

Un caso di esposizione occupazionale al campo magnetico a bordo treno

Daniele Andreuccetti (1), Nicola Zoppetti (1), Lapo Pieri (2), Pasquale Del Nord (3)

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

D.Andreuccetti@ifac.cnr.it, N.Zoppetti@ifac.cnr.it

(2) Alternalab Soc. Coop. - info@alternalab.it

(3) Trenitalia S.p.A. - P.DelNord@trenitalia.it

Riassunto

Nell'ambito di una recente collaborazione tra IFAC e Trenitalia SpA, è stato condotto uno studio finalizzato alla valutazione dell'esposizione al campo magnetico subita dal personale ferroviario a bordo di un particolare modello di automotrice leggera elettrica, sulla base di misure eseguite dall'ufficio tecnico dell'azienda di trasporto. L'analisi dei dati rilevati – svolta alla luce delle normative internazionali, che sono cambiate nel corso della valutazione – ha permesso di accertare l'assenza di rischi per il personale viaggiante e di documentare l'impatto dell'evoluzione normativa.

Il valore dell'indice proposto dall'ICNIRP nel 1998 per quantificare l'esposizione al campo magnetico con forma d'onda complessa raggiunge un valore pari a 2.4 a bordo dell'automotrice considerata, anche applicando l'algoritmo per la correzione dello "spectral leakage". Il metodo con cui questo indice viene calcolato (che nel seguito viene chiamato "metodo standard") è riconosciuto essere fortemente restrittivo. Infatti, l'applicazione di una diversa metrica di valutazione (proposta nella norma CENELEC 50500, specifica per l'ambiente ferroviario) porta a calcolare, nella stessa situazione, un valore massimo pari a 0.65. Adottando infine un approccio nel dominio del tempo, sviluppato estendendo le indicazioni contenute nello statement ICNIRP del 2003 relativo alle forme d'onda complesse a bassa frequenza, si ottiene un valore massimo dell'indice "weighted peak" pari a 0.82. Tutto ciò sta ad indicare come talvolta l'adozione di una metrica più ragionevole o di un algoritmo di valutazione più appropriato possano permettere di riconoscere conformi alle norme alcune tipologie di esposizione, anche senza la necessità di ricorrere a complesse indagini dosimetriche. L'analisi dosimetrica, comunque, nei casi in questione è stata effettuata ed ha confermato l'assenza di rischi per il personale esposto: le restrizioni di base ICNIRP-1998 risultano ampiamente rispettate anche ipotizzando condizioni di esposizione particolarmente cautelative. L'entrata in vigore, nel dicembre 2010, delle nuove linee guida ICNIRP per le basse frequenze ha ulteriormente ridimensionato il problema: il valore massimo dell'indice ICNIRP si riduce a 0.51 (applicando il metodo standard) e ad 0.15 (applicando l'approccio "weighted peak"), mentre risulta identicamente nullo se si utilizza il metodo proposto dal CENELEC.

INTRODUZIONE

Viene discusso un caso di valutazione dell'esposizione occupazionale al campo magnetico a bassa frequenza con forma d'onda complessa. Si tratta dell'esposizione subita dal personale ferroviario a bordo di un particolare modello di automotrice leggera elettrica (che nel seguito chiameremo convenzionalmente "ALEX"), facente parte del parco rotabili di Trenitalia.

Lo studio si è svolto nell'ambito di un accordo di collaborazione avviato all'inizio del 2008 tra l'IFAC-CNR e la stessa Trenitalia, finalizzato ad analizzare e rielaborare i risultati delle misure effettuate dall'azienda a bordo del proprio rotabile, con lo scopo di reinterpretare tali risultati alla luce dell'evoluzione normativa e di approfondirli con valutazioni di tipo dosimetrico.

Nei primi anni 2000, Trenitalia ha promosso la costituzione di un gruppo di lavoro – comprendente esperti dell'Istituto Superiore di Sanità, dell'Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro, del mondo accademico e delle aziende del gruppo FS – con il compito di mettere a punto una specifica tecnica da utilizzare come guida per la valutazione dell'esposizione occupazionale ai campi elettromagnetici a bordo del materiale rotabile dell'azienda. Il gruppo, tra il 2002 ed il 2005, ha redatto varie versioni di tale specifica: quella a cui faremo riferimento in questo lavoro è la versione 1.2 del maggio 2005, indicata ufficialmente dalla sigla TI.UTMR.CEM001.2 (Trenitalia, 2005). Sulla base di questa specifica, l'ufficio tecnico di Trenitalia ha eseguito una serie di misure di induzione magnetica a bassa frequenza (inferiore a 20 kHz) sul rotabile ALEX, rilevando in alcune situazioni il superamento dei livelli di riferimento previsti dalle linee guida ICNIRP del 1998 (ICNIRP, 1998). Conseguentemente l'azienda, da una parte ha considerato la possibilità di ridurre i livelli di campo mediante l'installazione di schermature (intervento, come si farà vedere, non privo di efficacia), dall'altra ha affidato all'IFAC l'incarico di indagare sull'eventuale rispetto delle restrizioni di base previste dalle medesime linee guida. Nel corso dello svolgimento di questo incarico le norme sono cambiate, rendendo così

