

La valutazione dell'esposizione in ambienti di lavoro: illustrazione di casi di studio

Rosaria Falsaperla

ISPESL – Dipartimento Igiene del Lavoro, Via Di Fontana Candida 1, 00040 Monte Porzio Catone (ROMA)
rosaria.falsaperla@ispesl.it

INTRODUZIONE

Numerose attività lavorative possono comportare esposizioni a livelli di campo sensibilmente più elevati di quelli che interessano la popolazione. Tali esposizioni, in assenza delle opportune misure di contenimento, possono implicare il superamento dei limiti universalmente riconosciuti per la protezione dagli effetti accertati (induzione di correnti elettriche e riscaldamento).

La complessità delle esposizioni occupazionali, in relazione alla vastissima tipologia di sorgenti in gioco (macchine industriali, apparati medici, sistemi di telecomunicazione, produzione e trasmissione dell'energia elettrica, motori elettrici, ecc.) rende problematica la definizione di procedure generali di valutazione del rischio.

La misura dei campi elettrico e magnetico imperturbati nella posizione dell'operatore, è relativamente semplice nel caso di campi sinusoidali uniformi ma si complica notevolmente in presenza di segnali complessi. In pratica, in particolare nei settori dell'industria e della sanità, campi non uniformi sono più una regola che una eccezione anche perché la maggior parte delle situazioni espositive avviene in stretta prossimità della sorgente dove i campi sono fortemente disomogenei. Una ulteriore complicazione è introdotta dalla tipologia del segnale, spesso non sinusoidale ma caratterizzato da andamenti complessi e impulsivi la cui valutazione richiede l'impiego di sofisticata strumentazione a banda stretta in grado di eseguirne l'analisi armonica o di rappresentarne l'andamento nel dominio del tempo.

Scopo di questa relazione è presentare, attraverso due casi applicativi, due differenti approcci operativi impiegati per la trattazione di segnali complessi. In particolare il primo caso descrive il protocollo di misura adottato per effettuare la valutazione dell'esposizione dei macchinisti dei treni, mentre il secondo si riferisce alla valutazione dell'esposizione ai campi magnetici generati da un apparato industriale per la saldatura dei metalli.

VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE A CAMPI MAGNETICI STATICI E ALTERNATI DEI MACCHINISTI DELLE FERROVIE

Questa sezione descrive una indagine sperimentale, condotta dall'ISPESL in collaborazione con la società Trenitalia S.p.A., indirizzata alla valutazione dell'esposizione dei macchinisti ai campi magnetici statici e alternati presenti a bordo delle motrici.

Le misure sono state effettuate su 8 differenti modelli di motrici in tutte le zone ritenute significative ai fini protezionistici in quanto accessibili ai macchinisti, ovvero all'interno delle cabine di guida anteriori, nei corridoi e, ove presenti, nelle cabine di guida posteriori.

Tutte le misurazioni sono state eseguite a bordo in condizioni regolari di servizio (due macchinisti presenti simultaneamente) non alterando le modalità operative dei macchinisti. Le tratte considerate nell'indagine variano da alcune decine di km (Roma - Nettuno) a qualche centinaia di km (Roma - Firenze).

Poiché al tempo della campagna il sistema di elettrificazione della rete ferroviaria italiana era tutto basato su linee a 3kV DC, la presenza di campi magnetici statici all'interno delle vetture motrici deriva dall'alimentazione elettrica delle stesse, dalla presenza di cablaggi elettrici e in generale da tutte le apparecchiature elettriche alimentate in corrente continua.

La presenza di campi alternati è dovuta prevalentemente al funzionamento di alternatori o di gruppi statici, ai cablaggi elettrici, ai circuiti di trazione dei motori e a tutte le apparecchiature pertinenti l'area della cabina di guida quali impianti di climatizzazione e di riscaldamento del vetro, luci e strumentazione di bordo.

In tutte le motrici esaminate sia i motori di trazione che i servizi ausiliari sono alimentati in corrente alternata ad eccezione di due modelli nei quali i motori sono alimentati in corrente continua, mentre gli ausiliari in corrente alternata.

L'indagine sperimentale ha preso in esame la valutazione del solo campo magnetico in quanto, in considerazione della tipologia delle sorgenti, non si è ritenuto il campo elettrico di interesse protezionistico.

Le misure di campo statico sono state effettuate mediante il misuratore isotropo ad effetto Hall Metrolab ETM-1.

