



**CARATTERIZZAZIONE DEL LIVELLO  
DI ESPOSIZIONE A CAMPI MAGNETICI  
A BORDO DI ROTABILI FERROVIARI  
(5 Hz÷10 kHz)**

**SPECIFICA TECNICA**

**TI.UTMR.CEM001.0**

**Documento composto da 32 fogli**

**FIRENZE, APRILE 2002**

La presente specifica è stata elaborata, redatta ed approvata dal seguente gruppo di lavoro:

**ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ**

**Laboratorio di Fisica**

Martino Grandolfo  
Paolo Vecchia

**ISTITUTO SUPERIORE PER LA PREVENZIONE E LA SICUREZZA DEL LAVORO**

**Dipartimento di Igiene del Lavoro**

Paolo Rossi

**POLITECNICO DI MILANO**

**Dipartimento di Elettrotecnica**

Diego Bellan  
Sergio Pignari

**RETE FERROVIARIA ITALIANA S.p.A.**

**Direzione Personale e Organizzazione – Direzione Sanità – Medicina del Lavoro**

Elio Munafò

**TRENITALIA S.p.A.**

Domenico Astarita	Direzione Sicurezza di Sistema
Paolo Betti	UTMR – Sicurezza di Sistema
Donato Carillo	UTMR – Direzione Tecnica - Sperimentazione
Alessio Gaggelli	UTMR – Direzione Tecnica - Sperimentazione

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA**

**Dipartimento di Ingegneria Elettrica**

Andrea Mariscotti  
Paolo Pozzobon

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II**

**Dipartimento di Ingegneria Elettrica**

Mauro D'Arco  
Claudio De Capua  
Giovanni Lupò  
Aldo Perfetto  
Meo Santolo

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "La Sapienza"**

**Dipartimento di Ingegneria Elettrica**

Marcello D'Amore  
Francescaromana Maradei

AVVISO: Questo documento è di proprietà di TRENITALIA S.p.A.; TRENITALIA S.p.A. ne autorizza la copia e la distribuzione solo ed esclusivamente in forma integrale citando la fonte.

## Indice

1. Introduzione .....	4
2. Generalità .....	6
2.1 Obiettivo delle misure .....	6
2.2 Applicazione della specifica .....	6
2.3 Personale addetto alle valutazioni .....	6
3. Modalità di prova .....	6
3.1 Aree e punti di misura.....	6
3.2 Condizioni del rotabile durante le misure .....	8
3.3 Piano di linea .....	9
4. Tecnica di misura.....	9
4.1 Grandezze misurate.....	9
4.2 Sistema di misura .....	11
4.3 Incertezza di misura .....	12
4.4 Esecuzione della misura .....	12
5. Metodologia di analisi .....	13
5.1 Condizioni di campionamento.....	13
5.2 Trasformazione dal dominio del tempo al dominio della frequenza .....	13
5.3 Non stazionarietà e scelta ottimale della finestra temporale di trasformazione .....	14
5.4 Correzione della frequenza e dell'ampiezza delle righe spettrali .....	14
5.5 Indice di conformità alle linee guida ICNIRP .....	15
6. Presentazione dei risultati .....	17
Appendice A – Finestra di Hanning .....	22
Appendice B – Scelta della finestra di stazionarietà .....	23
Appendice C – Correzione degli spettri .....	29
Elenco dei simboli .....	30
Bibliografia.....	31

## **1. Introduzione**

Negli ultimi anni si è svolto a livello scientifico e, in misura sempre maggiore anche a livello di opinione pubblica, un ampio dibattito sui possibili effetti sanitari dell'esposizione a campi elettromagnetici non ionizzanti. Si è quindi sviluppata, sia in sede nazionale che internazionale, una intensa attività di ricerca volta alla valutazione del rischio associato all'esposizione a tale tipo di radiazione. Parallelamente si è avviata, da parte di varie istituzioni internazionali, l'emanazione di raccomandazioni circa i limiti di esposizione validi per i lavoratori e per la popolazione nell'intervallo di frequenze comprese fra 0÷300 GHz.

Attorno alle normative internazionali si è creato un vasto consenso ed attualmente già più di una ventina di Paesi hanno adottato a livello nazionale, come leggi o regolamenti, le raccomandazioni più rappresentative da questo punto di vista, cioè quelle pubblicate dalla Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP) [1, 2].

Dal canto suo, anche il Consiglio dell'Unione europea ha emanato nel 1999 (Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee, 30 luglio 1999, pp. L199/59-L199/70) una Raccomandazione (1999/519/CE del 12 luglio 1999) agli stati membri che ha fatto proprie le indicazioni fornite dall'ICNIRP per la protezione della popolazione.

La legislazione nazionale del settore attualmente comprende: 1) la Legge quadro 36/01; 2) il Decreto 10 settembre 1998, n. 381, che fissa i valori limite di esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici connessi al funzionamento ed all'esercizio dei sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi (100 kHz÷300 GHz) e 3) il DPCM 24 aprile 1992, che stabilisce limiti di esposizione per la popolazione ai campi elettrici e magnetici a 50 Hz, prodotti dalle linee ad alta tensione, identici a quelli attualmente previsti dall'ICNIRP.

E' noto che la legge quadro prevede l'emanazione di decreti attuativi ma, allo stato attuale, non è in vigore in Italia nessuno strumento normativo che riguardi direttamente lavoratori e popolazione in ambito ferroviario.

In questo contesto e nella scia delle attività da tempo intraprese nei riguardi delle esposizioni ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici presenti in ambito ferroviario, Trenitalia S.p.A., in collaborazione con gli istituti indicati a pagina 2 del presente documento, ha predisposto questa nota tecnica, il cui obiettivo primario è la definizione di una specifica, per frequenze comprese fra 5 Hz e 10 kHz, per la valutazione dei livelli di esposizione a campo elettrico e magnetico che, caratterizzati da forme d'onda estremamente complesse, sono presenti a bordo dei suoi rotabili, anche ai fini della valutazione del rischio previsto dall'art. 4 del Decreto Legislativo 626/94 e successive modifiche ed integrazioni.

Questa specifica è caratterizzata, in linea di principio, da una completa generalità perché tutti gli algoritmi sviluppati per l'analisi dei segnali complessi si applicano, indifferentemente, sia alla componente elettrica del segnale che a quella magnetica. Poiché le impegnative attività di sorveglianza fisica sono, ovviamente, condizionate da esigenze di tipo logistico e devono necessariamente svilupparsi nel tempo, sono state inizialmente indirizzate alla valutazione della componente magnetica. Questa scelta si è basata sulle due seguenti considerazioni: 1) tutte le indagini epidemiologiche pubblicate negli ultimi anni e relative, nella gamma di frequenze di interesse di questa specifica, a possibili effetti a lungo termine delle esposizioni puntano ad indicare nella componente magnetica il possibile fattore causale e 2) in linea di principio ci si può attendere che sia la componente magnetica ad essere dominante nelle forme d'onda presenti sui rotabili, anche se questa ipotesi necessita di una conferma sperimentale che si otterrà solo attraverso una specifica campagna di misura dei livelli di campo elettrico.

Sulla base delle precedenti considerazioni, la specifica verrà applicata nel seguito, esclusivamente a titolo esplicativo, ad un caso specifico, quello dei livelli di campo magnetico presenti nei treni ad alta frequentazione (TAF); per verificarne l'accettabilità si farà poi riferimento alle già menzionate linee guida internazionali dell'ICNIRP, le uniche che oggi presentino limiti di esposizione su tutta la gamma di frequenze che caratterizza l'ambiente elettromagnetico del materiale rotabile.

Per esposizioni a campi magnetici caratterizzati da frequenze inferiori a 100 kHz, nel cui ambito ricade questa specifica tecnica, il parametro utilizzato dall'ICNIRP per la definizione dei livelli di riferimento a protezione da effetti di induzione di correnti nei tessuti elettricamente stimolabili è la grandezza derivata induzione magnetica,  $B$ .

Per esposizioni a campi pulsati o transitori l'ICNIRP ritiene che siano valide le stesse limitazioni previste nel caso di campi sinusoidali.

I modelli utilizzati in elettrofisiologia [3] e le osservazioni sperimentali suggeriscono però di considerare che, al di sotto dei 100 kHz, quando i valori istantanei di picco della densità di corrente e dell'induzione magnetica diventano maggiori dei valori di soglia, la stimolazione dei nervi e delle cellule muscolari si svolge entro frazioni del millisecondo. Conseguenza diretta di questa osservazione è quindi che, per queste frequenze, è il livello di picco la grandezza su cui far agire le limitazioni raccomandate dall'ICNIRP, non esistendo le basi per l'applicazione di medie temporali delle esposizioni.

I limiti raccomandati dall'ICNIRP sono legati a considerazioni svolte sugli effetti dell'esposizione a campi sinusoidali armonici. Tutti i dati sperimentali ottenuti nelle diverse campagne di misura hanno tuttavia confermato che, in ambito ferroviario, gli andamenti nel tempo dei livelli di esposizione sono ben lontani dall'essere descrivibili in termini di onde sinusoidali a frequenza ed ampiezza costanti, essendo generalmente caratterizzati da forme d'onda molto più complesse. La famiglia di forme d'onda complesse che ci si trova infatti a gestire è quella che presenta numerosi segnali sinusoidali in cui le frequenze non risultano multiple di una frequenza fondamentale, o le fasi delle componenti armoniche variano nel tempo in maniera casuale. In questo caso può presentarsi, nel dominio del tempo, un picco prominente prodotto dalla somma di ampiezze di picchi che casualmente vengono a trovarsi contemporaneamente presenti in quell'istante.

Quando forme d'onda di campi magnetici pulsati o transitori di questo tipo sono visualizzate e memorizzate da oscillografi digitali cui sono stati collegati i sensori, o inviate a PC attraverso veloci convertitori analogico-digitali, la valutazione dell'aderenza o meno a quanto richiesto dalle linee guida richiede il confronto di un impulso a largo spettro con limiti di esposizione che dipendono dalla frequenza [4]: è in larga parte alla soluzione di questo problema che si rivolge questa specifica tecnica.

Nel caso degli andamenti registrati, la valutazione del rispetto dei livelli di riferimento contenuti nelle linee guida ICNIRP può essere effettuata direttamente utilizzando la regola di somma prevista nel caso di campi aventi componenti a diverse frequenze.

In termini operativi, i valori misurati nel tempo nelle varie condizioni sperimentali sono convertiti, attraverso l'applicazione degli opportuni modelli matematici che verranno successivamente descritti, in un segnale in cui è possibile individuare i valori di picco che caratterizzano, in relazione alle diverse frequenze e fasi, le componenti sinusoidali estraibili dalla forma d'onda complessa misurata.

Affinché si possa affermare che i livelli di esposizione misurati rispettano le linee guida dell'ICNIRP, è necessario che la somma dei rapporti fra le intensità di picco misurate in corrispondenza delle varie componenti spettrali ed i livelli di riferimento raccomandati a quelle stesse frequenze sia sempre non superiore a 1. Il superamento di questo valore indica, invece, l'esigenza di svolgere indagini più approfondite e, quando necessario, adottare opportune azioni per ridurre i livelli di esposizione.

