccetti, L. Ardoino, E. Barbieri, G.M. Contessa, R. Pinto, A. Polichetti, N. Zoppetti</i>	179

Esposizione occupazionale a campi magnetici con forma d'onda complessa: tre casi studio in ambito industriale e sanitario

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

(1) IFAC-CNR, via Madonna del Piano 10 - 50019 Sesto Fiorentino (FI)

n.zoppetti@ifac.cnr.it , d.andreuccetti@ifac.cnr.it

(2) Azienda U.S.L. 7 di Siena Laboratorio Agenti Fisici, Strada di Ruffolo 4 - 53100 Siena

a.bogi@usl7.toscana.it , i.pinto@usl7.toscana.it

RIASSUNTO

In questo lavoro ci si è posti l'obiettivo di verificare l'impatto di diverse norme e linee guida riguardanti l'esposizione umana a campi elettromagnetici, applicandole a casi concreti riscontrati in ambienti di lavoro. A questo fine, si sono sfruttati i risultati di alcune campagne di misura organizzate nell'ambito di una convenzione tra AUSL7 e IFAC-CNR, finalizzata allo sviluppo ed al popolamento della banca dati sui campi elettromagnetici del Portale Agenti Fisici (PAF, <http://www.portaleagentifisici.it/>). Gli esempi presentati riguardano sia l'ambito industriale (saldatura ad arco e macchine da cucire industriali), sia quello sanitario (stimolazione magnetica transcranica). Per ognuno di essi si descrivono le tecniche di verifica del rispetto dei limiti delle grandezze radiometriche, con particolare riferimento agli indici di esposizione che si applicano a campi con forma d'onda non sinusoidale.

INTRODUZIONE

La normativa internazionale sull'esposizione della popolazione e dei lavoratori ai campi elettrici e magnetici di bassa frequenza (fino a 100 kHz) ha subito negli ultimi anni un complesso processo di evoluzione. In ambito ICNIRP, alle storiche linee guida pubblicate nel 1998 (ICNIRP,1998), si è aggiunto nel 2003 uno statement specifico per i campi con forma d'onda non sinusoidale (ICNIRP 2003), per poi arrivare – nel 2010 – alla pubblicazione di nuove linee guida per la sola bassa frequenza (ICNIRP 2010). Queste ultime, oltre a modificare i limiti del 1998, hanno recepito parte delle procedure proposte nello statement del 2003. Parallelamente, anche la normativa tecnica si è evoluta, purtroppo non sempre in modo armonico con le linee guida ICNIRP, alle quali tuttavia spesso si riferisce.

In questo lavoro si illustrano inizialmente le principali metodiche definite nelle linee guida ICNIRP, ponendo particolare attenzione alle problematiche che è necessario affrontare applicandole. In seguito, tali metodiche sono usate in tre casi concreti con lo scopo di verificare la coerenza dei risultati forniti, laddove questa sia auspicabile, e quantificare le discrepanze dovute, ad esempio, ai diversi livelli di riferimento di (ICNIRP,1998) e (ICNIRP,2010).

La trattazione si limiterà al caso del campo magnetico a frequenza 'bassa' che coinvolge un gran numero di sorgenti di particolare interesse; coerentemente alla classificazione adottata dall'ICNIRP, per bassa si intende entro i 100 kHz. Ci riferiremo in particolare alla seguente espressione che rappresenta l'induzione magnetica in un generico punto le cui componenti cartesiane sono state espresse in serie di Fourier e dove si è trascurato il termine che rappresenta il valor medio.

$$\vec{B}(t) = \sum_{k=1}^n \left[B_{x,k} \cos(2\pi k f_0 t + \theta_{x,k}) \cdot \hat{i}_x + B_{y,k} \cos(2\pi k f_0 t + \theta_{y,k}) \cdot \hat{i}_y + B_{z,k} \cos(2\pi k f_0 t + \theta_{z,k}) \cdot \hat{i}_z \right] \quad (1)$$

La teoria ci insegna che f_0 è l'inverso del periodo della forma d'onda considerata e che tanto più alto sarà il numero n di armoniche considerate, quanto più fedele sarà la rappresentazione in serie. Inoltre, il fatto di considerare una porzione limitata dello spettro (tra 0 e 100 kHz) fa sì che in questo contesto si possa considerare n come finito.

