

Analisi di situazioni critiche nella valutazione dell'esposizione a campi magnetici con forme d'onda complesse

G. Crotti, D. Giordano

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica - Strada delle Cacce, 91 – 10135 Torino
g.crotti@inrim.it, d.giordano@inrim.it

RIASSUNTO

Il lavoro analizza alcune problematiche che si riscontrano nella valutazione della conformità alle prescrizioni riguardanti l'esposizione ai campi magnetici a bassa e media frequenza. L'analisi, focalizzata sulla valutazione in presenza di forme d'onda distorte o a carattere impulsivo ed effettuata combinando misure sperimentali e valutazioni numeriche, evidenzia alcune criticità, legate alla scelta della finestra temporale o spettrale di analisi, in relazione al metodo di valutazione adottato.

INTRODUZIONE

La verifica della conformità alle prescrizioni riguardanti l'esposizione ai campi magnetici a bassa e media frequenza viene di norma effettuata, in sede di primo riscontro, mediante confronto dei valori di misura con livelli di riferimento che variano in funzione della frequenza [1]. La valutazione della conformità è immediata nel caso in cui vi sia una singola sorgente di campo sinusoidale. Più problematica è invece la situazione quando siano presenti una o più sorgenti generanti campi non sinusoidali, pulsati, aperiodici o con componenti transitorie. Induzioni magnetiche aventi andamenti temporali complessi sono frequentemente riscontrabili in ambiente industriale, laddove possono operare sorgenti con assorbimenti di potenza elevati e cicli di funzionamento fortemente irregolari. Per tali forme d'onda, in accordo con quanto indicato dall'International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP), possono essere adottate diverse modalità di valutazione [1, 2]. Le indicazioni ICNIRP sono state recepite dalla legislazione europea e nazionale, mentre la corrispondente normativa tecnica fornisce indicazioni per quanto riguarda le procedure da seguire sia nella valutazione dell'esposizione di lavoratori e popolazione, sia nella determinazione della conformità delle emissioni di apparecchiature e dispositivi. Tenuto conto della complessità e varietà delle forme d'onda generate, in particolari situazioni i differenti approcci indicati possono portare a risultati non coerenti.

Nel seguito, dopo una breve discussione delle diverse metodologie di valutazione della conformità alle prescrizioni, vengono analizzate e discusse alcune situazioni reali. Il comportamento di strumenti di misura di campo magnetico a bassa e media frequenza, in presenza di campi non periodici ed impulsivi con contenuto spettrale sino alle decine di kilohertz, è analizzato in relazione alle diverse modalità di valutazione dell'esposizione. Lo studio è condotto sia numericamente, analizzando andamenti temporali registrati in prossimità di diversi tipi di sorgenti, sia sperimentalmente, riproducendo tali andamenti mediante opportuni sistemi di generazione e rilevando la risposta dei misuratori. Con riferimento alle situazioni considerate, vengono messe in luce e discusse alcune criticità quali, ad esempio, la scelta delle dimensioni della finestra temporale e del segmento di segnale preso in considerazione.

VALUTAZIONE DELLA CONFORMITÀ ALLE PRESCRIZIONI

Benché la conformità alle prescrizioni sia espressa in termini di grandezze di base (densità di corrente indotta nella gamma di frequenze sino a 100 kHz), il rilievo diretto di campo magnetico e il conseguente confronto con le prescrizioni relative all'esposizione in termini di livelli di riferimento [1] costituiscono in molti casi la prima verifica effettuata *in situ*. Nel caso di campi periodici sinusoidali, il confronto tra valore efficace dell'induzione misurata e corrispondente livello di riferimento alla frequenza di interesse è immediato. Più complicata è la situazione in cui i contributi al campo siano dati da sorgenti diverse e/o da sorgenti che producano campi con forma d'onda complessa. La figura 1 mostra, a titolo di esempio, le tre componenti di induzione magnetica rilevate in prossimità di una saldatrice in corrente alternata (a) e di un dispositivo magnetizzatore (b).

Nel caso di sorgenti multiple e/o campi distorti periodici, la conformità alle raccomandazioni ICNIRP, con riferimento ai soli effetti di stimolazione dovuti a correnti elettriche indotte, può essere conservativamente valutata mediante la relazione:

$$\sum_{f_i \geq 1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{B(f_i)}{B_{\text{rif}}(f_i)} + \sum_{f_i \geq 65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{B(f_i)}{43.4} = T_0 \leq 1 \quad (1)$$