necessario rielaborare i dati acquisiti: una prima volta, nel luglio 2008, con il rilascio definitivo dello standard CENELEC specifico per l'ambiente ferroviario (Cenelec, 2008) e successivamente, a fine 2010, con la pubblicazione delle nuove linee guida ICNIRP per le basse frequenze (ICNIRP, 2010).

MISURE

Come previsto dalla specifica TI.UTMR.CEM001.2, i dati rilevati dall'ufficio tecnico dell'azienda a bordo del rotabile ALEX consistono in sequenze di alcune decine di secondi di misure istantanee di induzione magnetica; ogni sequenza è relativa ad un diverso punto di misura. I rilevamenti sono stati effettuati con una sonda triassiale a induzione, dotata di uscite analogiche (ESM-100 3D H/E Fieldmeter, Maschek Elektronik, Germany), connessa ad un'appropriata catena di elaborazione del segnale. Il sistema consente di acquisire e memorizzare su supporto informatico le tre componenti cartesiane dell'induzione magnetica (separate ma esattamente sincrone), campionate con periodo di 25 μ s. In fase di elaborazione, ogni sequenza è stata poi suddivisa in segmenti contigui non sovrapposti di 0.5 s (cioè di 20000 campioni) ciascuno.

Le misure sono state ripetute sia in condizioni statiche (automotrice ferma), sia in condizioni dinamiche (automotrice in viaggio); la differenza tra le due situazioni è risultata sostanzialmente non significativa. Il sottoinsieme di dati messi a disposizione dell'IFAC si riferisce a due distinte campagne di misura, una ("campagna A" nel seguito) relativa ad un esemplare di ALEX non schermato in condizione statica ed una ("campagna B" nel seguito) relativa ad un diverso esemplare, schermato, in condizione dinamica. Di regola, le considerazioni svolte nel presente lavoro si riferiscono alle misure eseguite sul rotabile *non* schermato (cioè alla campagna A); tuttavia in un caso particolare verranno anche mostrati alcuni dati che forniscono un'indicazione sull'efficacia dell'intervento di schermatura.

In entrambe le campagne sono stati presi in considerazione gli stessi punti di misura: essi sono collocati sia nella cabina di guida ("CAB", 6 punti), sia nel vestibolo della carrozza-motrice ("CARVES", 3 punti), sia infine nel corridoio di servizio che collega la cabina al vestibolo stesso ("SERCOR", 9 punti). Complessivamente, si dispone quindi di rilevazioni riferite a 18 punti di misura, distribuiti su tre piani orizzontali allineati a quote differenti rispetto al pavimento del veicolo (0.1 m, 0.9 m e 1.5 m). In definitiva, si hanno 6 diverse posizioni di misura (2 CAB, 1 CARVES, 3 SERCOR), ognuna delle quali comprende tre punti a diverse quote. Le due posizioni CAB sono poste in corrispondenza del centro dei due sedili di guida; le tre posizioni SERCOR sono poste ai due estremi e al centro del corridoio di servizio, la posizione CARVES è posta approssimativamente al centro del vestibolo della carrozza-motrice. La Tabella 1 riepiloga denominazione e posizione dei punti di misura: in ciascuno di questi punti è stata eseguita una sequenza di misura di durata variabile. La durata complessiva di tutte le sequenze della campagna A è di 18'18" (comprendenti quindi 2196 segmenti di 0.5 s), mentre quella della campagna B è di 53'56" (6472 segmenti).