Per quanto riguarda i campi magnetici alternati, la problematica di misura riveste una notevole complessità, considerata la peculiarità delle variabili elettromagnetiche che in sostanza assumono uno spettro di frequenze non prevedibile e variabile istante per istante dipendendo dall'assorbimento di corrente e dalle condizioni di trazione dei motori. I segnali oggetto di misura sono caratterizzati da frequenze variabili

fino a circa 20 kHz e da forme d'onda estremamente complesse non descrivibili in termini di onde sinusoidali. Ai nostri scopi è stato comunque ritenuto sufficiente il contenuto informativo ottenibile con una procedura di misurazione "a banda larga" in un intervallo di frequenze ragionevolmente esteso a tutti i contributi aspettabili, in quanto una precedente campagna sperimentale (in collaborazione con Trenitalia e alcune università italiane, Bellan D. et al, 2002) aveva evidenziato coerenza nei risultati delle misure in banda larga e in banda stretta ai fini della valutazione dell'esposizione.

Inoltre al tempo dell'indagine non era stato ancora definito alcun protocollo standard di valutazione dell'esposizione umana in ambiente ferroviario. In seguito alla pubblicazione della Direttiva 2004/40/CE sulla protezione dei lavoratori dai campi elettromagnetici, recepita dal d.lgs. 9 aprile 2008 n. 81, il CENELEC ha lavorato a questo scopo e ha pubblicato la norma EN 50500 (CENELEC EN 50500, 2008). Il nostro protocollo di misura, benché precedente a questo standard, si è rivelato comunque coerente con il suo razionale.

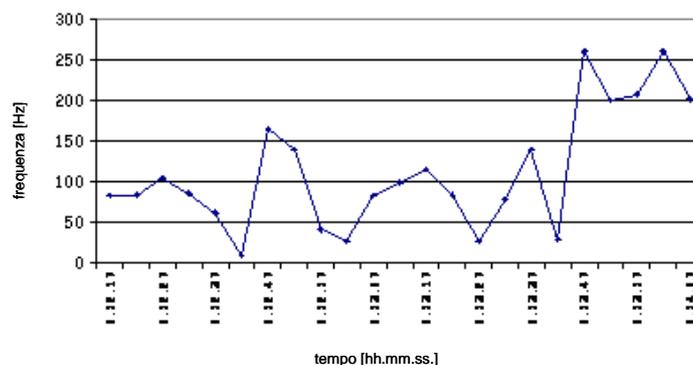
Per ottenere la massima informazione sono stati utilizzati differenti misuratori contemporaneamente. In particolare sono stati impiegati due misuratori (W&G EFA-3 e EFA-1) dotati di sonda a larga banda sensibile nell'intervallo di frequenza 5 Hz – 30 kHz, di cui uno (EFA-3) in grado di acquisire e memorizzare i dati a step temporali prefissati di 5 s. Per sfruttare al meglio le differenti potenzialità dei due strumenti, L'EFA-3 è stato fissato sul banco comandi ed è stato utilizzato per memorizzare l'andamento nel tempo del campo, mentre l'EFA-1 è stato utilizzato per effettuare misure spot e quindi caratterizzare spazialmente il campo magnetico nella cabina di guida anteriore e negli altri locali accessibili ai macchinisti (corridoi e cabine di guida posteriori).

Parallelamente sono stati impiegati due misuratori personali dotati di sonda a larga banda sensibile in un intervallo di frequenza tra 40 Hz e 1 kHz, in grado acquisire a step temporali prefissati (10 s) e di memorizzare i dati. Uno dei due misuratori (EMDEX LITE) è stato indossato dal macchinista alla guida del treno nella fase iniziale del viaggio, inserendolo direttamente nella sua cintura o nella tasca della camicia ed è stato lasciato nella stessa posizione anche nei casi in cui il macchinista si spostava nel corso del viaggio nella adiacente postazione, per dare il cambio alla guida al secondo operatore. Tale metodologia ha permesso di caratterizzare l'esposizione del singolo macchinista durante tutto il proprio turno di lavoro come realmente sperimentata nella pratica. Il secondo misuratore personale (Microrad HT 300) è stato fissato sulla sedia della postazione del secondo macchinista a circa 50 cm dal pavimento ed è stato lasciato in questa posizione durante tutto il viaggio. Questa configurazione dei misuratori personali ha permesso di effettuare un confronto tra i livelli di esposizione presenti nelle due postazioni dei macchinisti e, nei casi di inversione di ruolo tra i due, di avere un'indicazione dei livelli di campo a due altezze differenti nella postazione del secondo macchinista.

