

SPECIAL ISSUE



TECHNICAL, SCIENTIFIC  
AND  
RESEARCH REPORTS

Vol. 7 (2015)

Procedura di valutazione  
dell'esposizione a campi elettromagnetici  
a bordo di materiale rotabile ferroviario



**Procedura di valutazione  
dell'esposizione a campi elettromagnetici  
a bordo di materiale rotabile ferroviario**

N. Zoppetti<sup>(1,\*),</sup> D. Andreuccetti<sup>(1,\*\*)</sup>

<sup>(1)</sup> Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara” del CNR (IFAC-CNR)

<sup>(\*)</sup> [N.Zoppetti@ifac.cnr.it](mailto:N.Zoppetti@ifac.cnr.it)

<sup>(\*\*)</sup> [D. Andreuccetti@ifac.cnr.it](mailto:D.Andreuccetti@ifac.cnr.it)

## Indice

Premessa .....	83
Parte I Normative di sicurezza .....	84
1 - Documenti di riferimento.....	84
1.1 - Linee guida a carattere scientifico .....	85
1.2 - Disposizioni legislative comunitarie.....	86
1.3 - Disposizioni legislative nazionali.....	86
1.4 - Norme e guide tecniche internazionali.....	87
1.5 - Specifiche tecniche Trenitalia e altri documenti di riferimento.....	88
Quali normative applicare .....	88
2 - Sintesi delle prescrizioni normative.....	88
2.1 - Il razionale scientifico delle normative .....	88
2.2 - Effetti e limiti.....	91
2.3 - Protezione dagli effetti acuti legati alla stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili 92	
2.4 - Protezione dagli effetti acuti legati al riscaldamento dei tessuti .....	95
2.5 - Note integrative sulle disposizioni legislative nazionali.....	97
Parte II Contenuti tecnici .....	99
3 - La procedura di misura .....	99
3.1 - Introduzione.....	99
3.2 - Tipologie di campo da misurare .....	99
3.3 - Articolazione in livelli.....	100
3.4 - Classificazione e scelta dei punti di misura .....	101
3.5 - Misure esplorative .....	104
3.6 - Misure puntuali.....	110
3.7 - Misure per la zonizzazione .....	112
3.8 - Misure per la dosimetria con campo non omogeneo .....	114
3.9 - Quadro generale della procedura di misura. ....	115
4 - Elaborazione dei risultati delle misure puntuali .....	119
4.1 - Scelta del metodo di valutazione.....	119
4.2 - Possibili implementazioni del metodo del picco ponderato .....	119
4.3 - Implementazione del metodo del picco ponderato nel dominio del tempo .....	120
Parte III Appendici .....	125
Appendice A Approfondimenti sull'utilizzo di filtri numerici per la determinazione dell'indice di picco ponderato nel dominio del tempo.....	125
Appendice B Codifica del nome dei punti di misura.....	131

## Premessa

Questo documento nasce nel contesto di una collaborazione tra l'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" (IFAC) del CNR e l'azienda Italcertifer SpA, avente per tema la valutazione del rischio da esposizione ai campi elettromagnetici (CEM) a bordo di materiale rotabile ferroviario e come fine la messa a punto di una procedura mediante la quale eseguire tale valutazione. La procedura è stata sviluppata con gli obiettivi di seguito elencati.

- Fornire un quadro di riferimento completo, affrontando in particolare gli aspetti seguenti:
  - descrizione ed interpretazione del quadro normativo nazionale ed internazionale concernente la protezione dall'esposizione umana ai campi elettromagnetici;
  - armonizzazione dei vincoli imposti dal quadro normativo sia per quanto riguarda gli aspetti generali, validi per l'esposizione a CEM in un generico ambiente di lavoro, sia in relazione alla normativa tecnica specifica per le valutazioni a bordo di materiale rotabile;
  - definizione e descrizione delle possibili tecniche di elaborazione dei dati misurati, scelte in relazione ai vincoli imposti dalla normativa di riferimento.
- Proporre un approccio il più possibile flessibile, completo e modulare alla valutazione del rischio, in modo da adattare gli interventi agli specifici rotabili e graduarne il livello di approfondimento secondo le esigenze di ogni singolo caso. In particolare, sebbene la procedura sia stata pensata avendo in mente prima di tutto il personale di bordo, essa tuttavia potrà essere utilizzata anche per la valutazione dell'esposizione dei viaggiatori.
- Puntare ad una ottimizzazione del rapporto tra qualità della valutazione e risorse (umane, di tempo e strumentali) necessarie ad effettuarla, nel rispetto dei vincoli imposti dal quadro normativo.

Inoltre, nella relazione finale consegnata al committente si presentavano in allegato due esempi concreti di applicazione, per mezzo dei quali si mettevano alla prova sul campo le soluzioni proposte. Gli allegati non sono tuttavia riportati in questo report per ottemperare agli impegni di riservatezza assunti con il committente.

## Parte I Normative di sicurezza

L'impianto normativo pressoché universalmente accettato per la protezione dalle esposizioni ai campi elettromagnetici prevede che si tuteli maggiormente (cioè con valori limite *più bassi*) la popolazione generale rispetto ai lavoratori professionalmente esposti (ai quali si applicano invece valori limite *maggiori*), in considerazione sia dei controlli medici che la legge impone di effettuare nei luoghi di lavoro, sia della presenza – tra la popolazione generale – di fasce particolarmente sensibili (quali ad esempio bambini, anziani, ammalati) o comunque di persone ignare dell'esposizione subita.

In generale, come **lavoratore professionalmente esposto** non si deve però intendere una qualsiasi persona esposta a campi elettromagnetici durante la propria attività lavorativa, ma piuttosto chi è addetto ad una mansione che comporta necessariamente l'esposizione ai campi elettromagnetici. Tutti gli altri lavoratori devono quindi essere trattati alla stregua della popolazione generale, in quanto la loro eventuale esposizione non è legata direttamente all'attività svolta e si suppone che potrebbe essere ridotta o eliminata senza influire sulla attività stessa.

Inoltre, le vigenti procedure di valutazione e riduzione del rischio prevedono che nei luoghi di lavoro si realizzi una **zonizzazione**, distinguendo le aree in cui:

- sono rispettati i valori limite per la protezione della popolazione generale: queste aree sono pertanto aperte alla frequentazione di chiunque senza limitazioni;
- non sono rispettati i valori limite per la protezione della popolazione generale, ma lo sono quelli per la protezione dei lavoratori: in queste aree potranno accedere solo i lavoratori professionalmente esposti, nel senso precisato sopra (e ancora meglio nel seguito); questi lavoratori sono:
  - in buona salute ed in età lavorativa,
  - al corrente dell'esposizione subita e informati sulla presenza e la posizione delle sorgenti,
  - addestrati a limitare l'esposizione e a far fronte alle eventuali conseguenze di una sovraesposizione,
  - sottoposti a regolare sorveglianza sanitaria;
- non sono rispettati neppure i valori limite per la protezione dei lavoratori: in queste aree non dovrà essere di regola ammesso l'ingresso di nessuno.

A fronte di questa impostazione generale si osservi però che la norma specifica EN 50500 definisce come lavoratori *“tutti coloro che lavorano in ambiente ferroviario”* e ciò ridurrebbe la pertinenza dei limiti per la popolazione ai soli ambienti in cui può accedere anche il pubblico, cioè i viaggiatori. Tuttavia, anche in luoghi interdetti all'accesso di questi ultimi, i limiti per la popolazione possono essere presi come riferimento per lavoratori particolarmente sensibili, come ad esempio i portatori di dispositivi medici impiantati.

Le considerazioni esposte sopra portano a concludere che *i valori limite specificati per la popolazione generale assumono rilevanza anche nei luoghi di lavoro* e saranno quindi presentati e discussi nel seguito, accanto ai valori limite ed alle prescrizioni specifiche per le esposizioni occupazionali.

### 1 - Documenti di riferimento

Il complesso di documenti che disciplinano l'esposizione umana ai campi elettromagnetici, che nel seguito chiameremo genericamente “norme di sicurezza”, può essere organizzato in tre categorie.