METODI DI VERIFICA

Come è noto, i limiti delle grandezze radiometriche definiti nelle linee guida ICNIRP (livelli di riferimento), sia quelle attuali sia quelle passate, dipendono dalla frequenza. L'applicazione delle prescrizioni risulta quindi banale solo nel caso di esposizione a campi monocromatici per i quali si confronta semplicemente il valore efficace del campo con il livello di riferimento alla frequenza di interesse. Nel caso in cui il campo in oggetto non sia puramente sinusoidale esistono diversi metodi mediante i quali si può verificare il rispetto dei livelli di riferimento ICNIRP, alcuni definiti nel dominio del tempo alcuni nel dominio della frequenza. I principali tra questi saranno descritti nei seguenti paragrafi e saranno applicati ai casi studio presentati successivamente.

Il metodo ICNIRP standard

Il metodo, originariamente introdotto in (ICNIRP,1998), è definito nel dominio della frequenza e consiste nel rapportare l'ampiezza di ciascuna sinusoide con il relativo livello di riferimento ICNIRP per il picco e di sommare linearmente tali rapporti ottenendo un indice numerico che, se superiore a 1 indica il superamento dei limiti. L'espressione (2) piuttosto che riferirsi ai valori di picco utilizza i valori efficaci ed in particolare $B_{rms}(kf_0)$ è il valore efficace della componente spettrale alla frequenza kf_0 e $BL(kf_0)$ è il relativo livello di riferimento ICNIRP (che è espresso in termini di valore efficace).

$$II1998 = \sum_k \frac{B_{rms}(kf_0)}{BL(kf_0)} \quad (2)$$

Secondo tale metodo si suppone che tutte le componenti spettrali siano in fase tra loro e che pertanto assumano simultaneamente il relativo massimo.

Il metodo 'weighted peak' nel dominio della frequenza

Per offrire una alternativa che fornisca risultati meno cautelativi rispetto al *metodo standard*, in (ICNIRP,2003) è stato introdotto il cosiddetto metodo *weighted peak* (WP nel seguito). Esso prevede che si tenga conto sia delle ampiezze delle componenti spettrali del campo sia delle relative fasi. Per fare ciò è possibile operare sia nel dominio della frequenza sia nel dominio del tempo. Per applicare il metodo nel dominio della frequenza ci si riferisce alla espressione (3), riportata anche in (ICNIRP,2003). Operativamente, una volta determinato lo spettro delle forme d'onda (fdo) si pesano le ampiezze delle componenti spettrali con i livelli di riferimento per il picco. Inoltre si considerano anche le rispettive fasi θ_k ma a queste si deve aggiungere un ulteriore contributo φ_k di cui sarà più chiaro il significato quando si descriveranno le modalità di applicazione del metodo WP nel dominio del tempo.

$$WP_{X,Y,Z}(t) = \left| \sum_{k=1}^n \frac{B_k}{\sqrt{2}B_{L,k}} \cos(2\pi kf_0 t + \theta_k + \varphi_k) \right| \quad (3)$$
$$WP = \text{Max}_t \left\{ \sqrt{WP_X(t)^2 + WP_Y(t)^2 + WP_Z(t)^2} \right\}$$

Per finalizzare la valutazione secondo l'espressione (3), è quindi necessario un ulteriore passaggio. Infatti, a partire dalle ampiezze e dalle fasi modificate come si è descritto, è necessario tornare nel dominio del tempo e determinare il massimo della fdo sintetizzata a partire dallo spettro elaborato. Anche in questo caso un indice WP complessivo superiore ad 1 comporta il superamento dei livelli di riferimento.

I documenti ICNIRP non danno indicazioni sul passo temporale da utilizzare per ricostruire la fdo sintetizzata. Un riferimento a tal proposito è costituito dalla norma EN50444 (CENELEC,2008), in cui si prescrive di impiegare un passo temporale pari a $1/(10 \cdot n \cdot f_0)$ e cioè all'inverso di dieci volte la più alta frequenza che compare nello spettro di partenza. Lo spirito di tale scelta è quello di utilizzare un passo temporale che garantisca di individuare il massimo assoluto delle fdo sintetizzate che rappresentano gli indici WP.

Il metodo 'weighted peak' nel dominio del tempo

Il calcolo degli indici WP può essere effettuato nel dominio del tempo. Per fare ciò si elaborano le fdo che rappresentano le componenti cartesiane del campo con dei filtri la cui risposta in ampiezza ha un andamento con la frequenza che ricalca quello dell'inverso dei livelli di riferimento. L'ICNIRP indica di realizzare tali filtri come serie di filtri del primo ordine, tollerando quindi che la risposta in ampiezza si discosti sensibilmente da quella lineare a tratti che caratterizza l'andamento dei livelli di riferimento (tale scostamento è pari a circa 3 dB presso i cambi di pendenza). Inoltre si tollera l'effetto della risposta in fase di tali filtri che è tutt'altro che piatta come si può notare in figura 1 (in (ICNIRP,2003) si prova a giustificare tale effetto limitandosi al solo polo a 800/820 Hz). A questo punto è possibile spiegare l'origine del termine φ_k in espressione (3), che è proprio lo sfasamento introdotto dal filtro analogico alla frequenza f_k .