Tabella 1 – Denominazione e posizione dei punti di misura

Posizione		h = 0.1 m	h = 0.9 m	h = 1.5 m
CABINA	Posto guida di destra	CAB2	CAB5	CAB8
	Posto guida di sinistra	CAB20	CAB23	CAB26
VESTIBOLO	Centro	CARVES1	CARVES2	CARVES3
CORRIDOIO	Estremo lato cabina	SERCOR1	SERCOR2	SERCOR3
	Centro	SERCOR4	SERCOR5	SERCOR6
	Estremo lato vestibolo	SERCOR7	SERCOR8	SERCOR9

ANALISI SECONDO ICNIRP-1998

Le forme d'onda delle sequenze misurate mostrano un andamento complesso, in cui è talvolta riconoscibile una periodicità di base (con frequenza attorno ai 250 Hz), con sovrapposti fenomeni apparentemente indipendenti e spesso caotici. Queste sequenze sono state analizzate con una procedura nel dominio della frequenza riferita alle linee guida rilasciate dall'ICNIRP nel 1998 (ICNIRP,

1998). La procedura – che chiameremo “metodo standard” nel seguito – porta a definire un indice (per il quale useremo il simbolo I_{MS}) il cui valore deve essere inferiore a 1 perché vi sia conformità con le linee guida. Indicando con $B_{rms,i}$ il valore efficace del generico contributo spettrale del campo misurato, con f_i la sua frequenza e con $B_L(f_i)$ il livello di riferimento ICNIRP¹ alla stessa frequenza, l'indice in questione e la condizione di conformità sono espressi da:

$$I_{MS} = \sum_i \frac{B_{rms,i}}{B_L(f_i)} \leq 1 \quad (1)$$

dove la sommatoria è estesa a tutti i contributi spettrali presenti.

Anche se formalmente nella (1) compaiono i valori efficaci, non è difficile rendersi conto che il razionale alla base del *metodo standard* si fonda in ultima analisi sul sommare i valori di picco dei vari contributi spettrali (ognuno pesato in relazione al pertinente livello di riferimento ICNIRP), presupponendone implicitamente la simultaneità (Andreuccetti, 2010). Questa ipotesi, che ovviamente non si verifica se non in casi del tutto eccezionali, è alla base di quella che chiameremo la *ipercautelatività intrinseca del metodo standard*.

Il *metodo standard* sottoindende un approccio alla misura basato sull'uso di un analizzatore di spettro convenzionale. Questa tecnica, oltre a non fornire informazioni relativamente alle fasi dei contributi spettrali (che infatti non compaiono nell'eq.(1)), consente di fatto di effettuare una selezione – in definitiva, sulla base del buon senso – dei contributi da inserire nella sommatoria. Quando, come nel caso in esame, si lavora in automatico con tecniche numeriche su segnali campionati, allora alla ipercautelatività intrinseca del metodo si aggiunge un'ulteriore sopravvalutazione dell'indice dovuta all'algoritmo di calcolo impiegato. Infatti, l'analisi spettrale eseguita per mezzo della *trasformata di Fourier discreta* (DFT) porta, sia per il fenomeno noto come “spectral leakage”², sia per l'effetto del rumore, all'individuazione di un grande numero di contributi spettrali che, pesati ognuno in funzione della propria frequenza, vengono poi sommati come se fossero tutti in fase tra di loro.

CORREZIONE DELLO SPECTRAL LEAKAGE

Nella specifica Trenitalia TI.UTMR.CEM001.2 viene affrontato anche il problema della sopravvalutazione dovuta all'algoritmo computazionale, introducendo nel calcolo dell'indice I_{MS} una procedura per la correzione dello *spectral leakage*. Questa consiste in: 1) suddividere in segmenti contigui non sovrapposti di 0.5 s (contenenti ognuno 20000 campioni vettoriali) le sequenze temporali acquisite con le misure, 2) impiegare in ogni segmento la finestrazione detta “di Hann”, 3) eseguire la DFT su ciascun segmento così trattato ed infine 4) sottoporre lo spettro ottenuto al procedimento noto come “interpolazione spettrale” (Bellan, 2004); l'equazione (1) viene quindi applicata allo spettro interpolato. Una delle conseguenze di questa modalità di calcolo è il disallineamento dei contributi spettrali delle tre componenti del campo: alla fine, ci si ritrova cioè con contributi spettrali di eguale indice “*r*” che hanno, nelle tre componenti cartesiane, una frequenza diversa (in genere *leggermente* diversa). Per tenere conto di questo fenomeno, si è generalizzato l'equazione (1) come segue:

$$I_{MS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_i \sqrt{\frac{B_{x,i}^2}{B_L^2(f_{x,i})} + \frac{B_{y,i}^2}{B_L^2(f_{y,i})} + \frac{B_{z,i}^2}{B_L^2(f_{z,i})}} \leq 1 \quad (2)$$