- **Linee guida a carattere scientifico** le quali, partendo da presupposti scientificamente certi ed applicando processi logici e matematici il più possibile condivisi, giungono a formulare:
  - i “limiti di sicurezza”, cioè i valori massimi di determinate grandezze fisiche, da non superare se si vogliono prevenire gli effetti indesiderati dell'esposizione;

- la “metrica” con cui valutare il rispetto di tali limiti, ovvero per esempio come tener conto della variazione nello spazio e nel tempo delle grandezze considerate.
- **Documenti con valore** giuridico, ovvero raccomandazioni e direttive comunitarie, leggi e decreti nazionali. In essi non solo si traducono in articoli di legge i “limiti di sicurezza” (spesso mutuati dalle linee guida scientifiche), ma si danno anche disposizioni e si forniscono indicazioni su importanti aspetti accessori, come i compiti delle parti coinvolte (istituzioni pubbliche, enti di vigilanza e controllo, datori di lavoro etc.) o le sanzioni in caso di violazione dei limiti.
- **Norme e guide tecniche**, nelle quali vengono fornite le indicazioni, basate su principi di buona tecnica, attraverso le quali dare applicazione pratica al processo di verifica della conformità ai “limiti di sicurezza”, nel rispetto della “metrica” di valutazione di volta in volta appropriata.

### 1.1 - Linee guida a carattere scientifico

In ambito nazionale e comunitario hanno rilevanza unicamente le seguenti linee guida pubblicate dall'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection).

- ICNIRP: "Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields". Health Physics, Vol.66, N.1, January 1994, pp.100-106.
- 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 on limits of exposure to static magnetic fields". Health Physics Vol.96, N.4, April 2009, pp. 504-514.
- 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.
- ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz". Health Physics Vol.106, N.3, 2014, pp.418-425.

Nella situazione attuale, le linee guida del 1998 rivestono interesse innanzitutto per quanto attiene alla prevenzione degli effetti di riscaldamento, tanto nella popolazione generale quanto nei lavoratori professionalmente esposti: sono infatti le uniche linee guida in cui vengono attualmente trattati questi effetti; esse, inoltre, sono rilevanti anche per la prevenzione degli effetti di stimolazione nervosa per la sola popolazione, poiché sono state recepite dalla Raccomandazione Europea 1999/519, principale riferimento giuridico per la regolamentazione di questa categoria di esposti. Per lo stesso motivo, sono rilevanti anche le datate linee guida del 1994 sul campo statico. È opportuno osservare, comunque, che sia le linee guida del 1994 per i campi statici, sia quelle del 1998 per gli effetti di stimolazione sono ormai superate sul piano scientifico, essendo state sostituite rispettivamente dalle linee guida del 2009 e del 2010. Queste ultime rivestono interesse soprattutto perché costituiscono il riferimento scientifico di una parte dei limiti occupazionali adottati dalla Direttiva 2013/35.

Il documento ICNIRP del 2003 non contiene linee guida, ma una serie di considerazioni tecnico-scientifiche relative all'esposizione ai campi elettrici e magnetici con forma d'onda complessa, che costituiscono la prima formulazione ufficiale del cosiddetto *metodo del picco ponderato*.

Infine, osserviamo che le recenti linee guida del 2014 relative al movimento nel campo magnetostatico e all'esposizione a campi magnetici di frequenza inferiore ad 1 Hz si applicano, a differenza di tutte le altre, esclusivamente alle esposizioni occupazionali; esse, comunque, sono scarsamente rilevanti in questa sede, perché non trovano applicazione in nessun documento giuridico attualmente vigente.

In definitiva, le linee guida ICNIRP rappresentano il più autorevole riferimento scientifico internazionale, ma non hanno di per sé alcun valore giuridico. Esse, tuttavia, sono ugualmente rilevanti, perché costituiscono

l'esplicito riferimento per tutte le normative pubblicate in ambito comunitario e devono quindi essere prese in considerazione in tutti i casi in cui tali norme lasciano irrisolte alcune questioni di carattere tecnico-scientifico.

## 1.2 - Disposizioni legislative comunitarie

- Raccomandazione 1999/519/CE del Consiglio europeo del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz. Gazzetta ufficiale delle Comunità europee L 199/59, 30.7.1999.
- 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). Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 184/1, 24.5.2004.
- Direttiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 26 giugno 2013 sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici). Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 179/1, 29.6.2013.

La Raccomandazione 1999/519 è tuttora il principale riferimento giuridico europeo per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettromagnetici da 0 Hz (compreso il campo magnetostatico) fino a 300 GHz. Come per ogni raccomandazione comunitaria, non sussiste per gli stati membri alcun obbligo di recepimento formale; tuttavia, la normativa italiana e in particolare i due DPCM 8 luglio 2003, configurano una situazione in cui tale Raccomandazione assume valore di legge nazionale per le esposizioni provocate da sorgenti diverse dagli elettrodotti e dagli impianti fissi di telecomunicazione (e quindi per quasi tutte le sorgenti collocate a bordo di materiale rotabile).

La Direttiva 2004/40 per le esposizioni dei lavoratori, inclusa nell'elenco soprattutto per motivi storici, è stata abrogata il 29 giugno 2013; essa viene sostituita, in prospettiva, dalla Direttiva 2013/35, il cui recepimento nelle legislazioni nazionali dei Paesi membri dell'UE deve essere completato entro il 1° luglio 2016. Considerata l'imminenza di questa scadenza, si ritiene ragionevole riferire alla Direttiva 2013/35 le valutazioni effettuate nella presene procedura, fermo restando che le metodologie di acquisizione ed elaborazione proposte consentono di potersi confrontare, se necessario, con qualunque altro sistema di limiti di esposizione. La Direttiva 2013/35 si rifà, sul piano scientifico, alle linee guida ICNIRP del 2009 per il campo magnetostatico, del 1998 per gli effetti termici e del 2010 per gli effetti di stimolazione nervosa; in quest'ultimo caso, la Direttiva prevede – oltre ai valori limite mutuati dall'ICNIRP (chiamati *livelli di azione inferiori*) – anche una serie di limiti meno restrittivi (chiamati *livelli di azione superiori*), non riconducibili ad alcuna linea guida ICNIRP, da applicarsi in condizioni controllate e con il consenso dei lavoratori esposti.

## 1.3 - Disposizioni legislative nazionali

- Legge 22 febbraio 2001, N.36: "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici". Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.55 del 7 marzo 2001.
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003: "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz". Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.199 del 28 agosto 2003.
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003: "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti". Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.200 del 29 agosto 2003.
- 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", coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, N.106. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n.101 del 30 aprile 2008, supplemento ordinario n.108.

Per quanto riguarda le esposizioni in ambito occupazionale, la legislazione italiana si è sempre ricondotta direttamente a quella europea e ne ha seguito pertanto le travagliate vicende, che hanno portato dalla Direttiva 2004/40, ormai abrogata, alla Direttiva 2013/35, il cui recepimento deve avvenire entro il 1° luglio 2016. Nella fase attuale, pur in assenza di limiti di sicurezza stabiliti per legge, il DLgs 81/2008 impone ai datori di lavoro di effettuare la valutazione del rischio anche nei confronti dei campi elettromagnetici. Poiché a questo fine è necessario riferirsi ad un insieme di valori limite, appare ragionevole attenersi da subito alle prescrizioni della nuova Direttiva.

Sul versante della popolazione generale, i due DPCM del 2003 regolamentano solo le esposizioni dovute agli elettrodotti ed alle sorgenti fisse di telecomunicazione, rimandando alla Raccomandazione Europea 1999/519 per ogni altra tipologia di sorgente. Pertanto, a bordo del materiale rotabile ferroviario si può ragionevolmente ritenere che le esposizioni della popolazione siano regolamentate principalmente dalla Raccomandazione comunitaria. Le uniche possibili eccezioni a questa conclusione potrebbero essere costituite (1) dalle linee di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica a 50 Hz associate con le sedi ferroviarie, compresi – secondo alcuni controversi pareri – i conduttori di alimentazione dei pantografi delle linee AV a 25 kV/50 Hz; (2) gli eventuali impianti fissi di telecomunicazione presenti a bordo treno.