La presente specifica tecnica sostituisce la precedente norma sperimentale congiunta Ferrovie dello Stato-Istituto Superiore di Sanità, del 3 marzo 1999, per la misura dei livelli di campo magnetico in ambito ferroviario [5].

## 2. Generalità

### 2.1 Obiettivo delle misure

Lo scopo dei rilievi è la determinazione dei livelli di esposizione al campo magnetico in ambienti interni a rotabili ferroviari, per l'intervallo di frequenza trattato nella presente specifica.

### 2.2 Applicazione della specifica

Il presente documento definisce le modalità di misura, di analisi e di presentazione dei risultati relativi a rilievi di campo magnetico/induzione magnetica condotti all'interno di mezzi ferroviari nel campo di frequenza 5 Hz÷10 kHz, nonché per qualsiasi intervallo di frequenza in esso compreso.

All'interno di tutte le aree ad accesso promiscuo viaggiatori/personale dipendente sono adottati i livelli per l'esposizione della popolazione [1]. A scopo cautelativo sono adottati gli stessi limiti anche per gli ambienti di esclusivo accesso agli operatori, con l'osservazione che l'ICNIRP indica limiti specifici per i lavoratori [1], che rimangono un riferimento cui si ritiene possibile ricorrere in particolari casi adottando specifiche cautele.

### 2.3 Personale addetto alle valutazioni

La progettazione del sistema di misura, lo svolgimento ed il coordinamento dei rilievi, nonché le successive analisi dei risultati e stesura dei rapporti di prova devono essere condotti da personale adeguatamente preparato, con strumentazione e procedure *software* di elaborazione correttamente validate.

## 3. Modalità di prova

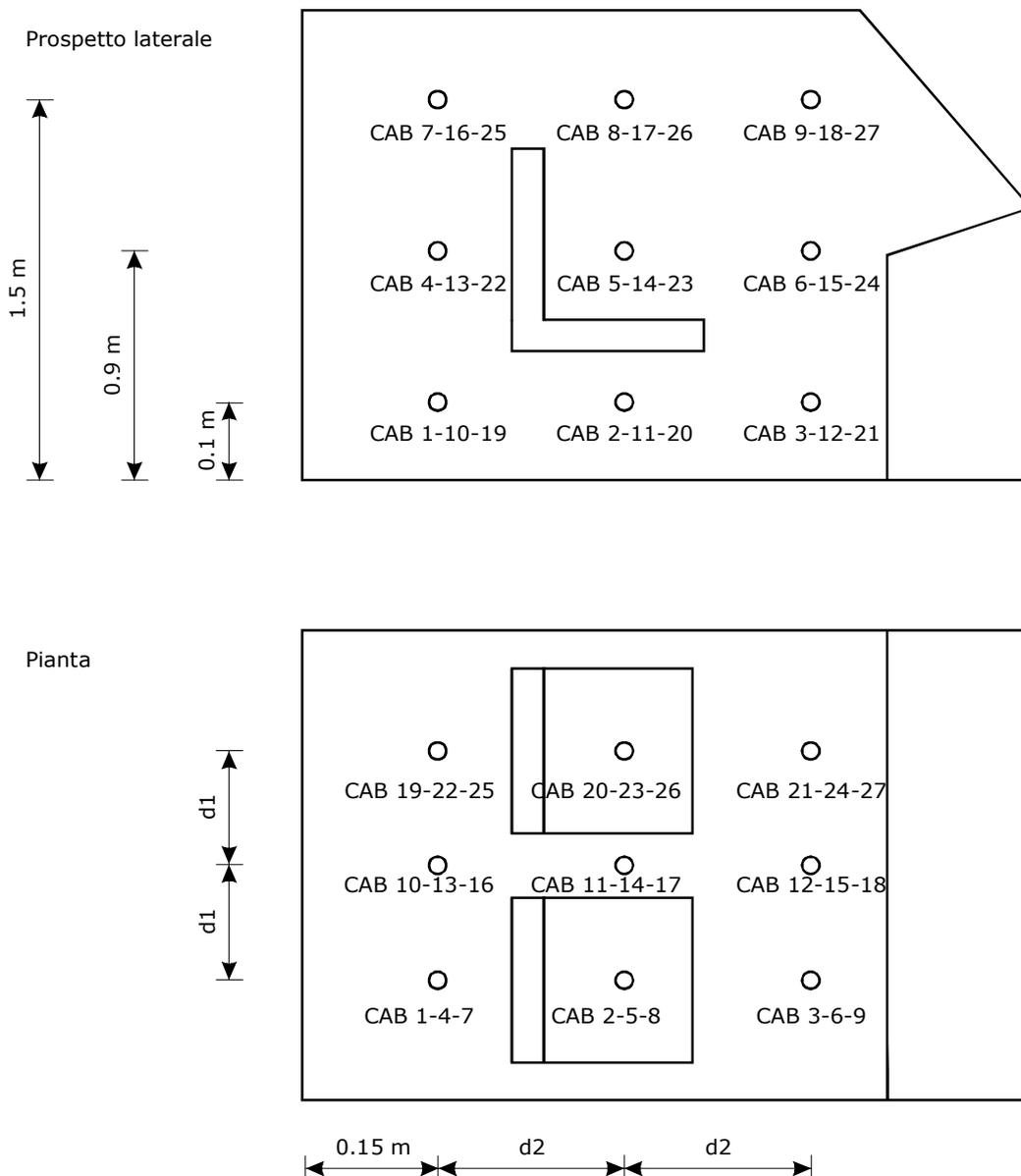
In questa sezione vengono definiti i punti di misura in aree stabilite e la procedura per la loro determinazione in zone particolari del rotabile. Inoltre sono definite le condizioni del rotabile durante la misura dell'induzione magnetica.

### 3.1 Aree e punti di misura

Per ogni zona riportata di seguito vengono specificati i punti di misura:

#### Cabina di guida

Si individuano 27 punti di misura disposti come riportato in Fig. 3.1. La denominazione dei 27 punti è la seguente: **CAB n** dove  $n = 1,2,3,\dots,27$ . Nonostante la distribuzione dei punti all'interno della cabina di guida sia vincolata alle dimensioni ed alla geometria della cabina stessa, occorre che i punti CAB 2, CAB 5, CAB 8 e CAB 20, CAB 23, CAB 26 siano centrati rispettivamente sul sedile destro e sinistro (rispetto al banco di guida).



**Figura 3.1** Disposizione e denominazione dei punti di misura all'interno della cabina di guida: rappresentazione del prospetto laterale e della pianta.

### Carrozze passeggeri

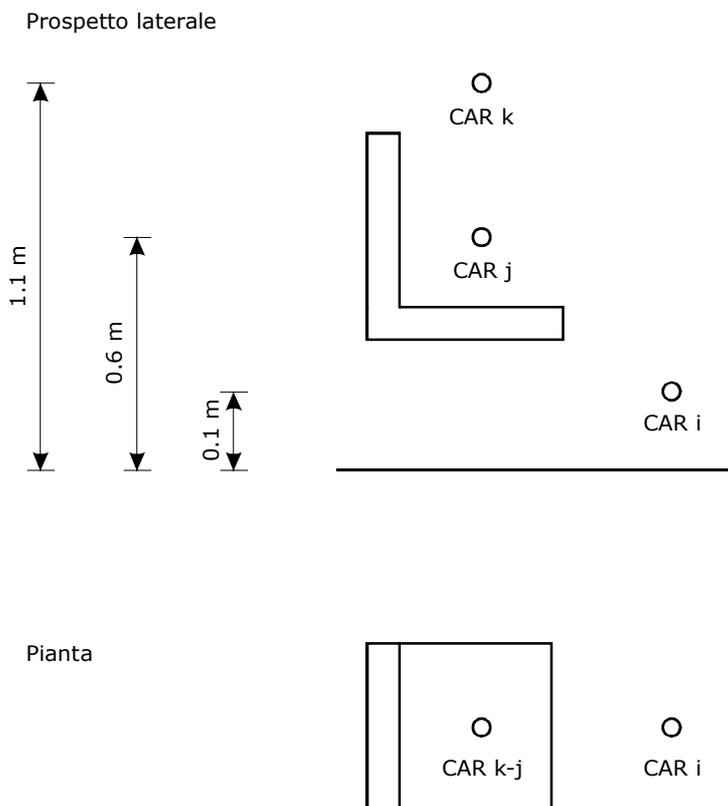
In queste zone non è possibile stabilire a priori un numero definito di punti, poiché tali locali assumono conformazioni differenti da rotabile a rotabile; inoltre, data la numerosità dei posti passeggero non è praticabile effettuare misure per ogni posto nei punti di testa, bacino e piedi.

Occorre pertanto individuare, a partire dallo schema costruttivo del rotabile in esame, le eventuali sorgenti di induzione magnetica (convertitori, cavi, altre apparecchiature elettriche, ecc). Per i posti passeggero in prossimità di tali sorgenti si determinano i 3 punti di misura: piedi, bacino e testa come definito in Fig. 3.2.

Nel caso in cui la sorgente sia in corrispondenza di un vestibolo o di un corridoio, non avendo riferimenti anatomici fissi, si determinano 3 punti geometrici di misura, disposti su una linea verticale a 0.1 m, 0.9 m e 1.5 m dal pavimento, per ogni 1.5 m<sup>2</sup> di superficie calpestabile

del corridoio o vestibolo. Le colonne dovranno essere distribuite uniformemente sull'area di misura.

La denominazione dei punti in queste aree è la seguente: **CAR XXX n** dove XXX=(COR per corridoi, VES per vestiboli) e n=1,2,3,... I punti così definiti devono essere indicati in modo univoco attraverso uno o più schemi della carrozza.



**Figura 3.2** Disposizione e denominazione dei punti di misura per un sedile di una carrozza passeggeri: rappresentazione del prospetto laterale e della pianta.

### **Ambienti di servizio**

Queste zone si trattano come i vestiboli o i corridoi descritti al punto precedente, fatta eccezione per la denominazione, che si esprime come **SER XXX n** dove XXX=(COR per corridoi, VES per vestiboli) e n=1,2,3,...

## **3.2 Condizioni del rotabile durante le misure**

Di seguito sono specificati gli stati del rotabile durante le misure dell'induzione magnetica:

### **Condizione statica (S)**

Il rotabile è in condizione di stazionamento. I circuiti di trazione sono attivi; inoltre, devono essere attive tutte le apparecchiature pertinenti all'area dove si eseguono misure (impianto di climatizzazione, luci, scaldavetro, gruppi statici, ecc).

### **Condizione dinamica (D)**

Il rotabile è in moto lungo la tratta di prova. I circuiti di trazione sono attivi con una efficienza di trazione pari al 100%, inoltre devono essere attive tutte le apparecchiature pertinenti all'area dove si eseguono misure (impianto di climatizzazione, luci, scaldavetro, gruppi statici, ecc).

Le misure dell'induzione magnetica dovranno essere eseguite nelle due condizioni di prova: dinamica (D) e statica (S).