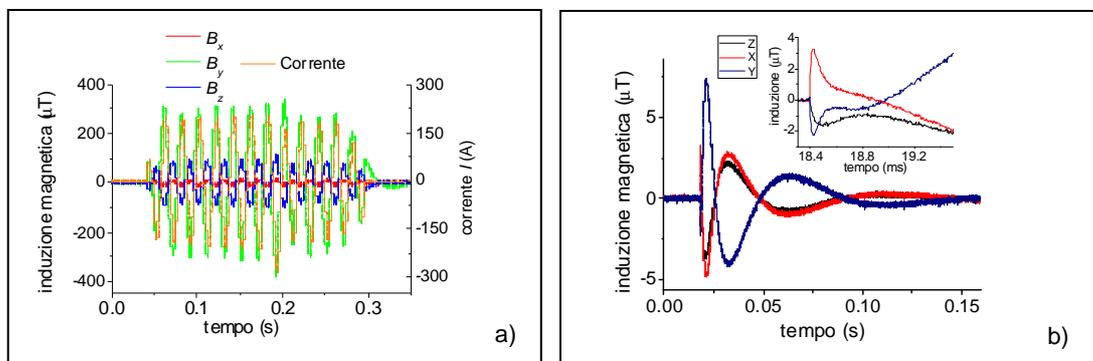
dove $B(f_i)$ è l'intensità del campo alla frequenza f_i , $B_{rif}(f_i)$ è il corrispondente livello di riferimento per l'esposizione dei lavoratori.

Ad analogo risultato si giunge moltiplicando entrambi i membri della (1) per il livello di riferimento $B_{rif}(f_{rif})$ a una arbitraria frequenza f_{rif} . In questo modo si ottiene un'induzione magnetica "pesata" B_w che può essere direttamente confrontata con l'induzione assunta come riferimento ($B_{rif}(f_{rif})$):

$$B_w = T_0 B_{rif}(f_{rif}) = \sum W(f_i) \cdot B(f)_i \leq B_{rif}(f_{rif}) \quad (2)$$

Un approccio meno conservativo può essere adottato considerando una funzione peso complessa $W^*(f)$, implementabile sia mediante una funzione complessa lineare a tratti, sia mediante un filtro passa alto del prim'ordine [3, 4]. Come noto, il filtro passa alto, avente frequenza di taglio pari a 800 Hz per la popolazione e 820 Hz nel caso dei lavoratori, può essere realizzato mediante un circuito resistivo capacitivo oppure numericamente. Anche in questo caso la conformità alle prescrizioni è assicurata se l'indice (T_p per il filtro lineare a tratti e T_f per il filtro del primo ordine) ottenuto come rapporto tra il valore di picco dell'induzione normalizzata e il corrispondente livello di riferimento, espresso come valore di picco, risulta inferiore all'unità.

Fig 1 Esempi di induzione magnetica misurata



a) andamento in prossimità di una saldatrice AC; b) andamento in prossimità di un magnetizzatore.

ANALISI DI FORME D'ONDA COMPLESSE

PRESENZA DI COMPONENTI NON ARMONICHE

La prima analisi, condotta numericamente, vuole evidenziare l'effetto della presenza di componenti aventi frequenza non multiple della fondamentale.

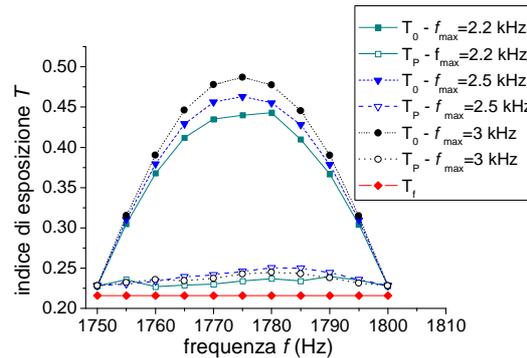
A tale scopo si riproduce una forma d'onda sinusoidale di ampiezza pari a 80 μT e frequenza 50 Hz a cui

è sovrapposta una componente di intensità pari a 5 μT , anch'essa sinusoidale di frequenza compresa

nell'intervallo da 1750 Hz a 1800 Hz in fase con la fondamentale. Il segnale viene analizzato considerando una finestra temporale pari a 20 ms a cui corrisponde, nel dominio della frequenza, una risoluzione di 50 Hz. La figura 2 mostra l'andamento dell'indice di esposizione con riferimento all'esposizione dei lavoratori, calcolato mediante le tre modalità precedentemente indicate. Le valutazioni nel dominio della frequenza sono effettuate per diversi valori della frequenza massima considerata.