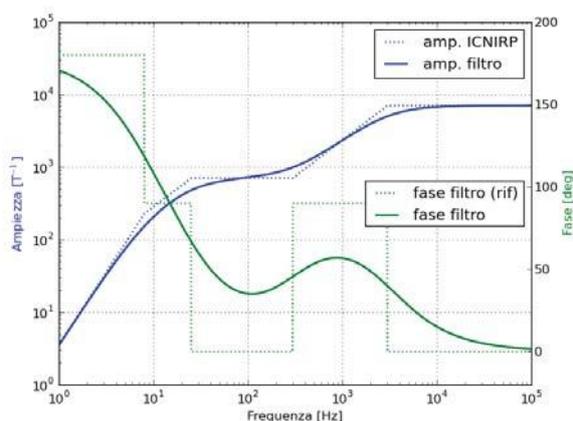


Figura 1 | Confronto inverse reference levels ICNIRP 2010 per i lavoratori con risposta del relativo filtro del primo ordine

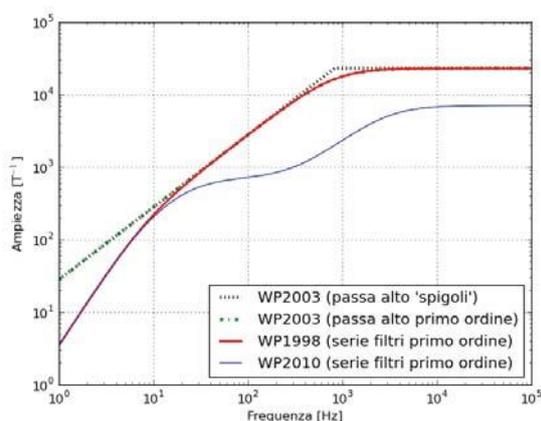


Figura 2 | Confronto risposte in ampiezza dei filtri ICNIRP considerati nel seguito dell'articolo

Nota all'applicazione del metodo 'weighted peak'

In generale il metodo WP può essere applicato nel dominio del tempo solo se si è in grado di realizzare, in hardware o in software, il filtro con le risposte in ampiezza ed in fase desiderate.

In (ICNIRP,2003) si propongono due casi di cui solo uno fa riferimento ad un filtro realizzabile. È il caso del filtro passa alto (per il campo) del primo ordine con polo a 800 Hz (popolazione) o 820 Hz (lavoratori). L'altro caso invece fa riferimento ad un passa basso del primo ordine 'ideale', cioè con risposta in ampiezza con cambio di pendenza 'a spigolo' presso il polo e risposta in fase a gradino ampio 90 gradi. In tal caso l'unica applicazione possibile è quella nel dominio della frequenza. In (ICNIRP,2010) il metodo WP viene esteso indicando l'utilizzo di serie di filtri del primo ordine che rappresentano l'inverso dei livelli di riferimento su tutto l'intervallo di frequenze di applicazione.

STRUMENTAZIONE DI MISURA E PROCEDURE DI ELABORAZIONE DATI

Prima di passare alla trattazione dei casi studio è opportuno descrivere brevemente la strumentazione di misura utilizzata e gli strumenti software realizzati per effettuare le analisi dei dati.

Per le misure di campo magnetico è stata utilizzata la sonda Narda ELT400 dotata di sensore isotropico con banda da pochi Hz fino a 400 kHz. Questo strumento, tramite le cosiddette *uscite analogiche*, rende disponibili delle fdo in tensione direttamente proporzionali alle componenti cartesiane del campo misurato. Tali fdo sono state acquisite e campionate mediante una scheda di acquisizione Agilent modello U2531A collegata con un personal computer. Le fdo acquisite sono state quindi elaborate con apposite applicazioni realizzate in linguaggio C++ o Python che implementano i vari metodi di verifica presi in considerazione.