#### **1.4 - Norme e guide tecniche internazionali**

- CEI EN 50413 (2009): "Norma di base sulle procedure di misura e di calcolo per l'esposizione umana ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (0 Hz-300 GHz)".
- CEI EN 50499 (2009): "Procedura per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici".
- CEI EN 50500 (2009): "Procedure di misura del livello dei campi magnetici generati dai dispositivi elettronici ed elettrici nell'ambiente ferroviario in riferimento all'esposizione umana".
- CEI EN 62226-1 (2006): "Esposizione ai campi elettrico e magnetico nell'intervallo delle frequenze basse e intermedie - Metodi di calcolo della densità di corrente e del campo elettrico interno indotti nel corpo umano Parte 1: Aspetti generali".
- CEI EN 62226-2-1 (2005): "Esposizione ai campi elettrici e magnetici nell'intervallo delle frequenze basse e intermedie - Metodi di calcolo della densità di corrente e del campo elettrico interno indotti nel corpo umano Parte 2-1: Esposizione ai campi magnetici - Modelli 2D".
- CEI EN 62226-3-1 (2008): "Esposizione ai campi elettrici e magnetici nell'intervallo delle frequenze basse e intermedie - Metodi di calcolo della densità di corrente e del campo elettrico interno indotti nel corpo umano Parte 3-1: Esposizione ai campi elettrici - Modelli analitici e numerici 2D".
- CEI EN 50527-1 (2013): "Procedura per la valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici dei lavoratori con dispositivi medici impiantabili attivi - Parte 1: Generalità".
- CEI EN 50527-2-1 (2013): "Procedura per la valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici dei lavoratori con dispositivi medici impiantabili attivi Parte 1: Valutazione specifica per lavoratori con stimolatore cardiaco (pacemaker)".

Il ruolo delle guide tecniche dovrebbe essere quello di fornire indicazioni operative in merito alle modalità di applicazione delle norme di radioprotezione, specificando per esempio come si eseguono le misure o come si debbano elaborare ed interpretare i risultati. Non di rado, invece, le guide tecniche – anche CENELEC – riportano prescrizioni che si sovrappongono ad alcune delle indicazioni normative, a volte anche contraddicendole e creando quindi una evidente difficoltà.

In passato, i documenti CENELEC traevano forza dall'essere esplicitamente citati nella Direttiva 2004/40 (sebbene in essa si desse spazio anche alle norme tecniche nazionali, con funzioni almeno di supplenza temporanea), ma questo non avviene più nella nuova Direttiva 2013/35, che fa invece riferimento ad alcune *guide pratiche non vincolanti*, da redigersi appositamente e di cui si attende la pubblicazione.

Per quanto riguarda infine le ormai datate guide tecniche italiane CEI 211-6 e 211-7, esse possono servire tutt'al più per aspetti marginali.

## 1.5 - *Specifiche tecniche Trenitalia e altri documenti di riferimento*

- "Caratterizzazione del livello di esposizione a campi magnetici a bordo di rotabili ferroviari (5 Hz-100 kHz)". Specifica tecnica TI.UTMR.CEM002.0, Trenitalia S.p.A., Firenze, maggio 2005.
- "Caratterizzazione del livello di esposizione a campi elettromagnetici a bordo di rotabili ferroviari (100 kHz-2.5 GHz)". Specifica tecnica TI.UTMR.CEM003.0, Trenitalia S.p.A., Firenze, maggio 2005.
- D.Andreuccetti e N.Zoppetti: "Valutazione della densità di corrente elettrica indotta nell'organismo di un lavoratore esposto al campo magnetico a bassa frequenza a bordo del materiale rotabile Trenitalia Ale 724 - Livello 1". Relazione tecnica per Trenitalia s.p.a. IFAC-CNR, Firenze, novembre 2008.
- D.Andreuccetti, L.Pieri e N.Zoppetti: "Valutazione delle grandezze dosimetriche indotte nell'organismo di un lavoratore esposto al campo magnetico a bassa frequenza a bordo del materiale rotabile Trenitalia Ale 724 - Livello 2". Relazione tecnica per Trenitalia s.p.a. IFAC-CNR, Firenze, dicembre 2010.

## **Quali normative applicare**

Come si è visto, il panorama normativo nazionale ed internazionale è piuttosto ampio. Nel redigere la presente procedura, si è cercato pertanto di elaborare una sintesi ragionata dei documenti elencati, estraendone gli aspetti pertinenti e rilevanti e collegandoli tra di loro per proporre una metodologia di intervento fondata, sostenibile ed applicabile in modo efficace nelle situazioni reali.

Sintetizzando al massimo, dal quadro sopra delineato emerge che i principali riferimenti normativi da tener presenti nel contesto ferroviario sono:

- la Direttiva Europea 2013/35 per le esposizioni occupazionali;
- la Raccomandazione Europea 1999/519 per le esposizioni della popolazione generale;
- i due DPCM italiani dell'8 luglio 2003, unicamente per l'esposizione della popolazione ai campi dispersi dalle infrastrutture di alimentazione a 50 Hz poste lungo la linea ferroviaria (o facenti parte di essa) e dagli eventuali impianti fissi di telecomunicazione presenti a bordo treno o nei pressi della sede ferroviaria.

Le norme Cenelec generiche (EN50413, EN50499) e specifiche per l'ambito ferroviario (EN50500) devono essere considerate come guide per l'applicazione pratica delle prescrizioni comunitarie, mentre per ogni questione tecnico-scientifica irrisolta di tipo più generale occorre rifarsi direttamente ai documenti ICNIRP da cui queste ultime discendono.

## **2 - Sintesi delle prescrizioni normative**

### **2.1 - Il razionale scientifico delle normative**

In questo capitolo viene presentato il cosiddetto "razionale" delle normative di radioprotezione, cioè i presupposti scientifici e i percorsi metodologici per mezzo dei quali sono state costruite le linee guida ICNIRP che, come si è detto, costituiscono uno dei più autorevoli insiemi di linee guida scientifiche internazionali attualmente disponibili per la protezione dalle esposizioni ai campi elettromagnetici. I punti fondamentali di questo razionale comprendono: (1) l'orientamento agli effetti; (2) l'articolazione su due piani di valutazione; (3) la distinzione tra popolazione generale e lavoratori professionalmente esposti. Le considerazioni esposte si applicano direttamente (salvo alcune differenze di nomenclatura) anche alle normative comunitarie, che come si è visto mutuano i propri valori limite proprio dalle linee guida ICNIRP.

### 2.1.1 - Orientamento agli effetti

Le normative hanno l'obiettivo di limitare la probabilità che individui umani siano esposti a livelli di campo tanto intensi da provocare effetti biologici o sanitari nei loro organismi. Per *effetto biologico* si intende una variazione morfologica o funzionale nei tessuti, organi o sistemi dell'organismo esposto; l'effetto diventa *sanitario* quando comporta una alterazione patologica dello stato di salute dell'individuo. Si usa distinguere due classi di effetti: gli *effetti a breve termine* (che possono essere *diretti* o *indiretti*) e gli *effetti a lungo termine*.

Le linee guida ICNIRP mirano alla prevenzione degli **effetti diretti a breve termine** (detti anche **effetti acuti**), i soli per i quali esistono evidenze scientifiche e conoscenze dettagliate sufficienti alla costruzione dei limiti di sicurezza. Per gli effetti acuti sono noti, infatti, sia i meccanismi di azione, sia le soglie di insorgenza in funzione della frequenza, sia le relazioni dose-risposta. Come vedremo meglio, gli effetti acuti possono essere a loro volta suddivisi in quattro tipologie: effetti di induzione di nausea o vertigini; effetti di stimolazione del sistema nervoso centrale; effetti di stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili; effetti di riscaldamento (o effetti "termici").

Gli **effetti indiretti a breve termine** costituiscono una classe molto specifica di effetti, originati da interazioni con protesi metalliche passive o da interferenze con dispositivi elettronici attivi impiantati nel soggetto esposto.

Gli standard di prodotto dei dispositivi impiantati indicano spesso nei livelli di riferimento ICNIRP del 1998 per la popolazione generale i valori limite al di sotto dei quali i dispositivi stessi sono in grado di funzionare correttamente. Tuttavia ciò non è garantito in generale, specialmente se si ha a che fare con i dispositivi meno recenti. Da parte loro, le normative di radioprotezione si limitano a mettere in guardia gli interessati e fornire indicazioni piuttosto generiche.

In linea di massima, si ritiene che il rispetto dei limiti previsti per la popolazione generale sia condizione sufficiente a garantire la sicurezza dei lavoratori portatori di protesi impiantate, esposti a campi elettromagnetici. Tuttavia, questa affermazione non è esplicitamente confermata sul piano formale, né garantita sul piano tecnico, e dovrebbe essere pertanto considerata con cautela.