## **3.3 Piano di linea**

Eventuali sorgenti di induzione magnetica esterne al rotabile possono influenzare le misure effettuate a bordo. Al fine di poter correlare particolari valori di induzione magnetica è necessario, preventivamente e durante le misure, indicare la posizione di eventuali sorgenti esterne e/o strutture perturbanti (elettrorodotti, sottostazioni, grandi strutture metalliche, incrocio treni, ecc) su una planimetria della linea percorsa.

## **4. Tecnica di misura**

In questa sezione vengono definiti i segnali, la catena di misura e la metodologia per l'esecuzione della misura.

### **4.1 Grandezze misurate**

Per ogni misura del campo di induzione magnetica devono essere acquisiti i seguenti dati:

#### **Vettore induzione magnetica**

Componente lungo l'asse  $x$

Componente lungo l'asse  $y$

Componente lungo l'asse  $z$

La disposizione degli assi  $x$ ,  $y$  e  $z$  è riportata in Fig. 4.1.

#### **Stato del rotabile**

Intensità della corrente assorbita

Tensione di linea

Riferimento di posizione

Velocità del rotabile

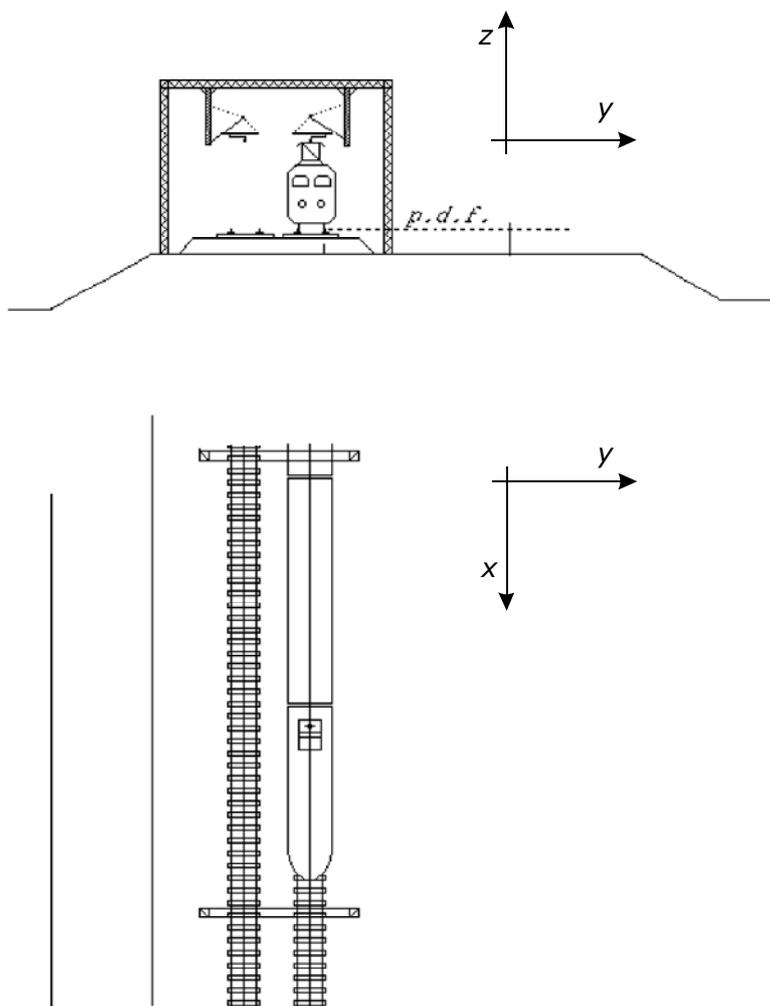
Riferimento temporale

Altri dati opzionali

Le grandezze sopra elencate e la simbologia utilizzata durante la registrazione dei segnali è riportata in Tab. 4.1.

**Tabella 4.1** Grandezze misurate e loro simbologia.

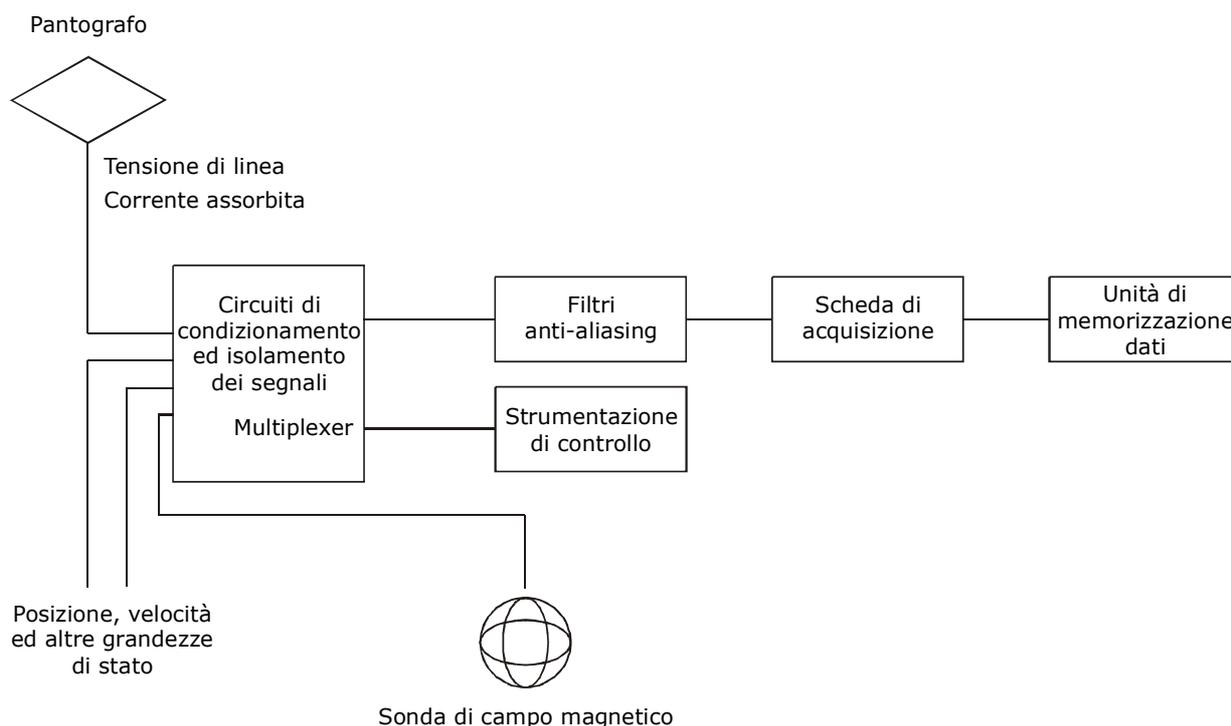
Grandezza	Denominazione
Componente del vettore induzione magnetica lungo l'asse $x$	$B_x$
Componente del vettore induzione magnetica lungo l'asse $y$	$B_y$
Componente del vettore induzione magnetica lungo l'asse $z$	$B_z$
Intensità di corrente assorbita	$I_{linea}$
Tensione di linea	$V_{linea}$
Riferimento di posizione in linea	$P_k$
Velocità del rotabile	$Vel$
Riferimento temporale	Tempo
Altri	



**Figura 4.1** Disposizione del sistema di riferimento cartesiano levogiro per le componenti dell'induzione magnetica: asse  $x$  parallelo alla linea ferroviaria e orientato secondo il senso di marcia del convoglio, asse  $z$  normale al piano del ferro (p.d.f.) e diretto verso l'alto.

## 4.2 Sistema di misura

Tutti i sensori impiegati, sia per la misura dell'induzione magnetica sia delle variabili di stato, devono garantire la necessaria accuratezza nella conversione delle grandezze fisiche originarie in segnali elettrici. Contemporaneamente il sistema di acquisizione deve essere capace di acquisire e memorizzare i segnali indicati in funzione del tempo, in modo che gli stessi possano essere ricostruiti correttamente nell'intervallo di frequenza considerato. Lo schema della catena di misura è riportato in Fig. 4.2.



**Figura 4.2** Schema della catena di misura. Sono riportati i blocchi principali per la misura dell'induzione magnetica e delle grandezze di stato del treno.

I singoli componenti costituenti la catena di misura oltre ad essere sottoposti regolarmente a calibrazione periodica, secondo le norme di buona tecnica, devono rispettare i seguenti requisiti minimi:

### Sensore di induzione magnetica

Caratteristiche radiative	sonda isotropica triassiale (isotropia entro $\pm 1$ dB).
Caratteristiche geometriche	senore con dimensioni contenute all'interno di un cubo di 10 cm di lato.
Comportamento in frequenza	fluttuazioni della risposta entro $\pm 0.5$ dB nell'intervallo d'impiego.
Uscite	analogiche, distinte per ogni asse e relative al vettore induzione magnetica.

### **Sistema di condizionamento del segnale e filtraggio**

Filtraggio passa basso, con caratteristiche e frequenza di taglio da determinare in accordo alla frequenza di campionamento, realizzato attraverso filtri con le seguenti caratteristiche

Ondulazione in banda passante < 0.5 dB  
Roll-off > 120 dB/oct

### **Sistema di acquisizione**

Il sistema di conversione analogico-digitale deve avere la capacità di acquisire tutti i canali in modo sincrono e con dinamica del singolo canale superiore a 90 dB.

### **Sistema di memorizzazione**

La gestione deve essere affidata ad un calcolatore con prestazioni e capacità di memorizzazione adeguata al flusso di dati prodotto dal sistema di acquisizione, dipendente dalla banda di frequenza esplorata e dal numero dei canali relativi alle variabili di stato considerate.

### **Operazioni preliminari alla misura**

Il corretto funzionamento dell'intera catena di misura deve essere verificato, nell'intera banda di frequenza di impiego, prima di iniziare la campagna di prova e periodicamente durante il suo svolgimento. Tale verifica viene realizzata attraverso l'impiego di una sorgente nota di campo magnetico, con determinate caratteristiche di stabilità ed accuratezza. Eventuali deviazioni della risposta dell'intero sistema possono essere compensate, se possibile, via *software* durante la fase di acquisizione e/o di elaborazione dei dati. Detta operazione dovrà essere presa in considerazione soltanto dopo aver accertato che non vi siano malfunzionamenti nei singoli componenti.

## **4.3 Incertezza di misura**

Per quel che riguarda la valutazione dell'incertezza di misura si applicano le considerazioni espresse nella norma CEI 211-6 "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana" [6].

## **4.4 Esecuzione della misura**

Per ogni punto di ciascuna area di misura si effettua un'acquisizione dei segnali nelle seguenti modalità:

### **Misura in condizione statica (S)**

Registrazione dei segnali per una durata di 30÷60 s.

### **Misura in condizione dinamica (D)**

Registrazione dei segnali per un tempo necessario affinché il rotabile effettui una corsa, sulla specifica tratta di prova, con la seguente dinamica di marcia: partenza da fermo con marcia manuale, massima corrente impostata e massima accelerazione fino al raggiungimento della velocità massima del mezzo; *coasting* della durata di almeno 10 s; frenatura elettrica (se disponibile) e pneumatica sino al completo arresto del rotabile in prova.

## 5. Metodologia di analisi

In questa sezione viene descritta la procedura di analisi spettrale da applicare alle serie temporali dell'induzione magnetica, ottenute mediante rilievi sperimentali come precedentemente descritto.