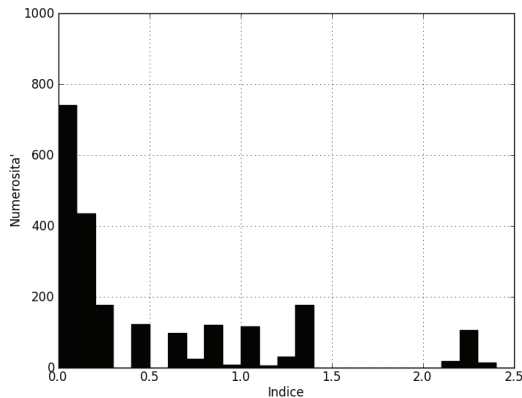
dove $B_{x,i}$, $B_{y,i}$ e $B_{z,i}$ sono adesso le ampiezze di picco dei contributi spettrali delle componenti cartesiane del campo e $f_{x,i}$, $f_{y,i}$ e $f_{z,i}$ le relative frequenze.

¹ In questo lavoro, quando si citano i limiti proposti dall'ICNIRP, si intende sempre fare riferimento ai valori applicabili alle esposizioni occupazionali.

² Lo *spectral leakage*, detto in modo molto sintetico, consiste nella moltiplicazione delle righe spettrali dovuta all'utilizzo, nella serie di Fourier, di una risoluzione spettrale che non sia un sottomultiplo intero di tutte le frequenze effettivamente contenute nel segnale analizzato.

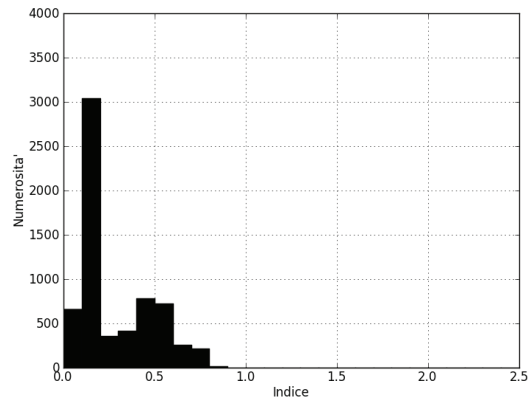
La correzione per lo *spectral leakage* risulta purtroppo solo parzialmente efficace, a causa della elevata complessità del segnale coinvolto e dell'impossibilità di intervenire sulla sopravvalutazione del rumore.

Figura 1



Applicazione del *metodo standard* con correzione per lo *spectral leakage*; livelli di riferimento ICNIRP 1998; campagna A.

Figura 2



Applicazione del *metodo standard* con correzione per lo *spectral leakage*; livelli di riferimento ICNIRP 1998; campagna B.

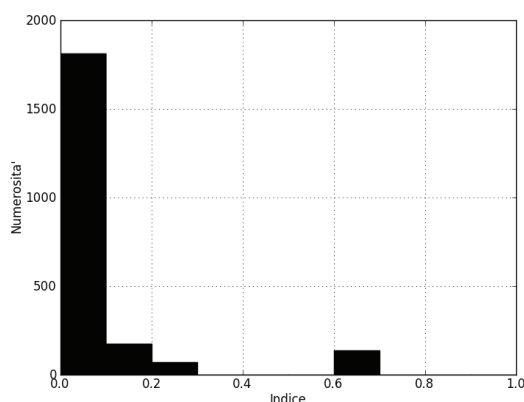
Il risultato dell'applicazione di questo algoritmo è illustrato in Figura 1, dove viene riportata la distribuzione della numerosità dei valori dell'indice I_{MS} ripartiti in classi con ampiezza pari a 0.1; l'indice è calcolato in tutti i 2196 segmenti di 0.5 s contenuti nelle misure della campagna A. Il valore massimo viene raggiunto nel punto SERCOR7 ed è pari a 2.4; complessivamente, 469 rilevazioni (21% circa) risultano maggiori dell'unità (e fanno parte delle sequenze relative ai punti SERCOR4, SERCOR7 e SERCOR8). Si consideri che, senza l'applicazione dell'algoritmo per la riduzione dello *spectral leakage*, il valore massimo (raggiunto ancora nel punto SERCOR7) sarebbe stato pari a 6.1 e che complessivamente 842 rilevazioni (38% circa) sarebbero risultate maggiori dell'unità (interessando, oltre ai precedenti, anche i punti SERCOR5, SERCOR6 e SERCOR9).