Gli **effetti a lungo termine** (o effetti "cronici") sono connessi ad esposizioni assai prolungate a campi di intensità inferiore alle soglie di insorgenza degli effetti acuti. Sebbene l'occorrenza di effetti di questo tipo nel caso di esposizione a campi elettromagnetici non possa essere esclusa, tuttavia essa non è considerata "accertata" sul piano scientifico, poiché le evidenze disponibili (soprattutto di tipo epidemiologico) sono, a seconda dei casi, assenti o ritenute non conclusive.

**Tab. 1:** tipologie di effetti presi in considerazione dalle norme di sicurezza e intervalli di frequenza (convenzionali) in cui ciascuno si manifesta.

Effetto	Intervallo di frequenza
Induzione di nausea e vertigini	Da 0 a 1 Hz
Stimolazione del sistema nervoso centrale	Da 0 a 10 MHz
Stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili	Da 0 a 10 MHz
Riscaldamento dei tessuti	Da 100 kHz a 300 GHz

Le norme di sicurezza sono *organizzate in funzione degli effetti acuti che si vogliono prevenire*: esistono norme per la prevenzione degli effetti di stimolazione, norme per la prevenzione degli effetti di riscaldamento ecc. Detto in modo sintetico e semplificato, per ogni effetto la relativa norma prende in considerazione la soglia a cui l'effetto si manifesta (di solito variabile in funzione della frequenza), applica ad essa un conveniente margine di cautela e identifica così il livello da non superare per scongiurare il manifestarsi dell'effetto stesso.

La Tab. 1 riporta i principali effetti presi in considerazione dalle normative correnti, indicando per ciascuno l'intervallo di frequenza in cui esso si manifesta (si tratta ovviamente di delimitazioni in larga misura convenzionali). Nelle sezioni successive di questo capitolo saranno esaminati più da vicino, seppure in modo sommario, i vari effetti e le relative prescrizioni normative.

Come conseguenza di questa impostazione, è possibile che in un certo intervallo di frequenza (nel quale si manifestano due o più effetti diversi) siano specificati più limiti di sicurezza. Ovviamente, a parità di ogni altro parametro, dovrebbe prevalere il limite più basso, ma in realtà spesso ai diversi effetti si applicano metriche di valutazione diverse (per esempio diverse modalità di media temporale o di trattamento dei segnali complessi)

che fanno sì che la situazione non sia così banale. Per esempio, tra 100 kHz e 10 MHz possono manifestarsi sia effetti di stimolazione sia effetti di riscaldamento (vedere la Tab. 1) e questi ultimi hanno soglie più basse dei primi. Per gli effetti di riscaldamento però, sono rilevanti i livelli di esposizione *mediati su 6 minuti*, mentre per gli effetti di stimolazione sono rilevanti i livelli *istantanei*. In caso di esposizione intermittente con ciclo di servizio sufficientemente basso, è quindi perfettamente possibile che finiscano per essere più restrittivi i limiti per gli effetti di stimolazione.

### 2.1.2 - *Articolazione su due piani di valutazione*

Il rationale alla base delle linee guida ICNIRP prevede due piani distinti per i limiti di sicurezza e - conseguentemente - per le procedure di verifica degli stessi.

Il primo di essi è legato direttamente alle soglie di insorgenza degli effetti acuti. In questo caso, i limiti di esposizione vengono formulati in termini delle grandezze “dosimetriche”, che si generano internamente all'organismo come conseguenza dell'esposizione e sono diverse a seconda degli effetti considerati. I limiti di questo tipo (che l'ICNIRP chiama “restrizioni di base”) si ottengono applicando degli opportuni fattori di sicurezza alle soglie degli effetti, per tener conto delle incertezze complessive e della variabilità individuale delle soglie stesse.

Considerato però che le grandezze dosimetriche, essendo interne all'organismo, non sono direttamente misurabili, le norme prevedono anche delle limitazioni in termini di grandezze “radiometriche”, direttamente accessibili alla misura: il campo elettrico, il campo magnetico e la densità di potenza “imperturbati” (cioè determinati in assenza del soggetto esposto). I limiti che l'ICNIRP propone per queste grandezze prendono il nome di “livelli di riferimento” e vengono individuati a partire dalle *restrizioni di base* utilizzando appropriati modelli dosimetrici di tipo matematico, disponibili nella letteratura scientifica, che simulano le condizioni di massimo accoppiamento del campo con l'organismo esposto. In altre parole, nel processo di definizione dei *livelli di riferimento* vengono introdotti dei margini di sicurezza ampiamente cautelativi, così da garantire che il rispetto dei livelli stessi implichi con certezza il rispetto delle *restrizioni di base*; al contrario, i *livelli di riferimento* possono superati, senza che lo siano necessariamente anche le *restrizioni di base*.

Le linee guida ICNIRP (e conseguentemente le normative europee) prevedono quindi un procedimento di valutazione articolato anch'esso in due passi.

Il primo passo è volto ad accertare che siano rispettati i *livelli di riferimento*, attraverso la determinazione dell'intensità delle grandezze radiometriche imperturbate. Se questa condizione è verificata, l'esposizione è considerata sicura senza necessità di spostarsi sul secondo piano di valutazione. La verifica dei *livelli di riferimento* può avvalersi sia di misure, sia di metodi di previsione teorica.

Il secondo passo, da mettere eventualmente in atto solo se si è riscontrato il superamento dei *livelli di riferimento*, consiste nella verifica del rispetto delle *restrizioni di base*, definite in termini di grandezze dosimetriche interne all'organismo esposto. Se quelle restrizioni sono rispettate, allora l'esposizione è considerata sicura (e quindi consentita), non ostante che siano violati i *livelli di riferimento*. La verifica delle *restrizioni di base* può avvenire solo mediante metodi di previsione teorica basati sull'uso di appropriati modelli di dosimetria numerica. L'opportunità di intraprendere il secondo passo, invece che adottare immediatamente le tecniche di riduzione dell'esposizione, deve per altro essere attentamente valutata, perché è perfettamente possibile che il secondo passo (che è spesso oneroso in termini di tempo e/o di costi) rilevi a sua volta una violazione delle *restrizioni di base*, rendendo così inevitabile il ricorso agli interventi di mitigazione.

Le normative europee che si rifanno direttamente alle linee guida ICNIRP (ovvero la Raccomandazione 1999/519 e la Direttiva 2013/35) ripropongono lo stesso approccio a due piani di valutazione, ma utilizzano una nomenclatura leggermente diversa che è opportuno precisare per non incorrere in interpretazioni erranee (cfr. Tab. 2).

**Tab. 2:** denominazione delle limitazioni previste dalle linee guida ICNIRP e dalle normative comunitarie; tra parentesi le sigle che verranno utilizzate nelle tabelle che riepilogano i limiti.

	<b>Linee guida ICNIRP</b>	<b>Raccomandazione Europea 1999/519/CE</b>	<b>Direttiva Europea 2013/35/UE</b>
<b>Limiti per le grandezze dosimetriche di base interne all'organismo, direttamente collegate con le soglie degli effetti</b>	Basic restrictions Restrizioni di base	Basic restrictions Limiti di base ( <b>LB</b> )	Exposure limit values Valori limite di esposizione ( <b>VLE</b> )
<b>Limiti per le grandezze radiometriche esterne accessibili a misura diretta</b>	Reference levels Livelli di riferimento	Reference levels Livelli di riferimento ( <b>LR</b> )	Action levels Livelli di azione ( <b>LA</b> )

### 2.1.3 - *Distinzione tra popolazione e lavoratori esposti*

Le linee guida ICNIRP e le norme da esse derivate, prevedono che si tutelino maggiormente (cioè con valori limite più bassi) le esposizioni della popolazione generale rispetto a quelle dei lavoratori professionalmente esposti, in considerazione sia dei controlli medici che la legge impone di effettuare nei luoghi di lavoro, sia della presenza – tra la popolazione generale – di fasce o categorie considerate particolarmente sensibili, come ad esempio bambini, anziani, ammalati o in generale persone ignare dell'esposizione subita. Come si è detto, come “lavoratore professionalmente esposto” si deve intendere chi è addetto ad una mansione che comporta *necessariamente* l'esposizione ai campi elettromagnetici; tutti gli altri lavoratori dovrebbero essere trattati alla stregua della popolazione generale.

## 2.2 - *Effetti e limiti*

### 2.2.1 - *Protezione dagli effetti di nausea e vertigini*

L'esposizione a campi magnetici lentissimamente variabili nel tempo, con frequenza inferiore ad 1 Hz, può provocare effetti di nausea o vertigini. Esposizioni di questo tipo si verificano in primo luogo quando un soggetto si muove trasladando in un campo magnetico statico non omogeneo o facendo ruotare parti del corpo in un campo magnetico statico anche omogeneo.