### 5.1 Condizioni di campionamento

Si indichi il valore istantaneo dell'induzione magnetica con

$$\vec{b}(t) = b_x(t)\hat{x} + b_y(t)\hat{y} + b_z(t)\hat{z}, \quad (5.1)$$

dove  $b_x$ ,  $b_y$ ,  $b_z$  sono le componenti del vettore  $\vec{b}$  lungo le direzioni individuate dai versori  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$  e  $t$  indica il tempo.

Indicando con  $\Delta t$  l'intervallo di campionamento (ovvero, con  $f_c = 1/\Delta t$  la frequenza di campionamento) adottato nei rilievi sperimentali si passa dal segnale tempo-continuo della (5.1) alla corrispondente versione tempo-discreta

$$\vec{b}[n\Delta t] = b_x[n\Delta t]\hat{x} + b_y[n\Delta t]\hat{y} + b_z[n\Delta t]\hat{z}, \quad n = 0, 1, \dots, N_c - 1, \quad (5.2)$$

dove  $N_c$  indica il numero complessivo di campioni acquisiti durante la misura. I tre segnali tempo-discreti  $b_x[n\Delta t]$ ,  $b_y[n\Delta t]$ ,  $b_z[n\Delta t]$  costituiscono il punto di partenza per la procedura di analisi spettrale. Nel seguito il simbolo  $s[n\Delta t]$  verrà utilizzato per indicare una qualsiasi delle componenti del vettore induzione  $\vec{b}[n\Delta t]$ , là dove non sia necessario fare distinzioni.

### 5.2 Trasformazione dal dominio del tempo al dominio della frequenza

La valutazione delle componenti spettrali del segnale  $s[n\Delta t]$ ,  $n = 0, 1, \dots, N_c - 1$  viene effettuata mediante l'applicazione della trasformata di Fourier a sotto-sequenze contigue del segnale  $s$ , costituite da  $N_w$  campioni ciascuna. Questa operazione viene eseguita per via numerica per mezzo dell'algoritmo noto come *Fast Fourier Transform* (FFT) [7].

Si assume che il segnale in analisi ammetta il seguente modello:

$$s(t) = \sum_{k=1}^M A_k(t) \sin[2k\pi f_0(t)t + \varphi_k] + n(t), \quad (5.3)$$

dove  $n(t)$  è rumore additivo la cui potenza di rumore risulta essere sostanzialmente inferiore a quella associata alle componenti sinusoidali. Per questa ragione, nelle considerazioni che seguono il termine di rumore verrà trascurato. Considerazioni specifiche su questo punto sono riportate in [8], [9].

Le fluttuazioni nel tempo dell'ampiezza  $A_k$  e della frequenza  $f_k = kf_0$  delle varie componenti sinusoidali determinano la scala di stazionarietà del segnale. La scelta della

lunghezza delle sotto-sequenze ( $N_w$ ) è ottimale se e solo se: a)  $N_w$  è sufficientemente piccolo da non includere variazioni temporali significative di  $A_k$  e  $f_k$  in ogni sotto-sequenza; b)  $N_w$  è sufficientemente grande da permettere una consistente stima spettrale delle componenti a frequenza più bassa.

Tuttavia, quale che sia la scelta di  $N_w$ , il campionamento del segnale risulta non sincrono e una tecnica di finestatura risulta necessaria per attenuare il fenomeno di *long-range spectral leakage* [10]. Esistono finestre di vario tipo; quella adottata in questa specifica è stata la finestra di Hanning, la cui descrizione è riportata in Appendice A.

### **5.3 Non stazionarietà e scelta ottimale della finestra temporale di trasformazione**

L'intervallo di stazionarietà del segnale è definito come quell'intervallo di tempo all'interno del quale le proprietà statistiche del segnale  $s(t)$  si conservano costanti.

A rigore, l'ampiezza delle finestre di stazionarietà  $T_w$  su cui eseguire la FFT non è costante su tutta la durata della registrazione del segnale  $s(t)$ , ma dipende dalle proprietà di correlazione puntuali delle diverse sorgenti di campo che contribuiscono al segnale  $s(t)$ .

Diverse indagini sono state condotte per individuare la procedura più adatta per la caratterizzazione spettrale dell'induzione magnetica [11, 12, 13, 14]. Sono state individuate due procedure:

- a) procedura in cui le stime spettrali sono ottenute adottando sotto-sequenze contigue di lunghezza temporale  $T_w = 0.25s$  per tutta la durata della registrazione sottoposta ad analisi [11, 12];
- b) procedura adattativa in cui le stime spettrali sono ottenute adottando sotto-sequenze parzialmente sovrapposte, di lunghezza temporale  $T_w$  variabile a seconda della posizione temporale all'interno della registrazione [13, 14].

Sulla base di un principio di maggior cautela, i cui dettagli sono evidenziati in Appendice B, si è ritenuto ragionevole valutare le stime spettrali adottando sotto-sequenze contigue di lunghezza temporale  $T_w = 0.25s$  per tutta la durata della registrazione sottoposta ad analisi [13, 14]. Infatti, la procedura scelta produce una sovrastima media del profilo dell'indice ICNIRP di circa il 25% rispetto a quello ottenuto con la procedura adattativa [11, 12] ed è quindi sicuramente cautelativa per la verifica del rispetto dei limiti. Inoltre, come mostrato in Appendice B, l'errore quadratico medio fra gli andamenti nel tempo dell'indice ICNIRP ottenuti con le due procedure è trascurabile. Infine, la procedura adottata è meno onerosa dal punto di vista computazionale rispetto alla procedura adattativa.

### **5.4 Correzione della frequenza e dell'ampiezza delle righe spettrali**

Le stime spettrali ottenute mediante FFT richiedono un'ulteriore elaborazione, mirata a rimuovere gli effetti associati al fenomeno di *short-range spectral leakage*. Tale fenomeno causa errori di stima delle frequenze  $f_k$  e delle ampiezze  $A_k$  delle componenti del segnale in esame [15, 16]. In particolare, esso è causa di sotto-stima dei coefficienti di ampiezza. Le relazioni indicate per la correzione degli spettri sono riportate in Appendice C.

## 5.5 Indice di conformità alle linee guida ICNIRP

Le stime spettrali ottenute secondo la procedura descritta nei paragrafi precedenti possono essere utilizzate per definire stimatori di condizioni di conformità alle linee guida ICNIRP [1]. In particolare, facendo riferimento a questa normativa, nel caso di campi armonici con più componenti sinusoidali occorre valutare la grandezza:

$$I_B^{(ICNIRP)} = \sum_{i=1}^{M_1} \frac{B_i}{B_{L,i}} + \sum_{j=1}^{M_2} \frac{B_j}{B_0} \quad (5.4)$$

dove  $B_i$ ,  $B_j$  indicano i valori efficaci delle componenti armoniche del modulo del vettore induzione magnetica. In (5.4), il pedice  $i$  riguarda  $M_1$  componenti armoniche con frequenza nell'intervallo (1 Hz, 65 kHz) e i termini  $B_{L,i}$  costituiscono i valori di riferimento ad esse associati; l'indice  $j$  riguarda  $M_2$  componenti armoniche con frequenza nell'intervallo (65 kHz, 10 MHz) e il termine  $B_0$  è il valore di riferimento ad esse associato (si vedano a questo proposito le Tab. 6 e 7 e la formula (8) di [1]).

L'indice  $I_B^{(ICNIRP)}$  deve risultare minore o uguale a 1 per avere condizioni di conformità alle linee guida ICNIRP [1].

Per un segnale costituito da una somma finita di sinusoidi, variabili in ampiezza e in frequenza, l'indice di conformità alle linee guida ICNIRP [1] viene definito nel modo seguente:

$$\hat{I}_B^{(n)} = \sum_{i=1}^{M_1} \frac{B_i^{(n)}}{B_{L,i}} + \sum_{j=1}^{M_2} \frac{B_j^{(n)}}{B_0}, \quad n = 1, 2, \dots, N_s, \quad (5.5)$$

dove  $n$  è l'indice relativo alla sotto-sequenza utilizzata per la stima spettrale,  $N_s$  indica il numero complessivo delle sotto-sequenze e

$$B_k^{(n)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{B_{xk}^{(n)2} + B_{yk}^{(n)2} + B_{zk}^{(n)2}} \quad k = i, j \quad (5.6)$$

rappresenta il valore efficace della  $k$ -esima componente spettrale dell'induzione magnetica e  $B_{xk}^{(n)}$ ,  $B_{yk}^{(n)}$ ,  $B_{zk}^{(n)}$  rappresentano i relativi valori di picco associati alle tre componenti spaziali.

Al fine di garantire la conformità alle linee guida ICNIRP [1], l'indice  $\hat{I}_B^{(n)}$  deve risultare minore o uguale a 1, per ogni  $n$ . Le (5.5), (5.6) vengono valutate deducendo  $B_{xk}^{(n)}$ ,  $B_{yk}^{(n)}$ ,  $B_{zk}^{(n)}$  dalle stime spettrali ottenute mediante FFT. In accordo con la definizione, le sommatorie nella (5.5) vanno estese a tutte le componenti spettrali (massimi relativi dello spettro di ampiezza, dopo la correzione di ampiezza e frequenza) significative del segnale, escludendo i contributi associati a termini di rumore. Se, al contrario, nella valutazione della (5.5) non vengono fatte distinzioni fra segnale e rumore, le stime di  $\hat{I}_B^{(n)}$  così calcolate assumono il significato di maggiorazioni dei valori effettivi dell'indice di conformità. Questa scelta, adottata nell'ambito della presente specifica tecnica in quanto maggiormente cautelativa, è in linea con le definizioni stesse degli indici di conformità (5.4) e (5.5) che prevedono la sovrapposizione, mediante somma aritmetica, dei contributi associati a tutte le componenti armoniche dell'induzione magnetica.