Per dare qualche elemento a proposito della schermatura, in Figura 2 è riportata la distribuzione analoga a quella di Figura 1, ma relativa alle misure della campagna B (6472 segmenti). Il massimo viene raggiunto di nuovo nel punto SERCOR7 ed ha un valore appena inferiore all'unità.

ANALISI SECONDO LA NORMA CENELEC EN 50500

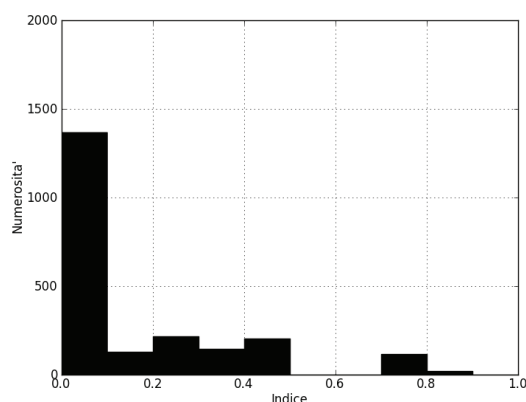
Nel luglio 2008 il Cenelec ha rilasciato in forma definitiva la norma EN 50500, riguardante l'esecuzione delle misure di campo magnetico finalizzate alla valutazione dell'esposizione umana a bordo di materiale rotabile ferroviario (Cenelec, 2008). In essa, da una parte vengono recepite molte delle impostazioni adottate nella specifica Trenitalia (come la suddivisione in segmenti di 0.5 s contigui non sovrapposti, la finestra di Hann, l'interpolazione spettrale), dall'altra viene introdotta una ulteriore condizione (si veda il paragrafo 5.3.2.1 della norma), consistente nell'omettere dalla sommatoria dell'equazione (2) tutti i contributi spettrali la cui ampiezza sia inferiore al 10% del livello di riferimento ICNIRP alla frequenza corrispondente. Questa condizione non viene in alcun modo giustificata formalmente: si può supporre che sia stata adottata per correggere in modo empirico i problemi di ipercautelatività intrinseca e di sopravvalutazione del rumore che affliggono il *metodo standard*. Essa porta, come è ovvio, ad un sostanziale abbattimento dei valori dell'indice; la relativa distribuzione per la campagna A (determinata come nel caso precedente) è riportata in Figura 3; il valore massimo raggiunto è pari a 0.65 (sempre nel punto SERCOR7).

Figura 3



Valutazione secondo CENELEC EN 50500; livelli di riferimento ICNIRP 1998; campagna A.

Figura 4



Applicazione del *metodo del picco ponderato*; livelli di riferimento ICNIRP 1998; campagna A.

ANALISI SECONDO IL METODO DEL PICCO PONDERATO

A partire dalla pubblicazione, nel marzo 2003, di uno *statement* sulle forme d'onda complesse (ICNIRP, 2003), l'ICNIRP sta promuovendo un approccio innovativo, il “metodo del picco ponderato”, per stabilire la conformità alle proprie linee guida dei campi con forma d'onda non sinusoidale. In base ad esso, i contributi spettrali del segnale misurato devono essere pesati tenendo conto anche dei termini di fase. Nei fatti, viene proposta l'adozione di un indice, per il quale utilizzeremo il simbolo I_{WP} (dall'inglese *weighted peak*), espresso – per la componente x del campo – da:

$$I_{WPx}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_i \frac{B_x(f_i)}{B_L(f_i)} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \varphi_i) \quad (3)$$

nell'equazione (3), $B_L(f_i)$ è il livello di riferimento ICNIRP alla frequenza f_i , $B_x(f_i)$ e θ_i sono l'ampiezza di picco e la fase della riga spettrale alla stessa frequenza, mentre φ_i è lo sfasamento introdotto alla frequenza f_i da una catena di filtri RC analogici del primo ordine, la cui ampiezza abbia una risposta in frequenza il più simile possibile all'inverso del termine $\sqrt{2}B_L(f_i)$; relazioni analoghe alla (3) valgono per le componenti y e z. L'indice I_{WP} complessivo (che deve essere inferiore all'unità perché vi sia conformità con le linee guida) viene determinato dalla somma RSS delle tre componenti (x,y,z).