Fino alla pubblicazione delle linee guida ICNIRP del 2014, la prevenzione di questi effetti si basava unicamente sulla limitazione dell'intensità del campo statico (che l'ICNIRP tratta con linee guida specifiche per questo agente fisico); lo stesso approccio è stato adottato anche nella Raccomandazione 1999/519 (collegata alle linee guida ICNIRP del 1994) e nelle Direttiva 2013/35 (che si rifà alle linee guida ICNIRP del 2009). I limiti indicati nei documenti comunitari sono riepilogati in Tab.3.

La linea guida ICNIRP del 2014, concepita appositamente per limitare le esposizioni occupazionali ai campi magnetici lentissimamente variabili nel tempo, non è stata al momento incorporata in nessun documento giuridicamente rilevante. Essa comunque, a proposito della prevenzione di nausea e vertigini, prevede unicamente una “restrizione di base” consistente nella limitazione a 2 T della massima variazione dell'induzione magnetica sperimentata nell'arco temporale di 3 secondi.

**Tab.3:** limiti europei per il campo magnetostatico e per campi magnetici variabili con frequenza fino ad 1 Hz, validi anche per la prevenzione degli effetti di nausea e vertigini provocati dal movimento in un campo statico molto intenso, dei rischi di interferenza per i portatori di protesi impiantate e del rischio di attrazione o propulsivo.

	Popolazione generale Raccomandazione 1999/519		Esposizioni occupazionali Direttiva 2013/35	
	LB	LR	VLE	LA
Condizioni di lavoro normali	40 mT	40 mT	2 T	
Esposizione localizzata degli arti			8 T	
Condizioni di lavoro controllate			8 T	
Interferenza con dispositivi impiantati				0.5 mT
Rischio di attrazione e propulsivo				3 mT

## 2.3 - Protezione dagli effetti acuti legati alla stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili

### 2.3.1 - Aspetti generali

Le indicazioni dell'ICNIRP per la protezione dagli effetti di stimolazione nervosa sono state aggiornate, rispetto alle storiche linee guida del 1998, con la pubblicazione delle linee guida del 2010 (per frequenze da 1 Hz a 10 MHz) e successivamente delle linee guida del 2014 (per frequenze fino ad 1 Hz). Queste ultime consistono in una opportuna estrapolazione verso le frequenze più basse, con valori limite progressivamente crescenti al diminuire della frequenza, dei limiti specificati nelle linee guida del 2010, sia per le *restrizioni di base*, sia per i *livelli di riferimento*. In ambito comunitario, la Direttiva 2013/35 riprende, con proprie integrazioni, le indicazioni delle linee guida del 2010 ma non, fino ad oggi, quelle contenute nelle linee guida del 2014, alle quali pertanto per il momento non può essere attribuita alcuna valenza formale.

Nelle linee guida del 2010 si utilizza come "grandezza dosimetrica" il campo elettrico indotto, perché ritenuto la grandezza più idonea a descrivere gli effetti di stimolazione; pertanto le *restrizioni di base* sono formulate in termini di intensità di campo elettrico interno. Esse sono distinte a seconda che si considerino gli effetti transitori che avvengono nei tessuti del sistema nervoso centrale (CNS, dall'inglese *Central Nervous System*) della sola testa (principalmente sotto forma di percezione di lampi di luce detti *fosfeni*), oppure quelli che danno luogo alla stimolazione di un qualsiasi tessuto eccitabile della testa o del corpo (provocando, a seconda dei casi, sensazioni tattili, contrazioni della muscolatura scheletrica o interazioni con la funzionalità cardiaca); questi ultimi presentano soglie di insorgenza più alte. I *livelli di riferimento* vengono ricavati dalle *restrizioni di base* facendo uso di modelli matematici, che simulano le condizioni di massimo accoppiamento del campo con l'organismo esposto. Nei *livelli di riferimento*, tuttavia, non viene adottata la distinzione tra tessuti del sistema nervoso centrale della testa e tessuti eccitabili della testa e del corpo.

- Ai *livelli di riferimento* per la protezione dagli effetti di stimolazione si applicano le considerazioni che seguono.
- I *livelli di riferimento* sono definiti indipendentemente per campo elettrico ed induzione magnetica. Infatti, avendo a che fare con campi di grande lunghezza d'onda (maggiore di 30 metri), le esposizioni di intensità rilevante avvengono prevalentemente nella regione di campo vicino, in cui il campo elettrico e il campo magnetico non sono legati da una relazione prestabilita.
- I *livelli di riferimento* sono valori di campo imperturbati e cioè, quando riferiti alle esposizioni occupazionali, determinati in corrispondenza della postazione di lavoro, ma in assenza del lavoratore esposto.
- I *livelli di riferimento* intendono proteggere da effetti istantanei, come sono quelli di stimolazione del sistema nervoso: pertanto, devono intendersi applicati ai valori di picco dei campi, nonostante che nelle tabelle delle linee guida ICNIRP essi siano formulati in termini di valori efficaci (o valori RMS, dall'inglese *Root Mean Square*). Poiché in tali tabelle ci si riferisce esclusivamente a campi con forma d'onda sinusoidale, i valori di picco si ricavano semplicemente moltiplicando i valori RMS per la radice di 2.

- I *livelli di riferimento* sono stati individuati presupponendo un'esposizione a corpo intero in campo spazialmente omogeneo. Nel caso si abbia a che fare con distribuzioni fortemente disomogenee, nelle linee guida ICNIRP del 2010 si fa innanzitutto notare che una valutazione basata sulla rilevazione del valore massimo nel volume di spazio occupato dal soggetto esposto porta in ogni caso ad un risultato significativo, ma che ovviamente può risultare alquanto restrittivo; si indica comunque l'approccio dosimetrico (ovvero la verifica delle *restrizioni base*) come unica opzione realistica per una valutazione completa ed accurata dell'esposizione a sorgenti molto prossime. Per distanze maggiori di 20 cm, ha senso invece confrontare i *livelli di riferimento* con le medie spaziali dei campi nel volume di spazio occupato dal soggetto o da sue parti.

#### Nota

La Direttiva Europea 2013/35 adotta, come si è visto (Tab. 2), una denominazione propria, chiamando "valori limite di esposizione" le *restrizioni di base* ICNIRP e "livelli di azione" i *livelli di riferimento*. Inoltre, essa recepisce la distinzione tra *restrizioni di base* per il sistema nervoso centrale della sola testa e *restrizioni di base* per tutti i tessuti della testa e del corpo, ma preferisce chiamare questi limiti rispettivamente "valori limite di esposizione relativi agli effetti sensoriali" e "valori limite di esposizione relativi agli effetti sanitari". Per quanto riguarda i livelli di azione, la Direttiva prevede dei "livelli di azione inferiori", corrispondenti ai *livelli di riferimento* ICNIRP e collegati agli effetti di stimolazione "sensoriali" e dei "livelli di azione superiori", collegati agli effetti di stimolazione "sanitari" ma senza corrispondenza nei documenti ICNIRP. Infine, per il solo campo magnetico, la Direttiva prevede anche dei livelli di azione ancora più elevati, applicabili alle esposizioni localizzate che interessano i soli arti, anch'essi senza corrispondenza in ambito ICNIRP.

#### 2.3.2 - Sintesi dei valori limite

Nelle tabelle che seguono viene riportata una sintesi delle limitazioni previste dalla Raccomandazione 1999/519 e dalla Direttiva 2013/35 per quanto riguarda la prevenzione degli effetti di stimolazione.

**Tab.4:** limiti di base per gli effetti di stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili secondo la Raccomandazione Europea 1999/519 (esposizione della popolazione generale), per frequenze fino a 10 MHz; "f" rappresenta la frequenza in hertz.

Gamma di frequenza	Densità di corrente (mA/m <sup>2</sup> ) (rms)
> 0 - 1 Hz	8
1 - 4 Hz	8/f
4 - 1000 Hz	2
> 1000 Hz	f/500

**Tab.5:** valori limite di esposizione per gli effetti di stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili secondo la Direttiva Europea 2013/35 (lavoratori professionalmente esposti), per frequenze fino a 10 MHz; "f" rappresenta la frequenza in hertz.