Dall'analisi della figura 2 si osserva come l'indice di esposizione valutato mediante il filtro passa alto (T_f) non risente della variazione della frequenza della seconda componente, attestandosi a 21.6%, mentre l'indice T_p presenta una variazione rispetto a T_f che al massimo raggiunge il 14 %. Rilevante è invece lo scarto dell'indice T_0 ; esso è da imputare al fatto che la componente di ampiezza inferiore avendo una frequenza non multipla di 50 Hz, non può essere correttamente rilevata, a causa della finestra temporale considerata. La scelta di una finestra tale da assicurare una sufficiente risoluzione in frequenza permette di ottenere valori dell'indice T_0 prossimi a quelli ottenuti utilizzando la funzione peso complessa considerando un solo periodo della componente principale.

Fig 2 Andamento degli indici di esposizione T_0 , T_P e T_f



Influenza della presenza di una componente a frequenza non multipla della fondamentale per diversi valori della frequenza massima di analisi

SCELTA DELLA FREQUENZA MASSIMA PER L'ANALISI NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

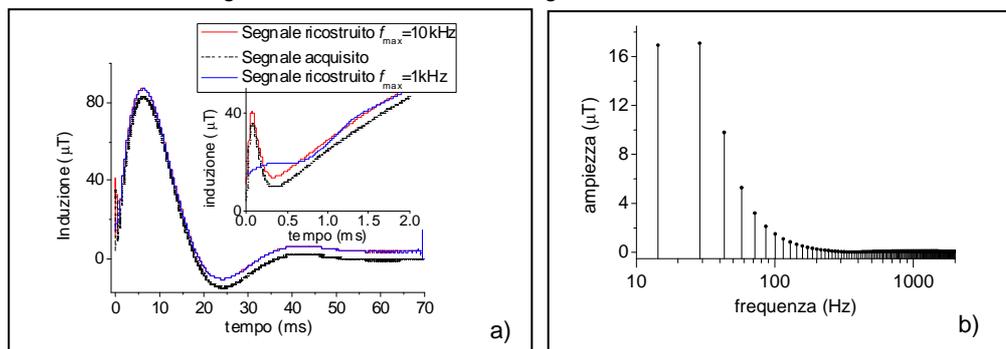
La valutazione degli indici T_0 e T_f nel caso del segnale riportato in Fig 1b), misurato con uno strumento che fornisce sia gli andamenti temporali delle componenti di campo, sia l'indice di esposizione mediante filtro passa alto, fornisce risultati inaspettati. Considerando infatti le componenti spettrali significative (sino a 1 kHz) si ottiene un indice di esposizione $T_0=2.9\%$ decisamente inferiore all'indice $T_f=4.8\%$, valutato adottando l'approccio meno cautelativo.

Al fine di spiegare questa incongruenza si è riprodotta un'induzione magnetica, con andamento simile al segnale riportato in Fig 1b), mediante il sistema di generazione di campo magnetico a bassa e media frequenza in uso presso l'INRIM [5]. Il sistema è alimentato con un segnale di corrente (Fig 3a) ottenuto dalla sovrapposizione di un impulso ricostruito tramite esponenziali e una sinusoida smorzata:

$$I_{test} = I_1 \cdot (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) + I_2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \cdot e^{-t/\tau_3} \quad (3)$$

Il misuratore di campo, posizionato nel centro del sistema di generazione a bobine di Helmholtz, fornisce un indice di esposizione pari al 68%. Allo stesso risultato si giunge valutando l'indice T_f a partire dal segnale di corrente acquisito, nota la costante di trasformazione del sistema. L'analisi prosegue valutando l'indice T_0 : Il calcolo è effettuato per i valori di frequenza sino a 1 kHz e 10 kHz, senza alcuna soglia minima di ampiezza, ottenendo rispettivamente 20.3% e 85%. L'analisi dei segnali ricostruiti utilizzando ampiezza e fase di ciascuna componente impiegata nella valutazione di T_0 rileva una grande imprecisione nella ricostruzione dell'impulso esponenziale (ingrandimento in Fig. 3a) qualora essa sia effettuata considerando le componenti sino alla frequenza massima di 1 kHz, frequenza scelta sulla base di un'indagine visiva sullo spettro riportato in figura 3b.

Figura 3 – Caratteristiche del segnale ricostruito in laboratorio



- a) andamento del segnale riprodotto in laboratorio e sua ricostruzione con frequenza massima di 1 kHz e 10 kHz.
- b) componenti spettrali