Sintetizzando i risultati delle misure, l'esposizione ai campi magnetici statici è risultata in media poco superiore a quella del campo magnetico terrestre. Solo occasionalmente e in prossimità di cavi elettrici o di specifiche attrezzature quali ad esempio gli impianti ausiliari i livelli di campo hanno raggiunto valori dell'ordine del mT. L'esposizione media ai campi magnetici alternati è risultata dell'ordine di 1-2 μ T, con valori più alti (alcuni μ T) solo nel caso di una motrice (motori di trazione alimentati da corrente alternata). Occasionalmente in prossimità di cavi o di specifiche attrezzature, le misure spot hanno evidenziato livelli di campo dell'ordine di qualche decina di μ T.

Per comprendere la complessità dei segnali rilevati in fig.1 è illustrato a titolo esemplificativo l'andamento della frequenza del segnale in funzione del tempo per il treno ETR500, registrata dal misuratore W&G EFA-3 .

Figura 1 – Andamento nel tempo della frequenza fondamentale del campo magnetico - Treno ETR500



Nel caso del treno ETR500 in cui i motori di trazione sono alimentati in corrente alternata, il contenuto armonico del segnale è estremamente complesso e non è possibile individuare una frequenza fondamentale come illustrano i dati relativi alla finestra temporale considerata. Al contrario, nel caso di motrici i cui motori di

trazione sono alimentati in corrente continua e la corrente alternata viene utilizzata solo per l'alimentazione dei servizi ausiliari, è possibile individuare una frequenza fondamentale stabile che si attesta intorno ai 50/60 Hz.

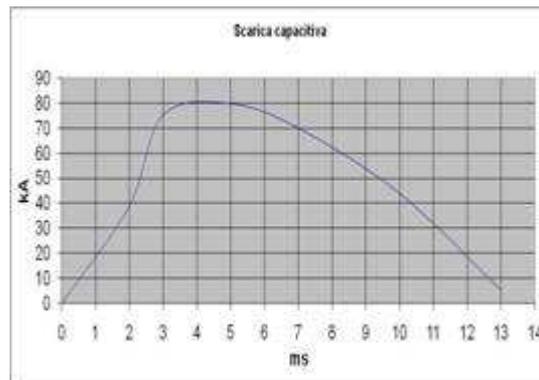
VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE OCCUPAZIONALE AI CAMPI MAGNETICI GENERATI DA UN APPARATO PER LA SALDATURA A RESISTENZA

Le saldatrici a resistenza sono impiegate nel trattamento dei metalli. L'elemento in lavorazione (ad es. due parti di metallo da saldare) è inserito all'interno di un applicatore costituito da due elettrodi, che cede energia al materiale attraverso l'induzione nello stesso di elevate correnti. Tali correnti comportano la presenza di intensi campi magnetici in prossimità dell'applicatore. Le caratteristiche della corrente (ampiezza e forma d'onda) dipendono dalla tecnica impiegata dall'apparato.

In questa sezione viene presentata un'indagine pilota condotta dall'ISPESL su un apparato campione reso disponibile dall'Università del Salento, finalizzata a delineare un approccio alla valutazione dell'esposizione ai campi magnetici generati da questa tipologia di macchinari.

Il funzionamento dell'apparato in esame (fig.1) è basato sulla generazione di una sequenza di impulsi di corrente all'interno degli elementi metallici da saldare. Il tempo di ripetizione degli impulsi è dell'ordine di alcuni secondi (3-4 s) mentre la durata del singolo impulso è dell'ordine della decina di ms. La fig.1 mostra un esempio di impulso di corrente generato dall'apparato.

Figura 1 – Saldatrice a resistenza (a sinistra) e forma d'onda dell'impulso di corrente (a destra)



Numero e periodo di ripetizione degli impulsi, durata di ogni singolo impulso e energia in gioco nel processo possono essere opportunamente impostati in funzione del metallo da trattare attraverso un pannello elettronico posto all'esterno dell'apparato. Il valore di picco della corrente è dell'ordine delle decine di kA alla tensione di qualche volt. L'applicatore è costituito da due piatti metallici, uno fisso e uno mobile gestito da un circuito idraulico esterno che consente di fissare la pressione meccanica da esercitare sul pezzo da saldare. Prima di iniziare la lavorazione vera e propria, utilizzando un provino di rame, viene quindi effettuato un test di pressione. Sempre impiegando un provino di rame viene anche effettuato un test sulla corrente di scarica per verificare l'adeguatezza dei parametri fissati per la saldatura. Sia questi test preliminari che il processo di saldatura sono gestiti manualmente da un operatore attraverso comandi posti sul pannello di controllo dell'apparato. Durante tutte le operazioni, una barriera ottica impedisce che l'operatore inserisca le mani all'interno dell'applicatore durante la saldatura.