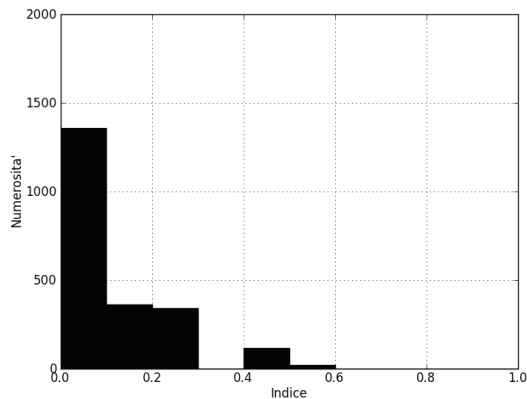
Dal punto di vista pratico, l'indice I_{WP} può essere determinato in tre modi: 1) in hardware, con una apposita catena di filtri RC analogici; 2) in software nel dominio della frequenza, applicando esattamente l'equazione (3); 3) in software, utilizzando tecniche consolidate di elaborazione numerica dei segnali, per realizzare dei filtri numerici in grado di simulare il comportamento dei filtri RC previsti dal metodo, operando sulle sequenze campionate nel dominio del tempo. Quest'ultimo è l'approccio utilizzato per questo lavoro. L'indice I_{WP} consente di risolvere in modo soddisfacente i problemi insiti nel *metodo standard*, perché tiene intrinsecamente conto delle fasi dei contributi spettrali e non è soggetto alle difficoltà introdotte dall'analisi spettrale. Nel caso in esame, la distribuzione dell'indice I_{WP} per la campagna A è riportata in Figura 4; per permettere un confronto omogeneo con gli altri metodi considerati, si è calcolato e memorizzato il valore massimo raggiunto dall'indice in ciascun segmento di 0.5 s in cui abbiamo suddiviso le sequenze misurate. Il valore massimo assoluto, pari a 0.82, viene raggiunto anche in questo caso nel punto SERCOR7.

LE NUOVE LINEE GUIDA ICNIRP-2010 PER LE BASSE FREQUENZE

Nel dicembre 2010, l'ICNIRP ha pubblicato una versione aggiornata delle proprie linee guida, limitatamente alla regione delle basse frequenze (ICNIRP, 2010). In essa vengono proposti nuovi valori limite in funzione della frequenza (che risultano maggiori o uguali a quelli del 1998) e vengono

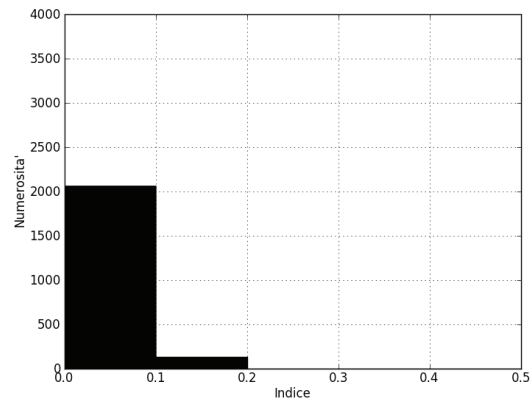
confermati sia il *metodo standard* (del quale però vengono chiaramente indicati i problemi), sia il *metodo del picco ponderato* come approcci da utilizzare per valutare le forme d'onda non sinusoidali.

Figura 5



Applicazione del *metodo standard* con correzione per lo *spectral leakage*; livelli di riferimento ICNIRP 2010; campagna A.

Figura 6



Applicazione del *metodo del picco ponderato*; livelli di riferimento ICNIRP 2010; campagna A.

È interessante quindi verificare come cambiano gli indici calcolati nei paragrafi precedenti, quando si prendono in considerazione i livelli di riferimento proposti dalle nuove linee guida. I risultati – in termini di distribuzione della numerosità dei valori dell'indice – sono riportati rispettivamente nella Figura 5 (relativa al *metodo standard* con correzione per lo *spectral leakage*) e nella Figura 6 (relativa al *metodo del picco ponderato*). Nel primo caso, il valore massimo dell'indice I_{MS} è pari a 0.51; senza la correzione per lo *spectral leakage*, esso sarebbe stato pari a 1.3, con 138 valori (6.3% circa) maggiori dell'unità; nel secondo caso, il massimo dell'indice I_{WP} è pari a 0.15; tutti i massimi e tutti i valori superiori ad 1 vengono raggiunti nel punto SERCOR7. La valutazione eseguita secondo le indicazioni dello standard CENELEC EN 50500 fornisce invece un valore nullo in tutti i segmenti di 0.5 s di entrambe le campagne di misura, perché le ampiezze di tutti i contributi spettrali risultano inferiori al 10% dei pertinenti livelli di riferimento.