Gamma di frequenza	Campo elettrico interno (V/m) (picco)	
	Effetti sanitari	Effetti sensoriali
1 - 10 Hz	1.1	0.7/f
10 - 25 Hz	1.1	0.07
25 - 400 Hz	1.1	0.0028f
400 - 3000 Hz	1.1	
> 3000 Hz	0.00038f	

**Tab.6:** livelli di azione della popolazione generale), per frequenze fino a 10 MHz (tenendo conto delle indicazioni fornite in Allegato IV); "f" rappresenta la frequenza in hertz.

Intervallo di frequenza	Campo E (V/m) (rms)	Campo B (μT) (rms)
0 - 1 Hz		40000
1 - 8 Hz	10000	40000/f <sup>2</sup>
8 - 25 Hz	10000	5000/f
25 - 800 Hz	250000/f	5000/f
800 - 3000 Hz	250000/f	6.25
> 3000 Hz	87	6.25

**Tab.7:** livelli di azione per gli effetti di stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili secondo la Direttiva Europea 2013/35 (lavoratori professionalmente esposti), per frequenze fino a 10 MHz; "f" rappresenta la frequenza in hertz.

Gamma di frequenza	Campo E (V/m) (RMS)		Campo B ((μT) (RMS)		
	LA inferiori	LA superiori	LA inferiori	LA superiori	LA soli arti
1 – 8 Hz	20000	20000	200000/f <sup>2</sup>	300000/f	900000/f
8 – 25 Hz	20000	20000	25000/f	300000/f	900000/f
25 – 50 Hz	500000/f	20000	1000	300000/f	900000/f
50 – 300 Hz	500000/f	1000000/f	1000	300000/f	900000/f
300 – 1640 Hz	500000/f	1000000/f	300000/f	300000/f	900000/f
1640 – 3000 Hz	500000/f	610	300000/f	300000/f	900000/f
> 3000 Hz	170	610	100	100	300

### 2.3.3 - Campi con forma d'onda complessa

Poiché i limiti di sicurezza riepilogati nelle tabelle precedenti sono espressi in funzione della frequenza, la loro applicazione è immediata solo con campi elettrici e magnetici aventi forma d'onda sinusoidale e quindi frequenza univocamente determinata.

Una **forma d'onda complessa** è, in questo contesto, una qualsiasi forma d'onda *non sinusoidale*. Lo spettro di frequenza di una forma d'onda complessa comprende necessariamente almeno due componenti armoniche a frequenze diverse: si pone pertanto il problema di come confrontare un campo con più componenti armoniche con valori limite che possono essere differenti per ciascuna di esse. In questa situazione, le linee guida e gli altri documenti ICNIRP propongono un approccio che conduce alla determinazione di un **indice**, cioè di un numero che integra in sé sia le caratteristiche spettrali del campo elettrico o del campo magnetico considerati, sia la variazione in funzione della frequenza del valore limite normativo a cui ci si vuole riferire. L'indice assume un valore inferiore ad 1 (o al 100%, se espresso su base percentuale) se la normativa è rispettata; al contrario, se si rileva un valore superiore a 1 (o al 100%), siamo di fronte ad una violazione. L'indice può essere ricavato a posteriori, elaborando i risultati delle misure, oppure può essere fornito direttamente dalla strumentazione.

I due principali indici utilizzati per campi con forma d'onda complessa in relazione agli effetti acuti non termici dei campi elettromagnetici, sono i cosiddetti **indice standard** ( $I_{STD}$ ) e **indice di picco ponderato** ( $I_{WP}$ , dall'inglese *Weighted Peak*).

L'*indice standard*, adottato dalle linee guida ICNIRP del 1998 e ripreso successivamente anche da quelle del 2010, è definito nel dominio della frequenza e deve essere calcolato rapportando l'ampiezza efficace di ciascuna componente spettrale del campo con il rispettivo *livello di riferimento* ICNIRP e sommando poi linearmente tutti i rapporti così costruiti. In formule, supponendo di avere a che fare con un campo di induzione magnetica B, l'indice standard è espresso da:

$$I_{STD} = \sum_f \frac{B_{rms}(f)}{B_L(f)} \quad (1)$$

Nella (1),  $B_{rms}(f)$  è il valore efficace della componente spettrale del campo alla frequenza  $f$  e  $B_L(f)$  è il rispettivo *livello di riferimento* ICNIRP. Questo approccio presuppone che possa aver luogo la situazione in cui tutte le componenti spettrali della forma d'onda considerata assumono contemporaneamente il proprio valore massimo. Il fatto che questa eventualità sia invece alquanto remota è alla base delle critiche di ingiustificato eccesso di protezione mosse a questo approccio.

Il *metodo del picco ponderato*, introdotto dall'ICNIRP con lo *statement* del 2003 e poi ripreso in modo più completo e formale nelle linee guida del 2010, è un'alternativa che fornisce risultati più ragionevoli. Esso prevede che si tenga conto sia delle ampiezze delle componenti spettrali del campo, sia delle relative fasi. Da un punto di vista concettuale, per definire l'indice di picco ponderato si utilizza l'espressione seguente:

$$I_{WP} = \text{Max} \left| \sum_f \frac{B_{rms}(f)}{B_L(f)} \cos[2\pi ft + \theta(f) + \varphi(f)] \right| \quad (2)$$

Operativamente, una volta determinato lo spettro della forma d'onda, si rapportano anche in questo caso le ampiezze efficaci  $B_{rms}(f)$  delle componenti spettrali con i *livelli di riferimento*  $B_L(f)$  alle frequenze corrispondenti. Inoltre, si considerano anche le rispettive fasi  $\theta$ , a ciascuna delle quali si deve aggiungere un ulteriore contributo  $\varphi$  per il cui significato si rimanda ai documenti ICNIRP; infine, è necessario tornare nel dominio del tempo e determinare il massimo assoluto della forma d'onda sintetizzata a partire dallo spettro elaborato in ampiezza e fase nel modo descritto.

## 2.4 - Protezione dagli effetti acuti legati al riscaldamento dei tessuti

### 2.4.1 - Aspetti generali

Le prescrizioni normative proposte dall'ICNIRP per la protezione dagli effetti termici dei campi elettromagnetici sono ancora oggi quelle contenute nelle linee guida del 1998, alle quali si rifanno tanto la Raccomandazione Europea 1999/519 per la protezione della popolazione generale, quanto la Direttiva Europea 2013/35 per la tutela dei lavoratori professionalmente esposti.

Nell'intervallo di frequenze in cui occorre preoccuparsi degli effetti termici (cioè per frequenze maggiori di 100 kHz), il meccanismo di interazione preso in considerazione ai fini della tutela della salute consiste nell'assorbimento di energia all'interno del corpo umano, con conseguente innalzamento della temperatura dei tessuti. Per tali effetti sono note le relazioni dose-risposta, su cui si basano gli attuali standard protezionistici.

L'assorbimento di energia elettromagnetica può essere convenientemente valutato in termini di **tasso di assorbimento specifico** o **SAR** (dall'inglese *Specific Absorption Rate*, misurato in watt al chilogrammo [W/kg]). Il SAR è quindi la "grandezza dosimetrica" relativa agli effetti termici e corrisponde alla potenza per unità di massa assorbita dal soggetto esposto. Le evidenze scientifiche accumulate consentono di affermare che non hanno luogo effetti termici significativi per livelli di SAR inferiori ai 4 W/kg come media sull'intero organismo. Oltrepassata questa soglia, possono verificarsi vari effetti, differenziati a seconda della modalità di esposizione e del livello di potenza assorbita. Si inizia con un sovraccarico del sistema di termoregolazione causato di un lieve ma generalizzato aumento della temperatura corporea, fino a vere e proprie ustioni e necrosi. Per prevenire questi effetti, l'ICNIRP specifica delle *restrizioni di base* – differenziate per lavoratori e popolazione generale – sia per il SAR medio sull'intero organismo, sia per il SAR locale nella testa o negli arti.

Poiché il SAR non è direttamente misurabile, sono stati individuati – facendo uso di tecniche dosimetriche – i *livelli di riferimento* in termini di campo elettrico e campo magnetico imperturbati che, se rispettati, garantiscono il rispetto delle corrispondenti *restrizioni di base*, nell'ipotesi che il soggetto esposto non indossi protesi metalliche che incrementano la potenza assorbita.

Si elencano di seguito le principali caratteristiche dei *livelli di riferimento* definiti nelle linee guida ICNIRP del 1998 per la protezione dagli effetti termici.