La valutazione dell'indice di conformità può quindi portare ad una delle seguenti condizioni:

$$\hat{I}_B^{(n)} \leq 1 \quad (5.7a)$$

$$\hat{I}_B^{(n)} > 1, \quad (5.7b)$$

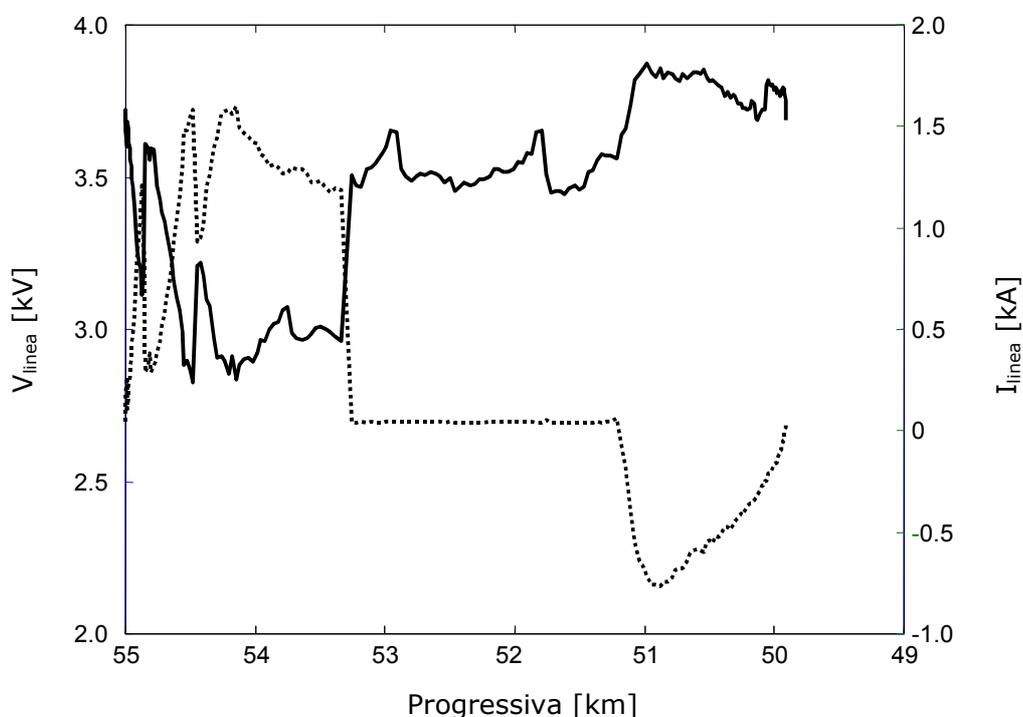
che vengono trattate come di seguito specificato.

Nel caso in cui sia verificata la (5.7a) si ha la certezza che le condizioni di conformità sono rispettate; se invece vale la (5.7b), anche dopo l'applicazione della procedura descritta al punto b) della sezione 5.3, vanno eseguite ulteriori analisi specifiche al fine di quantificare il contributo del rumore nella determinazione del valore dell'indice di conformità [9]. In questi casi, infatti, l'indice potrebbe risultare maggiore di uno soltanto per il fatto di aver incluso nel computo dell'indice ICNIRP gli apporti dovuti al rumore. Detto rumore, comunque presente anche a rotabile inattivo, è dovuto alla somma di diversi contributi: rumore elettromagnetico (fondo) presente nell'ambiente, rumore delle apparecchiature di misura, rumore numerico dovuto agli strumenti utilizzati per l'applicazione delle procedure di calcolo. Se l'eliminazione del contributo complessivo di rumore, dal calcolo dell'indice ICNIRP, ripristina la validità della (5.7a), le condizioni di conformità sono verificate; in caso contrario sarà necessario verificare se sono superati o meno i limiti in termini delle grandezze di base (le quantità direttamente responsabili degli effetti biologici), come prescritto dalla pubblicazione ICNIRP [1].

## 6. Presentazione dei risultati

Questo paragrafo indica le modalità di presentazione dei risultati elaborati attraverso l'applicazione della metodologia descritta nei paragrafi precedenti per un singolo punto di misura. A titolo d'esempio sono stati considerati alcuni dati sperimentali rilevati da Trenitalia S.p.A. e misurati sopra il sedile del primo agente sul treno ad alta frequentazione (TAF), ovvero relativi al punto CAB23.

In particolare, le Fig. 6.1 e 6.2 descrivono le grandezze di stato del treno durante la misura dell'induzione magnetica: la prima è relativa alla di tensione di alimentazione ed alla corrente assorbita dal treno, mentre la seconda riporta ne la velocità in funzione della sua posizione sulla linea.



**Figura 6.1** Andamento della tensione di linea, rappresentata con tratto continuo, e della intensità della corrente assorbita, riportata con linea punteggiata, dal treno durante la misura dell'induzione magnetica, in funzione della posizione sulla linea di prova (Firenze-Pisa).

La Fig. 6.3, riporta un diagramma a curve di livello relativo a una porzione di una mappa tempo-frequenza del modulo dell'induzione magnetica. Questo diagramma è stato ottenuto mediante stime spettrali basate su sotto-sequenze contigue, di durata pari a 0.25 s ciascuna. Per le stime spettrali è stato utilizzato l'algoritmo di FFT e non sono stati applicati algoritmi di interpolazione in frequenza. Nel caso specifico, le serie temporali analizzate fanno riferimento ad un intervallo di campionamento di circa 0.5 ms. Il grafico di Fig. 6.3 mostra in modo evidente la presenza di una componente fondamentale e di alcune componenti armoniche, modulate in ampiezza e in frequenza (tracce più marcate).

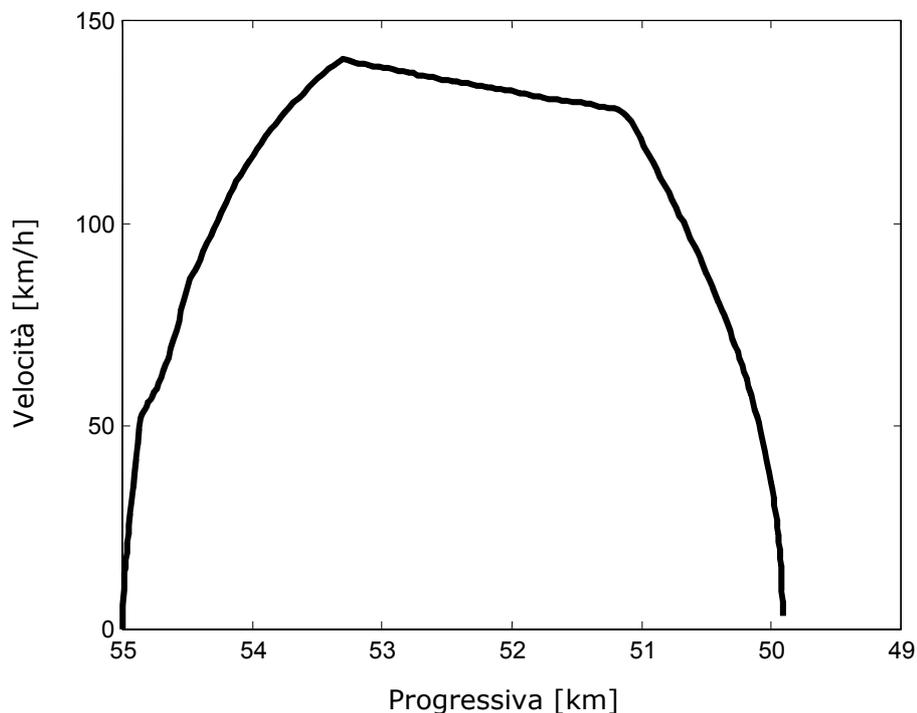


Figura 6.2 Velocità del treno in funzione della posizione sulla linea.

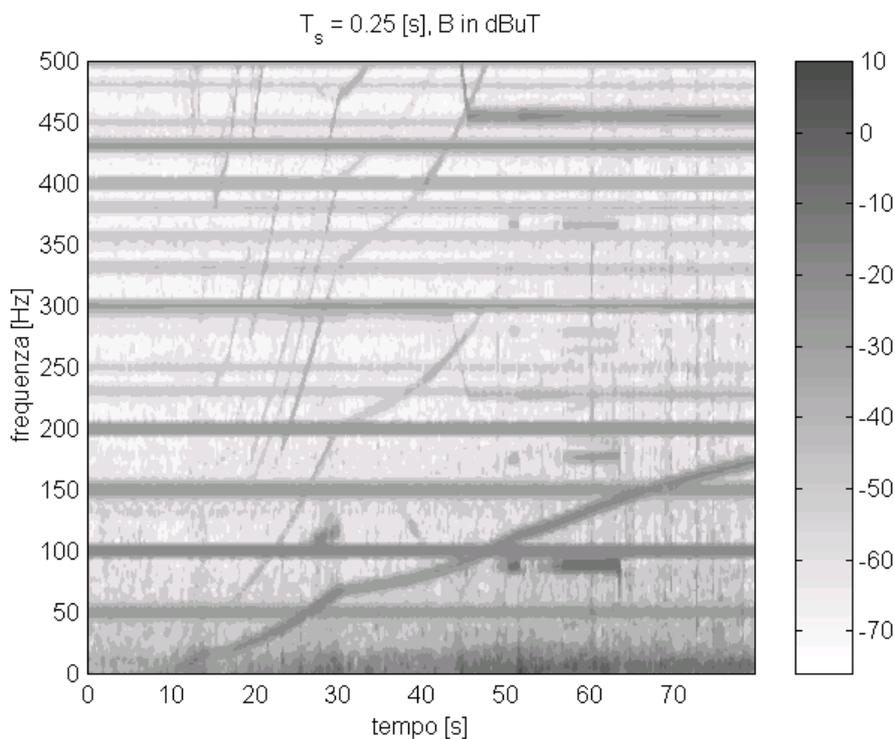
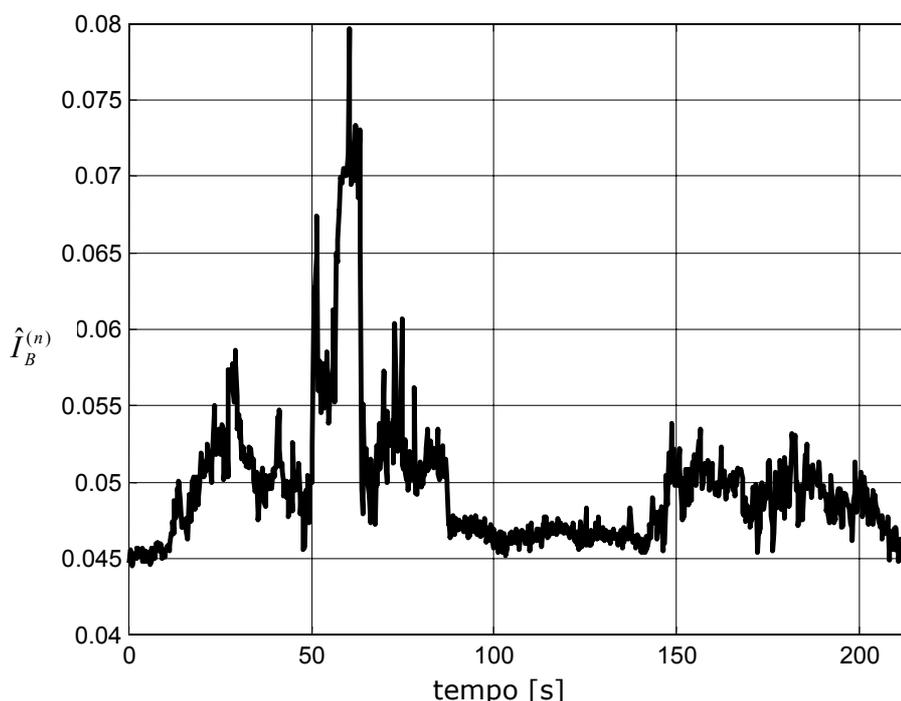


Figura 6.3 Curve di livello di una porzione della mappa tempo-frequenza  $B(f;t)$  del modulo dell'induzione magnetica. La mappa è stata calcolata facendo riferimento a finestre temporali contigue del segnale, di durata  $T_w = 0.25$  s; non sono stati applicati algoritmi di interpolazione in frequenza.