La scarica di corrente si verifica nel momento in cui il piatto superiore dell'applicatore tocca il metallo (provino o materiale in lavorazione) e l'operatore risulta esposto al campo magnetico generato da tale corrente. La presenza di campo magnetico è limitata alla durata del test sul provino di rame o della saldatura del metallo.

Per frequenze fino a circa 100 kHz e per campi magnetici impulsivi, il valore massimo della densità di corrente associata ad un impulso dipende dal massimo tasso di variazione del flusso di induzione magnetica, a sua volta dipendente dai tempi di salita/discesa dell'impulso.

Ai fini della verifica di conformità della condizione espositiva, la natura impulsiva del segnale implica l'individuazione di una frequenza equivalente che consenta di rapportare i valori di campo magnetico misurati ai valori di azione stabiliti dalla Direttiva 2004/40/CE.

Un metodo semplificato indicato per calcolare la frequenza equivalente, già presente nelle Linee Guida ICNIRP (ICNIRP, 1998) e ripreso dalla Direttiva 2004/40/CE, è:

$$f=1/2t_p$$

dove t_p è il tempo di salita/discesa dell'impulso.

Il valore di picco per la densità di flusso magnetico è quindi calcolato moltiplicando il pertinente valore di azione (rms) alla frequenza f per $\sqrt{2}$.

Nel caso in esame, il tempo di salita dell'impulso, correlato al massimo tasso di variazione del flusso di induzione magnetica, è circa 4 ms (fig.1). Conseguentemente la frequenza equivalente risulta pari a circa 125 Hz, cui corrisponde il valore di azione 200 μT e il limite di esposizione sulla densità di corrente indotta di 10 mA/m^2 .

Per quanto riguarda gli aspetti legati alla misura, i tipici strumenti a banda larga non sono idonei alla rilevazione di segnali impulsivi in quanto il tempo di risposta dell'elettronica di rilevazione è di norma maggiore della durata dell'impulso. Una soluzione è analizzare il segnale nel dominio del tempo utilizzando un misuratore di campo magnetico con uscita analogica e un oscilloscopio digitale che consenta di visualizzare la forma d'onda del segnale.

Poiché, alla frequenza in esame, l'interesse è rivolto alla protezione dagli effetti sul sistema nervoso centrale, le zone di interesse protezionistico sono quelle occupate dalla testa e dal tronco del soggetto esposto. Sulla base di queste considerazioni nell'indagine pilota sono state effettuate due serie di misure a differenti distanze dall'apparato lungo l'asse centrale dello stesso simulando le possibili postazioni dell'operatore durante il processo di saldatura. Le misure sono state effettuate ad altezze variabili tra 50 cm e 175 cm con step di 25 cm. Lo stesso insieme di rilevazioni è stato ripetuto a destra e sinistra dell'asse centrale, a distanza di 50 cm dalla stessa. Tutte le misure sono state eseguite posizionando il misuratore su un supporto dielettrico.

Poiché la tensione ai capi dell'applicatore è costante, il valore di picco di corrente di ogni singolo impulso dipende dall'impedenza del metallo. Per garantire la riproducibilità delle misure durante tutta l'indagine è stato sempre impiegato un provino di rame.

Un metodo di misura alternativo a quello descritto è basato sulla valutazione diretta del tasso di variazione del flusso di induzione magnetica, dB/dt , in accordo alla procedura delineata nello Statement ICNIRP (ICNIRP, 2003). Tale metodo presuppone che lo strumento impiegato abbia implementato in sé un filtro idoneo per applicare la funzione peso sui valori di campo misurati e che sia dotato di un vero rilevatore di picco. Gli strumenti ad oggi commercialmente disponibili non forniscono nei manuali d'uso informazioni chiare che indichino il soddisfacimento di entrambi i requisiti e quindi il metodo operativo sicuramente affidabile cui riferirsi rimane quello della frequenza equivalente.

Bibliografia

- Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81: "Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro". G.U. n. 101 del 30 aprile 2008; Supplemento ordinario n. 108/L.
- DIRETTIVA 2004/40/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 29 aprile 2004 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) (diciottesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE), Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 184/1 del 24-5-2004.
- CENELEC Standard EN 50500: Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure, 2008.
- Bellan D., Pignari S., P.Betti, D. Carillo, A. Gaggelli, M. D'Amore, F. Maradei, M. D'Arco, C. De Capua, M. Grandolfo, A. Mariscotti, P. Pozzobon, P. Rossi: Measurement and Analysis of Low-Frequency Magnetic Field Emission in Rolling Stock. 5° International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 2002), Volume 2, pp. 1201-1204. Sorrento, Italy, Sept. 9-13, 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 1998; 74: 494-509.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. Health Physics 2003; 84: 383-387.