- I *livelli di riferimento* per la protezione dagli effetti termici sono definiti per il campo elettrico, per il campo magnetico e – per frequenze superiori a 10 MHz – per la densità di potenza della radiazione.
- Per frequenze maggiori di 10 MHz, i *livelli di riferimento* per il campo elettrico e per il campo magnetico stanno tra loro in un rapporto costante, indipendente dalla frequenza e corrispondente all'impedenza caratteristica dello spazio libero; il loro prodotto è pari inoltre al *livello di riferimento* per la densità di potenza. Infatti, a frequenze sufficientemente alte, le esposizioni avvengono principalmente nella regione di campo radiativo, in cui il campo elettrico, il campo magnetico e la densità di potenza sono legati da relazioni prestabilite.
- I *livelli di riferimento* sono valori di campo imperturbati e cioè, quando riferiti alle esposizioni occupazionali, determinati in corrispondenza della postazione di lavoro, ma in assenza del lavoratore esposto.

- I *livelli di riferimento* per la protezione dagli effetti termici devono intendersi come valori efficaci mediati quadraticamente su un intervallo di 6 minuti. Tuttavia, nel caso di esposizioni impulsive, le linee guida ICNIRP del 1998 stabiliscono anche un limite (più alto) per le intensità di picco dei campi.
- Nel caso si abbia a che fare con distribuzioni di campo spazialmente disomogenee, le linee guida precisano che i valori da confrontare con i livelli di riferimento sono le medie spaziali delle intensità dei campi, valutate sull'intero organismo, ma con l'importante precisazione che le restrizioni di base devono comunque essere rispettate in ogni punto dello stesso. Pertanto, in caso di distribuzione fortemente disomogenea, può non essere sufficiente limitarsi alla verifica dei soli *livelli di riferimento*.

## 2.4.2 - Sintesi dei valori limite

**Tab. 8:** effetti di riscaldamento; limiti di base secondo la Raccomandazione Europea 1999/519 (esposizione della popolazione generale) per frequenze tra 100 kHz e 10 GHz e valori limite di esposizione secondo la Direttiva Europea 2013/35 (esposizioni occupazionali) per frequenze tra 100 kHz e 6 GHz.

	<b>LB popolazione (Raccom. 1999/519)</b>	<b>VLE lavoratori (Dirett. 2013/35)</b>
<b>SAR mediato sul corpo intero</b>	0.08 W/kg	0.4 W/kg
<b>SAR localizzato (testa e tronco)</b>	2 W/kg	10 W/kg
<b>SAR localizzato (arti)</b>	4 W/kg	20 W/kg

**Tab.9:** livelli di riferimento per gli effetti di riscaldamento secondo la Raccomandazione Europea 1999/519 (esposizione della popolazione generale) per frequenze tra 100 kHz e 10 GHz (tenendo conto delle indicazioni fornite in Allegato IV);

"f" rappresenta la frequenza in megahertz.

<b>Intervallo di frequenza</b>	<b>Campo E (V/m) (rms)</b>	<b>Campo B (<math>\mu</math>T) (rms)</b>	<b>Densità di potenza (W/m<sup>2</sup>)</b>
0.1 – 10 MHz	$87/\sqrt{f}$	$0.92/f$	
10 – 400 MHz	28	0.092	2
400 – 2000 MHz	$1.375\sqrt{f}$	$0.0046\sqrt{f}$	$f/200$
2 – 300 GHz	61	0.2	10

**Tab.10:** livelli di azione per gli effetti di riscaldamento secondo la Direttiva Europea 2013/35 (lavoratori professionalmente esposti) ;

"f" rappresenta la frequenza in megahertz.

<b>Gamma di frequenza</b>	<b>Campo E (V/m) (rms)</b>	<b>Campo B (<math>\mu</math>T) (rms)</b>
0.1 – 1 MHz	610	$2/f$
1 – 10 MHz	$610/f$	$2/f$
10 – 400 MHz	61	0.2
400 – 2000 MHz	$3\sqrt{f}$	$0.01\sqrt{f}$
2 – 300 GHz	140	0.45

## 2.4.3 - Esposizione simultanea a molteplici contributi a frequenze diverse

L'esposizione simultanea a campi con molteplici componenti spettrali a frequenze diverse si può presentare se più sorgenti indipendenti contribuiscono all'esposizione nel sito considerato, oppure quando è coinvolta una sorgente con forma d'onda complessa. Per affrontare questa situazione, le linee guida ICNIRP propongono un approccio basato sulla definizione di un apposito **indice**, mediante in quale tenere conto sia del contenuto spettrale del segnale considerato, sia della variazione con la frequenza dei livelli di riferimento con cui ci si vuole confrontare. Il valore dell'indice indicherà il rispetto o la violazione dei livelli stessi, se risulterà rispettivamente inferiore o superiore all'unità (o al 100%, se si adotta la formulazione percentuale). L'algoritmo adottato per il calcolo di questo indice tiene conto del fatto che gli effetti termici sono legati alla potenza assorbita (e quindi al quadrato delle intensità dei campi) e non risentono delle relazioni di fase intercorrenti tra le varie componenti spettrali. L'indice deve essere calcolato nel dominio della frequenza, riportando il

quadrato dell'ampiezza efficace di ciascuna componente spettrale del campo con il quadrato del rispettivo livello di riferimento ICNIRP e sommando poi tutti i rapporti così costruiti. In formule, supponendo di avere a che fare con un campo elettrico E, l'indice per gli effetti termici  $I_{TERM}$  è espresso da:

$$I_{TERM} = \sum_f \left[ \frac{E_{rms}(f)}{E_L(f)} \right]^2 \quad (3)$$

Nell'espressione (3),  $E_{rms}(f)$  è il valore efficace della componente spettrale del campo alla frequenza  $f$  e  $E_L(f)$  è il rispettivo livello di riferimento ICNIRP.

## 2.5 - Note integrative sulle disposizioni legislative nazionali

### 2.5.1 - I Decreti del Presidente del Consiglio dei Ministri del luglio 2003

I due DPCM promulgati nel luglio 2003 precisano i concetti espressi nella legge quadro 36/2001 e stabiliscono un quadro di prescrizioni specifiche che valgono solo per la popolazione e per due particolari classi di sorgenti, cioè gli elettrodotti e le sorgenti riconducibili ai sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi. Per le esposizioni a sorgenti non comprese in queste due classi, i DPCM del 2003 rimandano esplicitamente alle prescrizioni della Raccomandazione Europea 1999/519, che a sua volta – come si è detto più volte – si riferisce alle linee guida ICNIRP del 1998.

I limiti di esposizione definiti nei DPCM del 2003 tengono conto sia degli *effetti a breve termine* dei campi elettromagnetici – attraverso la definizione dei *limiti di esposizione* – sia dei possibili *effetti a lungo termine*, mediante i cosiddetti *valori di attenzione ed obiettivi di qualità*. Questi ultimi due si applicano dove sono possibili esposizioni di durata maggiore di 4 ore giornaliere, rispettivamente nel caso delle situazioni esistenti al momento dell'entrata in vigore del decreto e di quelle che si sono venute (o si verranno) a creare successivamente, per esempio a causa della costruzione di una nuova infrastruttura. Le tabelle che seguono riepilogano i valori limite da essi prescritti.

**Tab. 11:** riepilogo dei valori limite specificati nel DPCM 8 luglio 2003 per i campi elettrici e magnetici dispersi dagli elettrodotti; il valore di attenzione e l'obiettivo di qualità sono da intendere come "mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio".

	<b>Campo E (V/m) (rms)</b>	<b>Campo B (<math>\mu</math>T) (rms)</b>
<b>Limite di esposizione</b>	5000	100
<b>Valore di attenzione</b>		10
<b>Obiettivo di qualità</b>		3

**Tab.12:** riepilogo dei valori limite specificati nel DPCM 8 luglio 2003 per i campi elettromagnetici dispersi dagli impianti fissi di telecomunicazione e radiotelevisivi.