La Fig. 6.4 riporta l'andamento nel tempo dell'indice  $\hat{I}_B^{(n)}$  definito nella relazione (5.5), e calcolato impiegando la curva ICNIRP per la popolazione, ovvero quella con i valori dei livelli di riferimento più bassi. Il grafico di Fig. 6.4 è stato ottenuto applicando alle stime spettrali precedentemente ottenute (si veda la Fig. 6.3) gli algoritmi di correzione di ampiezza e di frequenza riportate nelle (C.1), (C.2) e (C.3). Si noti che l'indice  $\hat{I}_B^{(n)}$  raggiunge il massimo assoluto in prossimità dell'istante  $t_c = 60.5$  s. Il valore dell'indice, come richiesto dalle linee guida ICNIRP, resta comunque inferiore a 1 su tutto l'intervallo di osservazione.

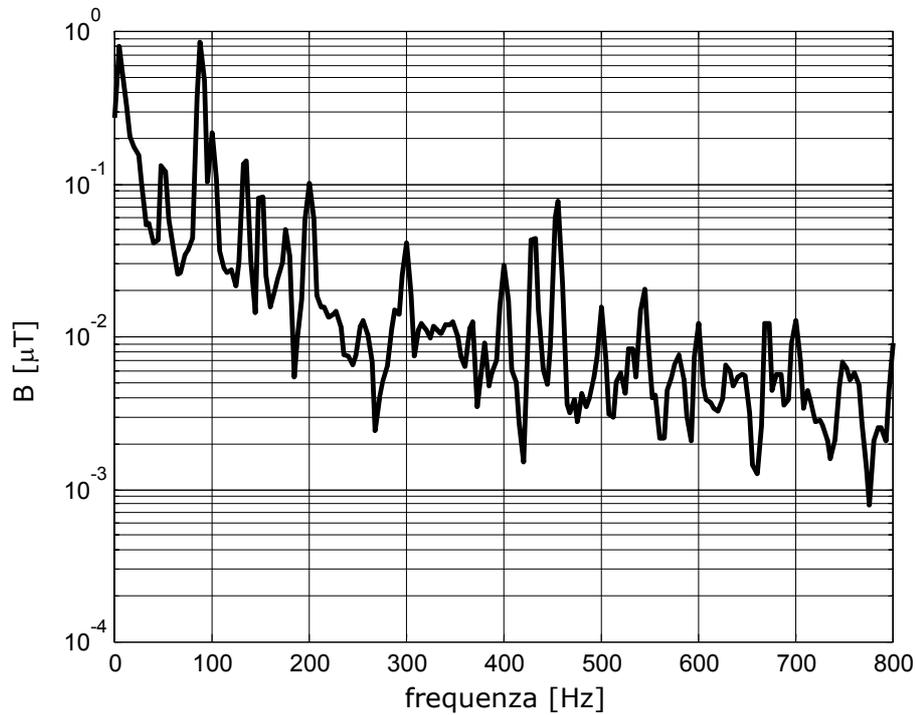


**Figura 6.4** Indice  $\hat{I}_B^{(n)}$  in funzione del tempo. Il grafico fa riferimento a stime spettrali basate su finestre contigue della durata  $T_w = 0.25$  s. Alle stime spettrali ottenute è stata applicata correzione di ampiezza e di frequenza.

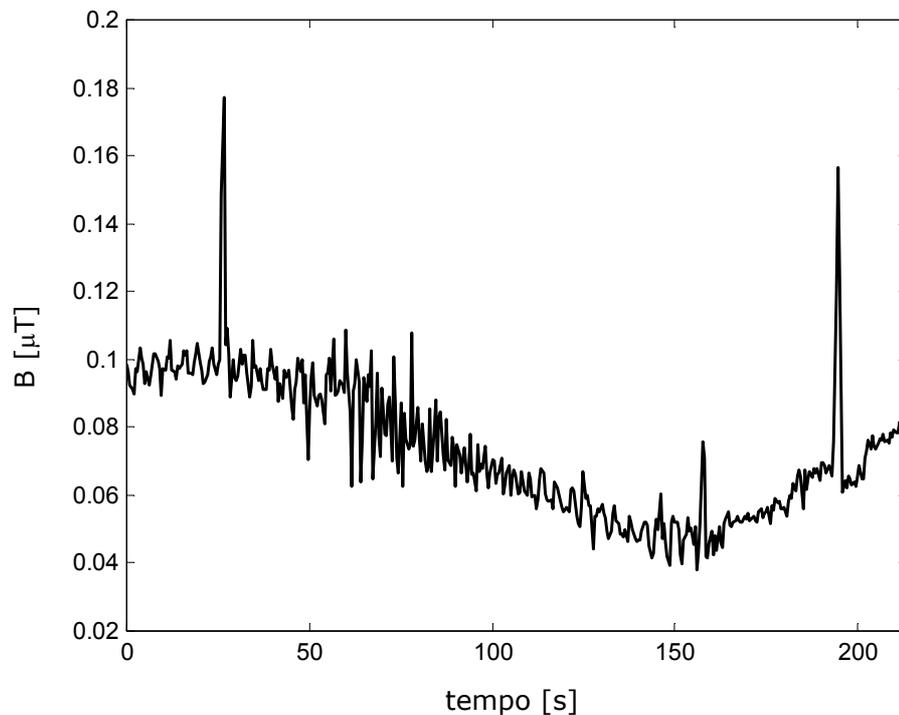
Si riporta in Fig. 6.5 lo spettro "peggiore" nel senso dell'indice  $\hat{I}_B^{(n)}$ , cioè quello caratterizzato dal suo valore più grande (rispetto a tutti gli altri calcolati per l'intera durata della misura). In questo caso, l'indice vale  $\hat{I}_B^{(n)} = 0.079$  e si riferisce allo spettro che corrisponde alla sotto-sequenza all'istante  $t_c = 60.5$  s.

Per comprendere meglio come, in funzione del tempo, sia stato ottenuto il valore dell'indice  $\hat{I}_B^{(n)}$ , nella Tab. 6.1 sono riportati i valori di picco dell'induzione magnetica alle varie frequenze presenti nello spettro di Fig. 6.5 (le 20 componenti più significative) ed i relativi livelli di riferimento che contribuiscono al calcolo dell'indice ICNIRP. Nella stessa tabella sono evidenziati i suddetti rapporti, che determinano in definitiva il valore di  $\hat{I}_B^{(n)}$ .

In Fig. 6.6 è riportato l'andamento temporale del valore efficace della componente a 50 Hz dell'induzione magnetica.



**Figura 6.5** Spettro con indice  $\hat{I}_B^{(n)}$  più elevato. Questa stima spettrale corrisponde alla sotto-sequenza all'istante  $t_c = 60.5 s$ , di durata  $T_w = 0.25 s$ .



**Figura 6.6** Andamento temporale del valore efficace della componente a 50 Hz dell'induzione magnetica.

**Tabella 6.1** Contributi  $\Delta I_B$  più significativi dello spettro di Fig. 6.5 al calcolo dell'indice ICNIRP.

$\Delta I_B$	$B$ [ $\mu\text{T}$ ]	Livello di riferimento ICNIRP [ $\mu\text{T}$ ]	Frequenza [Hz]
0.0154	0.87	56.625	88.3
0.0073	0.08	10.996	454.7
0.0044	0.22	50.005	100.0
0.0043	0.16	37.283	134.1
0.0043	0.05	11.625	430.1
0.0040	0.10	24.945	200.4
0.0030	0.10	33.317	150.1
0.0024	0.04	16.699	299.4
0.0024	0.03	12.488	400.4
0.0022	0.02	9.209	543.0
0.0020	0.02	9.997	500.2
0.0018	0.05	28.282	176.8
0.0015	0.01	6.669	749.7
0.0014	0.01	7.152	699.1
0.0014	0.02	14.446	346.1
0.0013	0.01	7.462	670.0
0.0012	0.20	100.551	49.7
0.0012	0.01	8.340	599.5
0.0010	0.01	9.435	530.0
0.0007	0.01	13.650	366.3
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
<b>Indice ICNIRP 0.079</b>			

## Appendice A – Finestra di Hanning

La tecnica utilizzata è quella che fa riferimento alla *finestra di Hanning* [10], cioè

$$w(n\Delta t) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T_w} n\Delta t\right) \right], \quad n = 0, 1, \dots, N_w - 1 \quad (\text{A.1})$$

dove  $T_w = N_w \Delta t$  è la durata della finestra.

Di conseguenza, indicando con

$$s_m[n\Delta t] = s[(N(m-1) + n)\Delta t] w[n\Delta t], \quad \begin{array}{l} n = 0, 1, \dots, N_w - 1 \\ m = 1, 2, \dots, N_s \end{array} \quad (\text{A.2})$$

la  $m$ -esima sotto-sequenza del segnale (dopo l'applicazione della (A.1)), la corrispondente rappresentazione nel dominio della frequenza assume la forma

$$S_m[k\Delta f] = \sum_{n=0}^{N-1} s_m[n\Delta t] e^{-j2\pi kn/N_w}, \quad m = 1, 2, \dots, N_s, \quad (\text{A.3})$$

dove  $\Delta f = 1/N_w \Delta t$  rappresenta l'intervallo di frequenza fra due campioni successivi dello spettro  $S_m$ .

## Appendice B – Scelta della finestra di stazionarietà

L'intervallo di stazionarietà del segnale può essere definito come quell'intervallo di tempo all'interno del quale le proprietà statistiche del segnale  $s(t)$  si conservano costanti.

L'ampiezza delle finestre di stazionarietà  $T_w$  su cui eseguire la FFT non è costante su tutta la durata della registrazione del segnale  $s(t)$ , ma dipende dalle proprietà di correlazione puntuali delle diverse sorgenti di campo che contribuiscono al segnale  $s(t)$ .

Per determinare gli spettrogrammi del segnale necessari per il calcolo del profilo temporale dell'indice ICNIRP, due sono le procedure che possono essere impiegate:

- a) le stime spettrali sono ottenute adottando sotto-sequenze contigue di lunghezza temporale  $T_w$  costante per tutta la durata della registrazione sottoposta ad analisi;
- b) le stime spettrali sono ottenute adottando sotto-sequenze parzialmente sovrapposte, di lunghezza temporale  $T_w$  variabile a seconda della posizione temporale all'interno della registrazione.

### a) Procedura con finestra di stazionarietà $T_w$ di ampiezza costante

**a.1** Per individuare l'ampiezza  $T_w$  della finestra di stazionarietà è stata effettuata l'analisi delle proprietà di autocorrelazione e mutua correlazione delle tre componenti di induzione magnetica  $b_x(t)$ ,  $b_y(t)$  e  $b_z(t)$  su alcune registrazioni eseguite a bordo del TAF [11, 12].

I risultati in [11] consentono di determinare  $T_w = 0.25s$  per tutti gli intervalli di tempo analizzati. Se l'intervallo di stazionarietà è calcolato per le sole componenti di alta frequenza del segnale registrato, escludendo le componenti a bassa frequenza prodotte principalmente dalla corrente di alimentazione dei motori di trazione e dalle relative armoniche di basso ordine,  $T_w$  si riduce a valori compresi tra 0.1 e 0.2 s [12].