CASO STUDIO IN AMBITO INDUSTRIALE: SALDATRICI AD ARCO

Il primo caso studio presentato si riferisce a misure effettuate presso una azienda siderurgica in cui si impiegano saldatrici ad arco. La presentazione di questo esempio e dei successivi non è mirata ad una vera e propria valutazione dell'esposizione del lavoratore, ma piuttosto al confronto dei metodi precedentemente descritti. Pertanto ci si riferirà a misure effettuate in un singolo punto e si approfondirà l'analisi delle fdo acquisite. Si rimanda a (Zoppetti 2012) per approfondimenti sugli effetti della effettiva distribuzione dell'induzione magnetica e dei relativi indici di esposizione nello spazio. Nel caso delle saldatrici ad arco, oltre alla normativa generica esistono una specifica norma di base, la EN50444 (CENELEC, 2008), ed una di prodotto, la EN50445 (CENELEC, 2008), riguardanti l'esposizione umana ai CEM. Ciò assume particolare rilevanza considerando che nella norma EN50499 (CENELEC, 2011) si indicano tutte le apparecchiature certificate secondo specifiche norme armonizzate come conformi a priori.

Al fine di semplificare le analisi nel dominio della frequenza, la norma di prodotto prescrive di considerare solo le armoniche che superano il 3% della componente fondamentale.

In questo paragrafo considereremo due fdo, corrispondenti a due modalità di utilizzo dello stesso apparato e confronteremo i risultati ottenuti nel dominio del tempo con quelli ottenuti nel dominio della frequenza, sia elaborando gli spettri completi, sia considerando solo le armoniche che superano il 3% della fondamentale. Le fdo misurate denominate **fdo A** e **fdo B** sono mostrate nelle figure 3 e 4; come si può notare la prima

è relativa ad un evento isolato, che dura circa 1 secondo mentre la seconda ad una lavorazione più lunga del tempo di osservazione del fenomeno. Entrambe le misure si riferiscono a punti posti in prossimità dei cavi, come prescritto nella norma EN50444 (CENELEC, 2008).

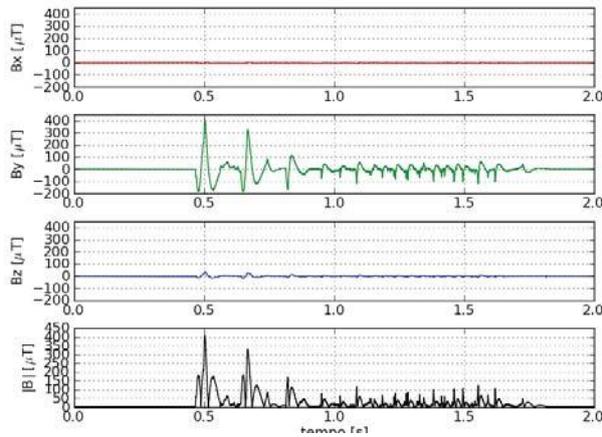


Figura 3 | Componenti e modulo di **fdo A** nel dominio del tempo

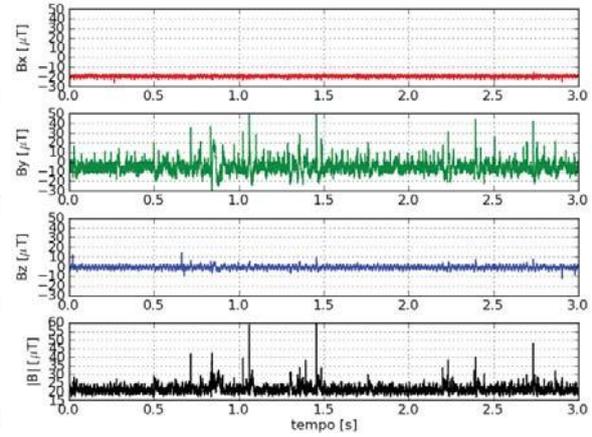


Figura 4 | Componenti e modulo di **fdo B** nel dominio del tempo

In tabella 1 sono riportati i risultati delle analisi eseguite nel dominio del tempo che comprendono l'applicazione del metodo WP utilizzando filtri del primo ordine. In particolare si usano sia un filtro passa alto come prescritto in (ICNIRP,2003) sia un filtro completo che considera tutti i cambi di pendenza delle (ICNIRP,1998).¹

Tabella 1 | Sintesi risultati analisi misure saldatrice nel dominio del tempo

	fdo A	fdo B
Brms [μ T]	52.5	21.3
B max [μ T]	408	60
WP2003 lavoratori (passa alto del primo ordine)	0.762	0.611
WP1998 lavoratori (cascata filtri primo ordine)	0.705	0.611
WP2010 lavoratori (cascata filtri primo ordine)	0.161	0.181

In tabella 2 sono invece riportati i risultati delle analisi eseguite nel dominio della frequenza. In questo caso, per ogni fdo si considera sia lo spettro completo, sia quello in cui sono state scartate tutte le armoniche inferiori al 3% di quella più ampia. Per quanto riguarda gli spettri completi si osserva come per fdo A il rapporto tra l1998 (in cui non si tiene conto delle fasi) e l'indice WP1998 (che si riferisce alla stessa pesatura delle ampiezze ma tiene conto anche delle fasi) è circa pari a 7. L'analogo rapporto per fdo B è invece pari a oltre 18. Ciò, oltre alle diverse caratteristiche del segnale è dovuto anche alla maggior risoluzione spettrale che caratterizza lo spettro della fdo B.