CONCLUSIONI

È stata eseguita un'analisi approfondita di un caso di esposizione a bordo treno, in cui è coinvolto un intenso campo magnetico a bassa frequenza con forma d'onda complessa. Essa, oltre a fornire gli elementi per escludere la presenza di rischi per il personale viaggiante, ha consentito di sviluppare considerazioni interessanti in merito: agli approcci nel dominio della frequenza e nel dominio del tempo, ad alcune indicazioni operative contenute nello standard CENELEC specifico per l'ambiente ferroviario e al confronto tra le valutazioni riferite alle linee guida ICNIRP del 1998 e alle nuove linee guida del 2010.

Tabella 2 – Valori massimi dell'indice ICNIRP raggiunti nelle sequenze della campagna A, in funzione della metrica di valutazione e della linea guida applicata

	Linee guida ICNIRP 1998	Linee guida ICNIRP 2010
Metodo standard (1)	6.1	1.3
Metodo standard (2)	2.4	0.51
Norma CENELEC EN 50500	0.65	0
Metodo del picco ponderato	0.82	0.15

(1) senza correzione per lo *spectral leakage*; (2) con correzione per lo *spectral leakage*.

I risultati riepilogati in Tabella 2, ottenuti elaborando i dati acquisiti da Trenitalia secondo le varie linee guida e procedure tecniche considerate, consentono di sviluppare alcune osservazioni di carattere generale.

Il *metodo standard* può essere considerato utile per un approccio iniziale, specie se risulta di applicazione pratica più rapida, agevole ed economica degli altri metodi presentati. Il responso ottenuto, tuttavia, dovrebbe essere ritenuto valido solo se negativo (cioè con valori dell'indice I_{MS} inferiori all'unità).

In caso di indicazione di superamento dei limiti, infatti, sarebbe precipitoso ricorrere subito a valutazioni dosimetriche o imporre l'applicazione di metodi di riduzione dell'esposizione, perché entrambe le scelte potrebbero risultare molto onerose, mentre l'apparente superamento del limite potrebbe con grande probabilità essere dovuto alla metrica utilizzata o all'algoritmo di calcolo con cui essa viene applicata, invece che all'esistenza di una reale situazione di rischio. In questi casi, è opportuno quindi approfondire l'analisi del rispetto dei livelli di riferimento, utilizzando una metrica più ragionevole o un procedimento più appropriato. A questo proposito, le indicazioni suggerite dalla norma CENELEC presentano aspetti di arbitrarietà difficilmente giustificabili; questo è vero non solo per la norma specifica per l'ambiente ferroviario, ma anche per norme CENELEC relative ad altre situazioni. L'utilizzo del *metodo del picco ponderato* sembra invece avere tutti i requisiti per elaborare valutazioni attendibili e ragionevolmente fondate.

APPENDICE: ANALISI DOSIMETRICA

Con "analisi dosimetrica" si intende qui la verifica del rispetto delle restrizioni di base previste dalle linee guida ICNIRP; ad essa, secondo l'impostazione della stessa ICNIRP, è affidato il verdetto definitivo in caso di superamento dei livelli di riferimento. Nel caso in esame, l'analisi dosimetrica non sarebbe stata indispensabile poiché, come si è fatto vedere, i livelli di riferimento non risultano affatto superati, se la verifica viene eseguita in modo appropriato. L'approfondimento dosimetrico, pertanto, riveste interesse principalmente dal punto di vista scientifico. In questa sede è possibile solo riferire molto sinteticamente su questo aspetto. Come si vedrà, la dosimetria ha dato pieno riscontro alle valutazioni radiometriche, confermando la totale assenza di qualunque rischio per il personale operante a bordo dell'automotrice ALEX.

Il metodo di valutazione adottato è basato sull'impiego dell'applicativo sviluppato all'IFAC per la dosimetria numerica dei campi magnetici in condizioni quasi statiche (Zoppetti, 2009); l'applicativo utilizza il metodo SPFD (*scalar potential finite difference*) per la soluzione delle equazioni di accoppiamento tra campo magnetico e corpo umano e il modello parametrico (Gabriel, 1996) per l'assegnazione delle caratteristiche dielettriche ai tessuti. Il modello di organismo utilizzato è quello sviluppato in seno al *Visible Human Project* (USNLM, 1994); esso è stato idealmente collocato nel punto SERCOR7 della campagna A oppure nel punto SERCOR6 della campagna B, cioè nei punti dove sono stati rilevati i livelli più elevati degli indici radiometrici. Il modello è stato disposto in posizione eretta, orientato sia nel verso di marcia del treno, sia di profilo; nel seguito si riportano solo i risultati dell'orientazione in cui, caso per caso, sono stati rilevati i valori più elevati delle grandezze dosimetriche.