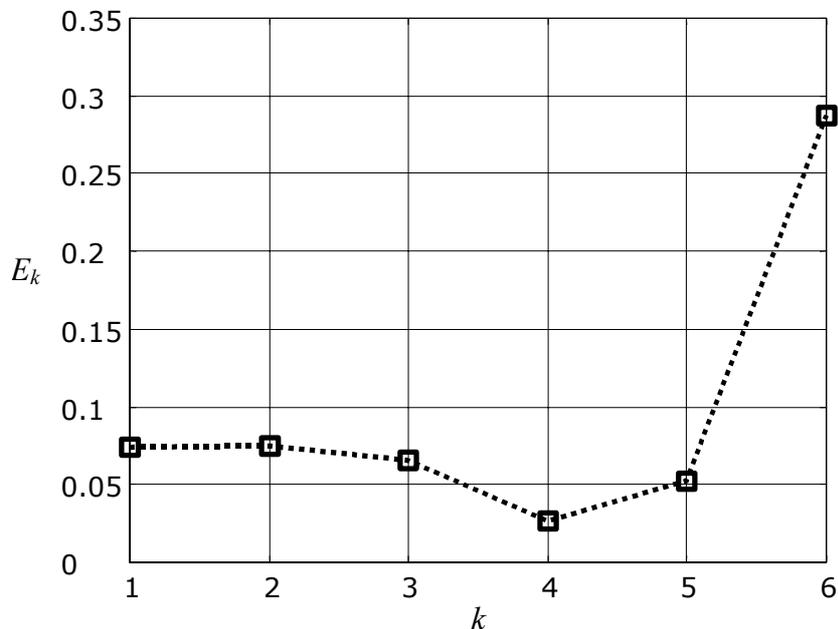
**a.2** Un altro approccio che consente di individuare  $T_w$  costante per tutta la durata della registrazione sottoposta ad analisi è quello proposto in [9], che si basa sulla valutazione dell'errore quadratico medio dell'indice ICNIRP, definito da:

$$E_k = \sum_m \left[ \hat{I}_B[m] \Big|_{N_{w,k}} - \hat{I}_B[m] \Big|_{N_{w,k-1}} \right]^2, \quad k = 1, 2, \dots, 6, \quad (\text{B.1})$$

dove  $\hat{I}_B[m] \Big|_{N_{w,k}}$  è l'indice in corrispondenza del campione temporale  $m$ -esimo ottenuto utilizzando finestre contigue costituite da  $N_{w,k}$  campioni,  $N_{w,k} = N_{w,k-1}/2$  e  $N_{w,0} = 4096$ . L'ampiezza costante ottima della finestra di stazionarietà è quella in corrispondenza della quale l'errore quadratico medio è minimo. In Fig. B.1 sono riportati i valori di  $E_k$  ottenuti. Si noti che l'andamento di Fig. B.1 fornisce solo indicazioni di massima dal momento che è stato ricavato considerando sotto-sequenze costituite da un numero di campioni dato da potenze di 2. Pertanto, dalla Fig. B.1, si può dedurre che il minimo effettivo di  $E_k$  si verifica per

$0.125 \text{ s} \leq T_w \leq 0.25 \text{ s}$ , ovvero per  $256 \leq N_w \leq 512$  campioni. Valori di  $T_w > 0.25 \text{ s}$  comportano errori sull'indice  $\hat{I}_B$  per un'insufficiente descrizione della non stazionarietà delle componenti spettrali a frequenza elevata (armoniche di ordine elevato); valori di  $T_w < 0.125 \text{ s}$  comportano errori su  $\hat{I}_B$  per un'inadeguata descrizione delle componenti spettrali a frequenza bassa (fondamentale). Va altresì fatto notare che la scelta di finestre con  $T_w = 0.25 \text{ s}$  è consistente con l'obiettivo di estendere l'analisi spettrale fino alla frequenza minima di 5 Hz, mentre la scelta di finestre con  $T_w = 0.125 \text{ s}$  ha il suo limite inferiore in frequenza intorno ai 10 Hz.

Si può quindi concludere che anche l'approccio basato sulla minimizzazione dell'errore quadratico medio (B.1) conduce alla scelta ottima dell'ampiezza delle finestre di stazionarietà  $T_w = 0.25 \text{ s}$ .



**Figura B.1** Errore quadratico medio  $E_k$  calcolato per stime diverse dell'indice di conformità, basate su spettri che impiegano sotto-sequenze contigue di diversa lunghezza  $N_{w,k} = 4096/2^k$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$ . In  $E_k$  si confronta l'indice calcolato con sotto-sequenze di  $N_{w,k}$  campioni con quello calcolato con sotto-sequenze di  $N_{w,k-1}$  campioni.

**b) Procedura adattativa per il calcolo dell'ampiezza della finestra di stazionarietà  $T_w$  basata sul controllo dell'errore sull'indice ICNIRP.**

Al fine di analizzare l'impatto della lunghezza della finestra  $T_{w,k} = (N_{w,k} - 1)\Delta t$  usata per calcolare le singole stime spettrali, l'indice ICNIRP  $\hat{I}_{B,N_{w,k}}$  è stato calcolato per diverse scelte del numero di campioni  $N_{w,k}$  che costituiscono la sequenza. Si è quindi definito il seguente errore sull'indice:

$$E_{k\%} = \frac{|\hat{I}_{B,N_{w,k}} - \hat{I}_{B,N_{w,k-1}}|}{\hat{I}_{B,N_{w,k-1}}} \times 100 \quad k = 1, 2, \dots, \quad (\text{B.2})$$

dove  $\hat{I}_{B,N_0}$  è il valore dell'indice ottenuto eseguendo la FFT sulla seguente sequenza centrata sull'istante di tempo  $t_j = (j-1)\Delta t$  e costituita da  $N_{w,0}$  campioni:

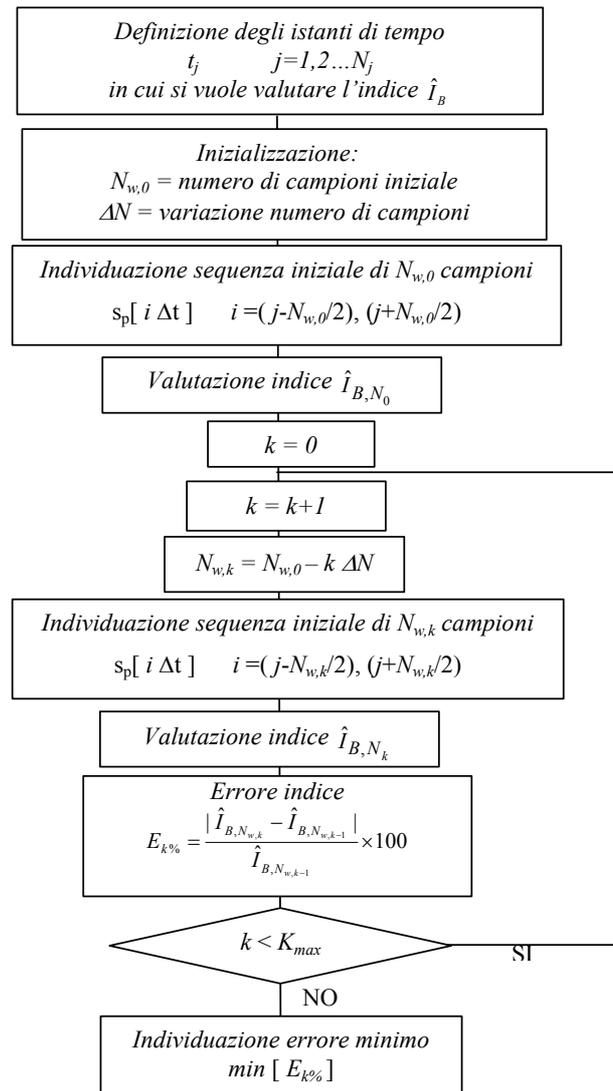
$$s_p[i\Delta t] \quad i = (j - N_{w,0}/2), (j + N_{w,0}/2) \quad (\text{B.3})$$

La procedura consente di studiare la variazione dell'indice in funzione del numero di campioni che costituisce la sequenza. La scelta ottima del numero di campioni  $N_w$ , ovvero della finestra di stazionarietà, è quella per cui l'errore (B.2) risulta minimo,

$$N_w : E_{k\%}(N_w) = \min_{N_{w,k}} E_{k\%}. \quad (\text{B.4})$$

Infatti, se l'errore sull'indice è minimo, allora le differenze fra le stime spettrali ottenute con  $N_{w,k-1}$  e  $N_{w,k}$  campioni rispettivamente sono minime e pertanto sono minime le non-stazionarietà.

Per la determinazione del punto di minimo, si rende necessario il filtraggio dell'errore (B.2) per mezzo di interpolazione polinomiale. L'istante di tempo  $t_j$  è fatto variare a passi discreti su tutta la sequenza del segnale, e per ogni  $t_j$  si determina il valore ottimo  $N_w(t_j)$  secondo la (B.4). Il diagramma di flusso della procedura è riportato nella Fig. B.2.

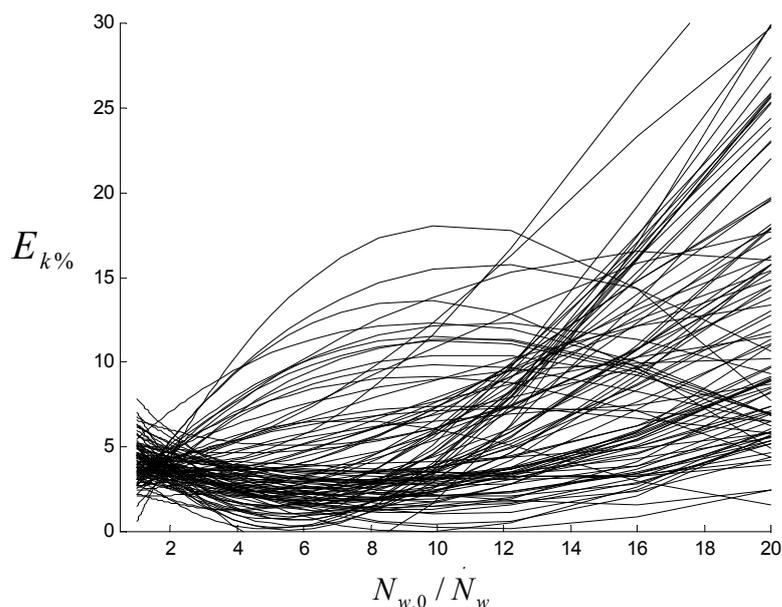


**Figura B.2** Diagramma di flusso della procedura per individuare la finestra di stazionarietà.

La procedura è stata applicata ad una sequenza del segnale compresa fra 11 s e 23.5 s a passi di 0.125 s, tratta dall'insieme dei dati sperimentali disponibili. L'ampiezza di riferimento della finestra è stata fissata a  $N_{w,0} = 2048$  ( $T_{w,0} = 1$  s); l'ampiezza della finestra  $N_w$  è stata variata con legge lineare

$$N_{w,k} = N_{w,0} - k\Delta N, \quad (\text{B.6})$$

dove  $\Delta N$  indica il passo di variazione pari a 40, e  $k$  rappresenta l'indice con variazione da 0 a 40, da cui risulta che la minima larghezza di finestra analizzata è costituita da  $N_{w,\min} = 448$  campioni. Il risultato dell'interpolazione polinomiale dell'errore (B.2) in funzione della larghezza della finestra è riportata in Fig. B.3 per tutte le sottosequenze.