Si osservi quanto gli indici WP calcolati con gli spettri 'alleggeriti' risultino meno cautelativi rispetto agli stessi indici riferiti agli spettri completi. Questi invece risultano ben allineati ai valori calcolati operando nel dominio del tempo. Tuttavia, non è semplice prevedere fino a che punto l'approccio suggerito dalla norma CENELEC porti a sottostimare gli indici di esposizione. Questo dipende infatti sia dall'andamento dello spettro della forma d'onda coinvolta, sia dagli effetti del filtraggio sulle fasi originali (figura 1). In tabella 2 si può notare come in generale gli indici che si riferiscono agli spettri 'alleggeriti' sono sempre marcatamente più bassi di quelli che si riferiscono agli spettri completi, tranne che nel caso della fdo A e dell'indice WP2010.

¹ In realtà si trascura il cambio di pendenza a 65 kHz sia perché le fdo analizzate hanno spettri contenuti entro tale limite sia perché questo è l'indicazione che emerge in (ICNIRP1998) e in (ICNIRP2003)

Tabella 2 | Sintesi risultati analisi misure saldatrice nel dominio della frequenza

	fdo A		fdo B	
	Spettro completo	3%	Spettro completo	3%
Risoluzione spettrale [Hz]	0.5		0.33	
Brms [μ T]	52.5	52.3	21.3	21.2
B(f) max [μ T]	19.5		3.25	
f @ B(f) max [Hz]	11.0		299.7	
Il1998	4.991	0.736	12.367	0.491
WP2003 lavoratori (passa alto ideale)	0.796	0.281	0.611	0.153
WP2003 lavoratori (passa alto del primo ordine)	0.763	0.279	0.611	0.145
WP1998 lavoratori (cascata filtri primo ordine)	0.710	0.227	0.669	0.140
WP2010 lavoratori (cascata filtri primo ordine)	0.161	0.150	0.181	0.029

Questa osservazione offre lo spunto per una critica di fondo al criterio introdotto dal CENELEC. Infatti, l'aver fissato una soglia (arbitraria) in termini di ampiezza rapportata a quella della componente fondamentale del campo non tiene in alcun conto del fatto che i limiti ICNIRP variano con la frequenza. Non è detto, cioè, che una riga che conta per meno del 3% della fondamentale nello spettro del campo, continui a contare meno del 3% della fondamentale anche nello spettro dell'indice di esposizione. Altrettanto arbitrario - ma forse più sensato dal punto di vista protezionistico - sarebbe stato introdurre una soglia in termini di percentuale sul livello di riferimento ICNIRP, come peraltro accade nella norma CENELEC EN50500 (CENELEC,2008) che riguarda le esposizioni a bordo di materiale rotabile.

AMBITO INDUSTRIALE: MACCHINE DA CUCIRE INDUSTRIALI

Il secondo caso studio considerato è relativo all'esposizione ai campi generati dalle macchine da cucire operanti in una piccola impresa tessile. In questo caso si è verificato che la sorgente propriamente detta era il motore elettrico trifase che equipaggia la macchina, che in genere è installato subito sotto il piano di lavoro, poco più avanti rispetto alle ginocchia dell'operatore. In questa particolare circostanza la possibilità che tali apparati fossero usati da lavoratrici incinta ha fatto sì che si sia adottato un approccio cautelativo, considerando i limiti validi per la popolazione. In questo caso non c'è una norma tecnica specifica, pertanto oltre allo spettro completo (derivante da un'acquisizione di 50000 campioni con tempo di campionamento di 20 microsecondi, pari ad una durata di 1 secondo), al fine della riduzione del numero di armoniche degli spettri sono state considerate delle porzioni della forma d'onda originaria. Tali porzioni sono lunghe 40 ms e 20 ms (rispettivamente 2 ed 1 periodo a 50Hz) e sono centrate sull'istante in cui si verifica il massimo del modulo del campo. Nelle figure 5 e 6 sono rappresentate rispettivamente la forma d'onda originaria e quella lunga 40 ms.