I risultati dell'analisi dosimetrica sono sintetizzati nella Tabella 3, dove vengono riportati i valori degli indici dosimetrici per vari gruppi di tessuti-bersaglio, relativi al rispetto delle linee guida ICNIRP del 1998 (che utilizzano la densità di corrente indotta nei tessuti del sistema nervoso centrale come grandezza dosimetrica) e del 2010 (nelle quali la grandezza dosimetrica è il campo elettrico interno); in quest'ultimo caso, i limiti applicati sono diversi per i tessuti del sistema nervoso centrale della testa e per i rimanenti tessuti della testa e del tronco.

I calcoli sono stati eseguiti in alcune modalità diverse, indicate con una lettera nell'intestazione della tabella, con riferimento alle descrizioni seguenti.

a) Esposizione a campo omogeneo di valore pari al massimo valore rilevato in SERCOR7; forma d'onda complessa valutata per mezzo del *metodo standard*, con correzione per lo *spectral leakage* e selezione dei contributi secondo il criterio del 10% previsto dalla norma CENELEC EN 50500.

b) Esposizione a campo omogeneo di valore pari al massimo valore rilevato in SERCOR6 o SERCOR7; forma d'onda complessa valutata per mezzo del *metodo del picco ponderato*, del quale è stata messa a punto una apposita estensione applicabile alla dosimetria numerica con metodo SPFD.

c) Esposizione a campo disomogeneo; forma d'onda complessa valutata per mezzo del *metodo del picco ponderato* esteso come detto sopra; la distribuzione di campo nello spazio è stata ricostruita a partire dalle misure disponibili per mezzo di una metodica originale, basata sull'utilizzo di un algoritmo genetico di ottimizzazione.

Tabella 3 – Sintesi dei risultati dell'analisi dosimetrica (vedi testo)

	Linee guida ICNIRP 1998			Linee guida ICNIRP 2010		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
Tessuti del sistema nervoso centrale	0.37	0.25	0.19			
Tessuti del sistema nervoso centrale della testa				0	0.06(*)	0.04
Qualunque altro tessuto della testa e del tronco esclusa la pelle secca				0	0.13(*)	

Nota (*): queste valutazioni si riferiscono al punto SERCOR6 della campagna B, tutte le altre al punto SERCOR7 della campagna A.

Come si vede chiaramente, l'analisi dosimetrica conferma in pieno la totale assenza di rischi per il personale a bordo dell'automotrice ALEX, sia che ci si riferisca alle linee guida ICNIRP del 1998 sia – tanto più – se si applicano le nuove linee guida ICNIRP del 2010.

Riconoscimenti

L'attività alla base del lavoro sopra descritto è stata svolta in collaborazione e con il parziale supporto finanziario di Trenitalia SpA, nell'ambito del Contratto tra IFAC e Trenitalia n.18455 del 20/12/2007.

Bibliografia

- Andreuccetti D., Priori S. e Zoppetti N. Esposizione della popolazione a sorgenti ELF con forma d'onda complessa: valutazione del campo magnetico e della densità di corrente indotta. IFAC-CNR Technical, Scientific and Research Reports, Vol.2, N.65-7 (2010), IFAC-TR-04-010, Firenze, aprile 2010.
- Bellan D., Gaggelli A., Maradei F., Mariscotti A. and Pignari S.A. Time-domain measurement and spectral analysis of nonstationary low-frequency magnetic-field emissions on board of rolling stock. IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.EMC-46, No.1, February 2004, pp.12-23.
- CENELEC. Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure. Cenelec European Standard EN 50500, July 2008.
- Gabriel S., Lau R.W. and Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Physics in Medicine & Biology, Vol.41 (1996), pp.2271-2293.
- ICNIRP. 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.
- ICNIRP. 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.
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics, Vol.99, N.6, December 2010, pp.818-836.
- Trenitalia. Caratterizzazione del livello di esposizione a campi magnetici a bordo di rotabili ferroviari (5 Hz–100 kHz). Specifica tecnica TI.UTMR.CEM001.2, Firenze, maggio 2005.
- USNLM. The Visible Human Project®. Internet resource at http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html, U.S. National Library of Medicine, 1994.
- Zoppetti N. and Andreuccetti D. Review of open problems in assessing compliance with 2004/40/EC Directive exposure limit values for low frequency current density by means of numerical techniques. Radiation Protection Dosimetry, Vol.137, N.3-4, December 2009, pp.247-251.