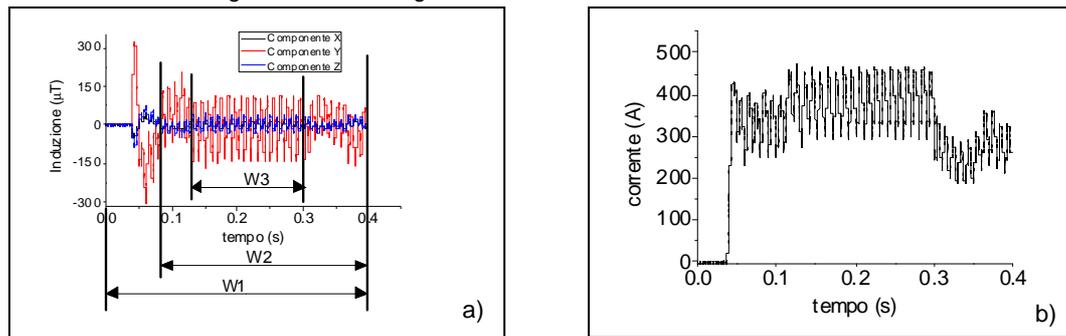
L'anomalia nasce dal fatto che, sebbene lo spettro non presenti apparentemente componenti rilevanti oltre il kilohertz, l'impulso di tipo esponenziale introduce un contributo spettrale di ampiezza decisamente inferiore rispetto alle componenti a bassa frequenza della sinusoida smorzata, risultando quindi nascosto dal rumore; l'eventuale esclusione delle componenti al di sotto di una certa soglia peggiora ulteriormente la ricostruzione del segnale e quindi la stima dell'indice.

ANALISI AL VARIARE DELLA FINESTRA TEMPORALE

Si prende in considerazione un andamento di induzione magnetica rilevato in prossimità di una saldatrice ad arco alimentata da una corrente continua (Fig. 4). Il tempo complessivo di acquisizione è di 400 ms con 40001 campioni acquisiti. Al fine di valutare l'effetto sugli indici di esposizione della scelta di diverse finestre temporali, vengono definite tre finestre di analisi: W_1 contenente tutti i campioni acquisiti, W_2 che esclude la prima parte di segnale e infine W_3 che individua il segmento di segnale più stabile (Fig 4).

In tabella 1 si riportano i risultati relativi all'esposizione dei lavoratori per i tre metodi di calcolo dell'indice di esposizione; per la valutazione degli indici T_0 e T_p il valore massimo di frequenza considerato, in accordo con quanto indicato dalla [6], è di 3 kHz.

Fig 4 Induzione magnetica misurata e corrente di alimentazione



a) componenti misurate nel prossimà di una saldatrice ad arco alimentata in continua; b) corrente di alimentazione rilevata

Si osserva come l'indice T_0 , relativo al caso 1, sia eccessivamente cautelativo, ciò è da imputarsi oltre che alla somma non vettoriale, ma algebrica delle componenti armoniche anche al fatto che vengono sommate componenti da imputarsi al rumore introdotto dalla trasformata di Fourier. L'indice T_0 si riduce notevolmente se, a parità di gamma di frequenza si considerano le sole componenti con ampiezza superiore al 3% della massima rilevata (Caso 2). La finestra W_3 è scelta in modo che la componente di campo più consistente (componente y) abbia valore iniziale massimo (Caso 4). I risultati ottenuti mostrano un drastico aumento dell'indice valutato dal filtro del primo ordine implementato numericamente. Questo errore è causato dall'elevato valore del primo campione, che processato dal filtro numerico passa alto, introduce un picco di valore erroneamente elevato (196.1 μT) e quindi un indice di esposizione T_f pari al 452%. Il caso 4 riporta una drastica diminuzione dell'indice T_0 , che si avvicina al valore di T_p , sostanzialmente invariato rispetto al Caso 3.

Tabella 1 – Valori degli indici di esposizione

	Caso 1 W_1	Caso 2 W_1 (soglia 3%)	Caso3 W_2 (soglia 3%)	Caso 4 W_3 (soglia 3%)
T_0	504%	192%	163%	85.5%
T_p	103%	65.6%	61.5%	60%
T_f	72.8%	72.8%	72.8%	452%

Bibliografia

- [1] ICNIRP *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Physics, vol. 74, n. 4, pp. 494-522 (1998).
- [2] 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, pp. 383-387 (2003).
- [3] K. Jockela, *Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields*, Health Physics, vol. 79, n. 4, pp. 373-388 (2000).
- [4] G. Crotti, D. Giordano, *Characterisation of Magnetic Field Measuring Instruments In Presence of Non-Sinusoidal Magnetic Fields*, Atti del 16th IMEKO TC4 Symposium – Firenze, Italy – Settembre 22 - 24, 2008.
- [5] M. Chiampi, G. Crotti, D. Giordano, *Set up and Characterization of a System for the Generation of Reference Magnetic Fields from 1 kHz to 100 kHz*, IEEE Trans. Instrum. Meas, vol. 42, pp. 547-552 (2007).
- [6] CEI 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*. 2008
- [7] T. Winkler, R. Doebbelin; A. Lindemann, *Magnetic Fields of Resistance Welding Equipment-Assessment of the Exposure*, Atti del 7th Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, pp.60-67, 2007.