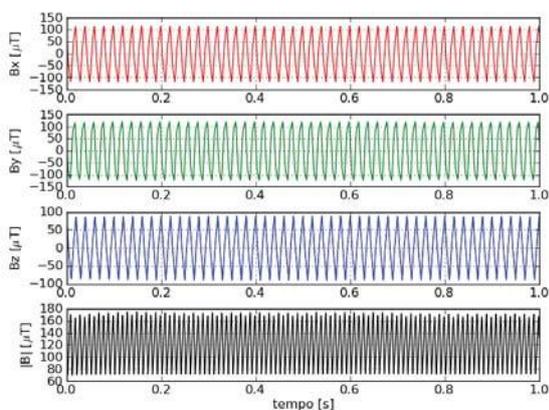


Figura 5 | Componenti e modulo di fdo nel dominio del tempo (1s di acquisizione)

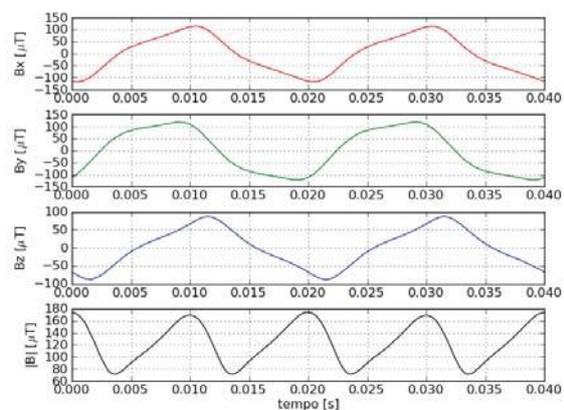


Figura 6 | Componenti e modulo di fdo nel dominio del tempo (40 ms di acquisizione centrati sul massimo modulo)

I risultati delle analisi svolte sia nel dominio del tempo sia nel dominio della frequenza sono riassunti in tabella 3. Ancora una volta si può osservare come l'indice II_{1998} sia più cautelativo del corrispondente indice WP_{1998} che tiene in conto delle fasi e come ciò sia tanto più vero quanto più sono numerose le righe dello spettro che si elabora. Un fenomeno molto interessante è inoltre quello che si osserva per gli indici WP calcolati nel dominio della frequenza relativi allo spettro con risoluzione pari ad 1 Hz. Questi infatti, pur tenendo conto delle fasi, sono molto maggiori degli stessi indici calcolati nel dominio del tempo.

Tabella 3 | Sintesi risultati analisi misure macchina da cucire nel dominio del tempo e della frequenza

	Dominio del tempo	Dominio della frequenza			
		1	25	50	1 (+ finestra)
Risoluzione spettrale [Hz]					
B_{max} [μT]	174.6	-	-	-	
B_{rms} [μT]	126.6	126.6	127.4	127.5	125.1
$ B(f) _{max}$ [μT]	-	176.7	178.1	178.2	173.2
$f @ B(f) _{max}$ [Hz]	-		50		
II_{1998} popolazione	-	10.251	2.540	2.366	6.457
WP_{2003} popolazione (passa alto ideale)	-	5.811	1.627	1.628	1.637
WP_{2003} popolazione (passa alto del primo ordine)	1.616	6.307	1.609	1.608	1.616
WP_{1998} popolazione (cascata filtri primo ordine)	1.658	6.384	1.655	1.655	1.660
WP_{2010} popolazione (cascata filtri primo ordine)	0.474	1.104	0.480	0.479	0.480

Questo fenomeno è ben descritto in letteratura e prende il nome di *spectral leakage* (Grandke1983). L'origine di questo fenomeno è da imputarsi al fatto che, quando si esegue la DFT di una fdo misurata in un certo periodo di tempo ΔT , in realtà stiamo considerando lo spettro di una fdo indefinita nel tempo ottenuta ripetendo indefinitamente la fdo osservata. Ora, il ΔT di 1 secondo della fdo originaria è un multiplo di 20 ms e quindi ci si sarebbe potuti aspettare che la fdo ripetuta indefinitamente non presentasse discontinuità. Per qualche motivo (ce ne possono essere molti ma non approfondiamo qui la questione) ciò non accade ed è questo 'gradino', che si manifesta una volta al secondo, che origina degli indici WP relativamente più alti rispetto a quelli determinati nel dominio del tempo. Quando si considerano solo 20 o 40 ms tali discontinuità non si manifestano e gli indici WP sono allineati con quelli calcolati nel dominio del tempo. Come ulteriore riprova di ciò, in tabella 3 si riportano anche i risultati di una fdo alla quale si è applicata nel dominio del tempo una opportuna 'finestratura'. Tale operazione rende la fdo periodica con periodo pari ad 1 secondo, annullandone 'dolcemente' le componenti cartesiane, all'inizio ed alla fine del ΔT . Come si nota in tabella questa operazione è sufficiente a riportare gli indici WP in linea con quelli determinati nel dominio del tempo.