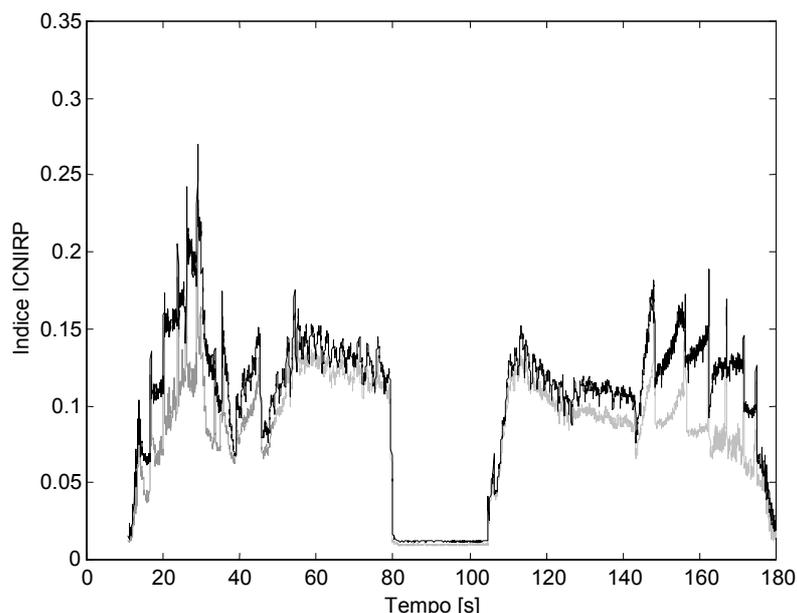


**Figura B.3** Curve polinomiali per l'analisi della registrazione  $t_0 = 11$  s, durata di 12.5 s.

Il grafico cumulativo fornisce l'informazione della minore o maggiore frequenza relativa di un determinato polinomio. Dall'esame della Fig. B.3 risulta che la maggior parte dei polinomi sono del tipo "a conca" con il punto di minimo nell'intervallo 4.0÷10.0 [14], che corrisponde ad una durata della finestra di calcolo  $T_w$  variabile tra 0.25 s e 0.1 s.

### **c) Confronto tra le procedure a) e b)**

Si sono confrontate le due procedure discusse ai punti precedenti a) e b). Gli andamenti nel tempo dell'indice ICNIRP ottenuti rispettivamente mediante sotto-sequenze contigue di lunghezza temporale  $T_w = 0.25$  s per tutta la durata della registrazione sottoposta ad analisi, e mediante sotto-sequenze contigue di lunghezza temporale variabile calcolata con la procedura adattativa del punto b) sono riportati in Fig. B.4.



**Figura B.4** Profilo dell'indice ICNIRP ottenuto con la procedura che utilizza  $T_w = 0.25$  s costante per tutta la durata della registrazione sottoposta ad analisi (curva superiore) e utilizzando per ogni istante di calcolo il valore  $T_w$  ottimo derivato dalla procedura adattativa del punto b) (curva inferiore).

L'errore quadratico medio definito in (B.1) fra i profili ICNIRP derivati con le due procedure risulta  $7.9 \times 10^{-4}$ . Il massimo scostamento assoluto tra le due curve è circa 0.1. Lo scostamento medio relativo è pari a circa 0.25.

#### **d) Conclusioni**

Dal confronto effettuato fra la procedura a) e la procedura b) si evince che:

- la procedura a) conduce ad una sovrastima del profilo dell'indice ICNIRP rispetto a quello ottenuto con la procedura b);
- la procedura b) risulta molto più gravosa della procedura a) dal punto di vista computazionale;
- l'errore quadratico medio fra gli andamenti nel tempo dell'indice ICNIRP ottenuti con le due procedure è trascurabile.

Sulla base delle osservazioni precedenti, si ritiene di adottare in prima istanza la procedura esposta al punto a), in cui le stime spettrali sono ottenute con sotto-sequenze contigue di lunghezza temporale  $T_w = 0.25$  s costante per tutta la durata della registrazione sottoposta ad analisi. Si osservi che questa è una scelta cautelativa rispetto alla verifica di conformità alle linee guida ICNIRP.

## Appendice C – Correzione degli spettri

Indicando con  $f_p = p\Delta f$  e con  $|S_m[f_p]|$  le stime di frequenza e ampiezza di una riga spettrale corrispondente a un massimo relativo del modulo dello spettro di ampiezza  $S_m[k\Delta f]$ , i termini correttivi da applicare sono specificati dalle formule seguenti [15, 16]

$$\hat{f}_p = (p + \delta)\Delta f, \quad \hat{S}_m[\hat{f}_p] = D S_m[p\Delta f], \quad (\text{C.1})$$

dove  $\hat{f}_p$ ,  $\hat{S}_m[\hat{f}_p]$  rappresentano, rispettivamente, frequenza e ampiezza della riga spettrale dopo la correzione, e  $\delta$  e  $D$  sono coefficienti correttivi.

In (C.1), il coefficiente  $\delta$  ha valori compresi nell'intervallo  $[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$  ed espressione

$$\delta = \frac{2\alpha - 1}{\alpha + 1}, \quad \alpha = \left| \frac{S_m[(p+1)\Delta f]}{S_m[p\Delta f]} \right|. \quad (\text{C.2})$$

Il coefficiente  $D$  dipende da  $\delta$  e vale

$$D = 2 \frac{1 - \delta^2}{|\sin(\pi\delta)| / (\pi\delta)}. \quad (\text{C.3})$$

Le correzioni di frequenza e ampiezza indicate nelle (C.1), (C.2), (C.3) vanno applicate a tutte le righe spettrali di segnale corrispondenti ad un massimo relativo del modulo dello spettro di ampiezza.

## Elenco dei simboli

$B$	Valore efficace del vettore induzione magnetica
$\vec{b}(t)$	Valore istantaneo del vettore induzione magnetica
$\vec{b}[n\Delta t]$	Sequenza tempo-discreta del vettore induzione magnetica
$b_x(t), b_y(t), b_z(t)$	Valori istantanei delle componenti del vettore induzione magnetica rispettivamente lungo le direzioni $x$ , $y$ e $z$
$b_x[n\Delta t], b_y[n\Delta t], b_z[n\Delta t]$	Sequenze tempo-discrete delle componenti lungo le direzioni $x$ , $y$ e $z$ del vettore induzione magnetica
$E_k$	Errore quadratico medio dell'indice di conformità calcolato su tutta la registrazione
$E_{k\%}$	Errore percentuale dell'indice di conformità calcolato istantaneamente
$f$	Frequenza
$f_c$	Frequenza di campionamento
$\hat{I}_B$	Indice di conformità alle linee guida ICNIRP
$N_c$	Numero di campioni acquisiti durante la misura
$N_s$	Numero di sotto-sequenze in cui è decomposto il segnale
$N_w$	Numero di campioni che definiscono il segnale nella finestra di stazionarietà
$T_w$	Finestra temporale in cui il segnale è stazionario
$t$	Tempo
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	Versori lungo le direzioni $x$ , $y$ e $z$
$\Delta t$	Intervallo di campionamento

## **Bibliografia**

- [1] "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Health Physics*, vol. 74, n. 4, pp. 494-522, Apr. 1998.
- [2] M. Grandolfo, "ICNIRP Guideline restrictions and reference levels in the frequency range 300 Hz to 10 MHz". In: "Health effects of electromagnetic fields in the frequency range 300 Hz to 10 MHz" (R. Matthes, E. van Rongen and M. H. Repacholi, Eds). ICNIRP 8/99, pp. 179-192, ICNIRP/WHO 1999.
- [3] J. P. Reilly, "Electrophysiology in the zero to megahertz range as a basis for electric and magnetic field exposure standards". In: "Health effects of electromagnetic fields in the frequency range 300 Hz to 10 MHz" (R. Matthes, E. van Rongen and M.H. Repacholi, Eds). ICNIRP 8/99, pp. 69-102, ICNIRP/WHO 1999.
- [4] K. Jokela, "Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields", *Health Physics*, vol. 79, n. 4, pp. 373-388, Oct. 2000.
- [5] "Norme tecniche per l'esecuzione di rilievi di induzione magnetica nel campo di frequenza 5÷500 Hz in rotabili ed impianti fissi ferroviari", Norma sperimentale Ferrovie dello Stato - Istituto Superiore di Sanità, 9 marzo 1999.
- [6] "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana", Norma italiana CEI 211-6, prima edizione, gennaio 2001.
- [7] E. O. Brigham, "*The Fast Fourier Transform and its applications*", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1988.
- [8] S. Pignari, D. Bellan, "Segnale di test, algoritmi di interpolazione ed effetti del rumore", Rapporto Tecnico DEEA/SP-TR-Cb-01, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Automazione Industriale, ottobre 2001.
- [9] D. Bellan, S. Pignari, "Caratterizzazione dei livelli di induzione magnetica a bordo di rotabili e definizione di una specifica normativa", Rapporto Tecnico DEEA/SP-TR-De-02, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Automazione Industriale, gennaio 2002.
- [10] S. M. Kay, "*Modern Spectral Estimation: Theory & Application*", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1988.
- [11] D. Bellan, A. Mariscotti, S. Pignari, "Metodi di elaborazione degli spettri e analisi della stazionarietà dei segnali", Rapporto Tecnico UGDIE/POLIMI 002/2001, 12 aprile 2001.
- [12] A. Mariscotti, P. Pozzobon, "Metodi di elaborazione degli spettri e analisi della stazionarietà dei segnali: analisi alta frequenza", Rapporto Tecnico UGDIE 003/2001, 23 settembre 2001.
- [13] M. D'Amore, F. Maradei, "Metodo di analisi dei dati di induzione magnetica misurati a bordo treno", Rapporto Tecnico URM1, 05 giugno 2001.

- 
- [14] F. Maradei, A. Mariscotti, "Procedure per la determinazione della finestra di stazionarietà", Rapporto Tecnico URM1/UGDIE, 10 gennaio 2002.
- [15] T. Grandke, "Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-32, no. 2, pp. 350-355, June 1983.
- [16] G. Andria, M. Savino, A. Trotta, "Windows and interpolation algorithms to improve electrical measurement accuracy", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-38, no. 4, Aug. 1989, pp. 856-863.



**UNITÀ TECNOLOGIE MATERIALE  
ROTABILE  
DIREZIONE TECNICA  
SPERIMENTAZIONE  
PROVE ELETTRICHE**

Viale Spartaco Lavagnini, 58 - 50129 FIRENZE (Italy)  
☎ (+39) 055/ 235 33 81 - FAX (+39) 055/ 235 35 22  
[ FS ☎ 967/ 3381 - FAX 967/ 35 22 ]