Queste ultime considerazioni, nate come commento di un caso particolare, possono essere generalizzate dicendo che l'applicazione dell'approccio WP nel dominio del tempo è meno critica rispetto a quella nel dominio della frequenza che spesso richiede interventi correttivi mirati e specifici alla particolare situazione affrontata e che in ogni caso risulta più laboriosa.

AMBITO SANITARIO: STIMOLAZIONE MAGNETICA TRANSCRANICA

Un interessante caso riscontrato in ambito sanitario è quello degli apparati per stimolazione magnetica transcranica (SMT). Si tratta di un'apparecchiatura il cui funzionamento è basato sull'applicazione di intensi impulsi di campo magnetico rilasciati da un applicatore a bobina che viene posizionato dall'operatore (a volte tenendolo in mano, a volte mediante un supporto) in prossimità della testa del paziente.

Le misure a cui si riferiscono le figure 7 e 8 e la tabella 4 sono state effettuate a soli 8 centimetri dall'applicatore ed evidenziano campi superiori al millitesla. In particolare in figura 8 si impiega il cosiddetto metodo della frequenza equivalente, definito in [7] e diffusamente spiegato in (Andreuccetti,2010). Tale metodo, applicabile a campi con caratteristiche impulsive, permette di determinare un indice, denominato qui $RETT$, ottenuto come rapporto tra l'ampiezza dell'impulso ed il limite $ICNIRP$ per il picco ad una opportuna *frequenza equivalente*. Tale frequenza si determina come $1/2tp$ dove tp è la durata di un impulso

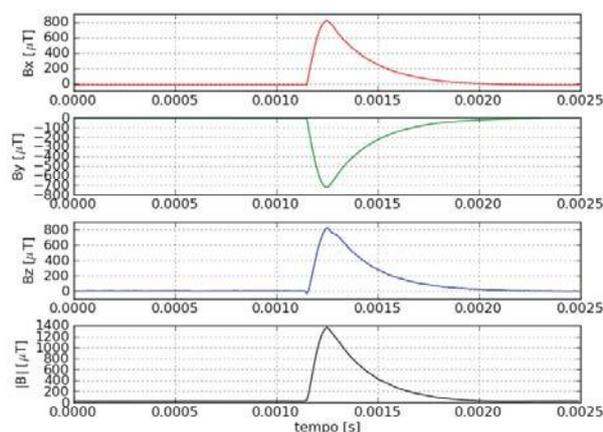


Figura 7 | Campo generato da apparati per SMT (dominio del tempo)

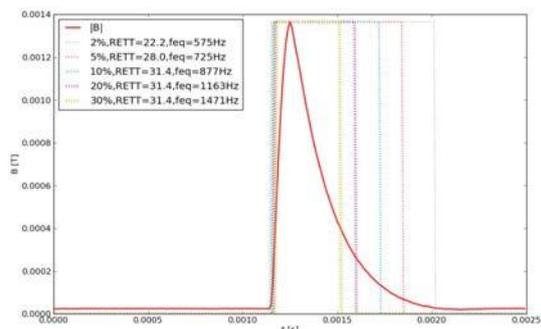


Figura 8 | Applicazione del metodo RETT al campo generato da SMT

rettangolare che ‘copre’ la fdo impulsiva. In figura si è determinato la frequenza equivalente basandosi sull’istante nel quale il campo supera la percentuale del massimo riportata in legenda.

Tabella 4 | Sintesi risultati misure SMT nel dominio del tempo e della frequenza

	Dominio del tempo	Dominio della frequenza
Risoluzione spettrale [Hz]	-	400
Bmax [μ T]	1365.2	-
Brms [μ T] (*su 2.5 ms)	349.4	-
B(f) max [μ T]	-	276.2
f @ B(f) max [Hz]	-	400
Il1998 popolazione	-	32.5
WP2003 lavoratori (passa alto ideale)	-	21.6
WP2003 lavoratori (passa alto del primo ordine)	23.9	23.9
WP1998 lavoratori (cascata filtri primo ordine)	23.8	23.9
WP2010 lavoratori (cascata filtri primo ordine)	4.8	4.8

Come si può notare mentre l’inizio dell’impulso in corrispondenza del ripido fronte di salita è praticamente coincidente per tutte le percentuali adottate non così è per il più lento fronte di discesa e ciò introduce un grosso margine di discrezionalità nella scelta di t_p , specialmente nel caso di fronti di salita/discesa relativamente lenti. Confrontando gli indici RETT riportati nella legenda di figura 8 con gli indici WP1998 di tabella 4 si può notare come si ottenga una buona corrispondenza considerando le frequenze equivalenti più basse.

Come si può notare in tabella 4 c’è un’ottima corrispondenza tra indici calcolati nel dominio del tempo e della frequenza. Siamo infatti in condizioni ideali per l’applicazione delle procedure software essendo il fenomeno osservato ben definito nel tempo ed interamente rappresentato dalla fdo campionata cosicché i primi e gli ultimi campioni memorizzati corrispondono al solo rumore.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Il processo di sviluppo del Portale Agenti Fisici ha fornito l’occasione per affrontare varie situazioni di esposizione a campi di bassa frequenza in ambito occupazionale, in un contesto normativo assai articolato a causa delle sempre più numerose tecnologie ed applicazioni che impiegano frequenze sotto i 100 kHz. Gli esempi selezionati si sono prestati a discutere sia l’impatto dell’evoluzione normativa, sia alcune criticità in termini di applicabilità delle procedure definite nelle linee guida e nelle norme tecniche.

Le misure sono state eseguite campionando e memorizzando su supporto informatico le tre componenti cartesiane del campo. Questo approccio non solo ha reso possibile l’applicazione di diversi metodi di verifica agli stessi dati ma è anche risultato particolarmente indicato anche ai fini di archiviazione (PAF) ad esempio per poter far fronte a evoluzioni della normativa o anche alla necessità di misurarsi con

standard inizialmente non previsti.

Entrando nel merito dei risultati ottenuti è interessante osservare come, fissato l'andamento del limite con la frequenza, il metodo standard fornisca indici che sono tra le 5 e le 10 volte più grandi di quelli forniti dal metodo WP.

In generale, si è visto che i metodi che operano nel dominio della frequenza sono soggetti alle problematiche associate al cosiddetto 'spectral leakage', per correggere il quale devono essere utilizzati specifici accorgimenti computazionali non sempre efficaci.

L'applicazione del metodo 'weighted peak' nel dominio del tempo, pur non essendo esente da problemi (legati ad esempio all'implementazione dei filtri e alla gestione del loro transitorio), presenta in generale meno criticità sia rispetto agli altri metodi, sia rispetto allo stesso metodo WP se applicato nel dominio della frequenza.

Nel caso delle saldatrici ad arco infine è stato evidenziato come le analisi eseguite secondo una specifica norma di prodotto possano potenzialmente fornire risultati non coerenti con l'impianto ICNIRP. Tale problema è discusso anche in (Andreuccetti, 2012) che tratta di misure effettuate a bordo di materiale rotabile ed in generale si può ripresentare laddove nella normativa tecnica si introducano dei criteri di semplificazione che non trovano riscontro nelle linee guida internazionali.

BIBLIOGRAFIA

1. Andreuccetti, Bogi, 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 (<http://puma.isti.cnr.it/dfdownload.php?ident=/cnr.ifac.fi/2010-IS-001>)
2. Andreuccetti, Zoppetti, Pieri, Del Nord, Neri, Un caso di esposizione occupazionale al campo magnetico a bordo treno. 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. CENELEC EN 50444, Norma di base per la valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici prodotti dalle apparecchiature per la saldatura ad arco e processi affini. Prima edizione, maggio 2008.
4. CENELEC EN 50445, Norma per famiglia di prodotti per dimostrare la conformità delle apparecchiature per la saldatura a resistenza, saldatura ad arco e processi affini ai limiti di base relativi all'esposizione umana ai campi elettromagnetici (0 Hz – 300 GHz). Prima edizione, maggio 2008.
5. CENELEC EN 50499, Procedura per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici. Prima edizione, novembre 2011.
6. CENELEC EN 50500, Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure. July 2008.
7. Grandke Interpolation Algorithms for Discrete Fourier Transforms of Weighted Signals. IEEE Transaction on instrumentation and Measurements. Vol IM-32, N. 2 June 1983
8. ICNIRP Guidelines, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics, Vol.74, N.4, April 1998, pp.494-522, April 1998.
9. ICNIRP Statement, Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. Health Physics, Vol.84, N.3, March 2003, pp.383-387, March 2003.
10. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics, Vol.99, N.6, pp.818-836, December 2010.
11. Zoppetti, Andreuccetti, Bogi, Pinto, Norme CENELEC relative all'esposizione umana ai campi magnetici generati da saldatrici ad arco: una ricognizione critica basata su interventi in situazioni reali. Atti (su supporto elettronico) del XXXV Congresso Nazionale AIRP di Radioprotezione, 17-19 ottobre 2012 Venezia ISBN 978-88-88648-35-4.