	<b>Frequenza</b>	<b>Campo E (V/m) (rms)</b>	<b>Campo H (A/m) (rms)</b>	<b>Densità di potenza (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Limite di esposizione</b>	0.1 – 3 MHz	60	0.2	
	3 – 3000 MHz	20	0.05	1
	3 – 300 GHz	40	0.1	4
<b>Valore di attenzione</b>	0.1 MHz – 300 GHz	6	0.016	0.1 $f \geq 3$ MHz
<b>Obiettivo di qualità</b>	0.1 MHz – 300 GHz	6	0.016	0.1 $f \geq 3$ MHz

### 2.5.2 - Il Decreto Legislativo 81/2008

Il Decreto Legislativo 81/2008 "Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro" contiene, al titolo VIII, specifiche norme di tutela della salute dei lavoratori esposti agli agenti fisici. Il titolo VIII è strutturato in "capi", dei quali il primo (capo I) presenta le disposizioni generali riguardanti la protezione dall'esposizione ad agenti

fisici, mentre i successivi riguardano rispettivamente il rumore (capo II), le vibrazioni (capo III), i campi elettromagnetici (capo IV) e le radiazioni ottiche artificiali (capo V). Il capo I è pienamente in vigore dal 1° gennaio 2009 e prescrive (all'art.181) l'obbligo per il datore di lavoro di effettuare la valutazione del rischio derivante dall'esposizione a qualunque agente fisico, compresi i campi elettromagnetici. Esso prevede inoltre che il datore di lavoro identifichi le misure di prevenzione e protezione da mettere in atto per minimizzare tale rischio, qualora effettivamente presente. Queste prescrizioni sono anche sanzionabili ai sensi del successivo capo VI. Per il capo IV, che contiene le disposizioni specifiche sui campi elettromagnetici ed i relativi limiti di esposizione, è stata invece prevista, sin dall'inizio, una entrata in vigore differita, che è stata poi ulteriormente ritardata nel corso degli anni. Attualmente ci si trova in una situazione transitoria, in quanto il D.Lgs. 81/2008 fa riferimento alla Direttiva Europea 2004/40 e alle sue successive modificazioni, l'ultima delle quali ne spostava l'entrata in vigore al 31 ottobre 2013. Tuttavia la nuova Direttiva Europea 2013/35, che dovrà essere recepita negli ordinamenti nazionali entro il 1° luglio 2016, ha abrogato la direttiva precedente. Sarà quindi il recepimento della nuova direttiva ed il conseguente adeguamento del capo IV a determinarne la data di entrata in vigore. Fino a tale data, pur sussistendo l'obbligo della valutazione del rischio sancito dal capo I, le disposizioni del capo IV non si applicano e non sono sanzionabili. Tuttavia, l'obbligo di effettuare la valutazione del rischio rende indispensabile la determinazione dei livelli di esposizione ed il loro confronto con limiti normativi che possano essere considerati autorevoli. Ciò implica la scelta della normativa alla quale fare riferimento. Come si è già osservato in precedenza, l'imminenza della scadenza dei termini per il recepimento della Direttiva 2013/35 suggerisce di riferirsi da subito alle prescrizioni in essa contenute.

### **2.5.3 - Disposizioni specifiche per lavoratori portatori di protesi o dispositivi elettronici impiantati**

Un lavoratore portatore di un dispositivo medico (come per esempio un *pacemaker*) o di una protesi impiantata è da considerarsi, in generale, come *lavoratore particolarmente sensibile al rischio* (art.183 del D.Lgs. 81/2008) e deve pertanto essere trattato individualmente, prendendo in considerazione la sua situazione specifica e le caratteristiche pertinenti (in particolare il grado di immunità elettromagnetica) del dispositivo impiantato.

Occorre infatti ricordare che il rispetto dei livelli di riferimento per la popolazione non garantisce in assoluto l'assenza di effetti indiretti, come riportato sia nelle linee guida ICNIRP del 1998, sia nelle premesse della Raccomandazione Europea 1999/519.

Sono state recentemente pubblicate due norme tecniche riguardanti la valutazione del rischio da esposizione a campi elettromagnetici per i lavoratori portatori di dispositivi medici impiantabili; la prima di esse (EN 50527-1) ha validità generale, mentre la seconda (EN 50527-2-1) si applica in modo specifico ai portatori di pacemaker. In queste norme si assume, in linea di massima, che i dispositivi impiantati funzionino correttamente fintantoché sono rispettati i livelli di riferimento per la popolazione definiti nelle linee guida ICNIRP del 1998, ma non si esclude che in alcune situazioni particolari possano avvenire interazioni significative anche per livelli di campo inferiori, confermando così la necessità di una valutazione individuale.

La norma EN 50527-1 riporta una tabella dei luoghi di lavoro e delle attrezzature conformi ed una seconda tabella delle attrezzature potenzialmente interferenti. Le due tabelle, pur riprendendo quelle della norma EN 50499, aggiungono considerazioni e note specifiche per i portatori di dispositivi medici impiantati. Esempi di sistemi potenzialmente interferenti, che possono essere presenti anche in ambito ferroviario, sono i motori elettrici, i sistemi radiotrasmettenti, i telefoni cellulari.

La norma EN 50527-1 propone inoltre una procedura approfondita di valutazione, da adottare nel caso in cui si verificano condizioni diverse da quelle riportate nella tabella delle situazioni conformi. Essa infine elenca una serie di misure di tutela volte a ridurre il rischio di interferenze; tra di esse figurano per esempio fornire una corretta informazione ai lavoratori, apporre un'adeguata segnaletica di avviso e/o predisporre percorsi alternativi in prossimità delle sorgenti di campi elettromagnetici potenzialmente interferenti.

## Parte II

### Contenuti tecnici

### 3 - La procedura di misura

#### 3.1 - Introduzione

Uno dei principali obiettivi con cui è stata sviluppata la procedura descritta in questo documento è consistito nel cercare di raggiungere il miglior compromesso tra la qualità della valutazione (intesa sia come completezza, sia come accuratezza) e l'onerosità complessiva della sua applicazione pratica.

Nel caso delle misure di induzione magnetica a frequenze basse ed intermedie (sicuramente l'agente fisico più rilevante tra i CEM a bordo treno), uno degli aspetti più onerosi è riconducibile alla modalità di acquisizione e trattamento dei dati prevista dagli standard tecnici, che richiede tempi di misura relativamente lunghi e non permette la visualizzazione in tempo reale di un indice di esposizione sintetico. Per questo secondo motivo è necessario eseguire le misure in un insieme di punti considerati rappresentativi in base ad una analisi a priori. Se i punti in questione vengono selezionati unicamente sulla base di criteri di tipo "topografico"<sup>1</sup>, ci si troverà quasi sicuramente a dover eseguire le misure in un grande numero di punti, nella maggioranza dei quali si riscontreranno poi livelli di esposizione trascurabili. L'ipotesi di scegliere i punti di misura sulla base dell'effettiva posizione delle sorgenti, sebbene ammessa dalla normativa tecnica, è spesso difficilmente perseguibile perché raramente si dispongono delle necessarie informazioni sui pertinenti aspetti tecnici dei rotabili.

In questa procedura si è pertanto ritenuto opportuno proporre un approccio articolato su **due livelli di indagine**.

**Nel primo livello** si effettuano misure, che chiameremo "*esplorative*", aventi l'obiettivo di valutare in modo rapido l'esposizione in un grande numero di punti ed individuare quelli nei quali ha senso procedere al livello successivo di indagine.

**Nel secondo livello**, si eseguono le misure secondo la procedura prevista dagli standard tecnici (misure che chiameremo "*puntuali*") ma lo si fa in un numero limitato di punti, scelti in base all'indagine preliminare del precedente livello di indagine,

L'articolazione in due fasi permette di evitare gli approfondimenti in caso di situazioni con bassi livelli di esposizione, mentre consente di rilevare informazioni esaurienti nel caso di situazioni più critiche. Una procedura di misura divisa in più fasi supplisce in definitiva alla mancanza di informazioni sull'effettiva dislocazione delle sorgenti e permette di eseguire misure approfondite in un numero di punti assai minore che nel caso in cui questi punti vengano fissati a priori. Così facendo – non ostante la maggior complessità dovuta all'articolazione della procedura in livelli – si ottiene un consistente risparmio di tempo.

Nei casi in cui non è immediato ricondursi al confronto del risultato della misura preliminare con uno specifico valore limite, l'approccio proposto richiede necessariamente l'utilizzo, per le misure esplorative, di strumenti che siano in grado di restituire a display un indice sintetico di esposizione.

La struttura modulare di questa procedura ne permette infine un'applicazione parziale ed in particolare permette di trascurare tutte quelle modalità di esposizione che gli standard tecnici attualmente in vigore considerano non vincolanti. D'altra parte la procedura propone un percorso anche per queste situazioni, al fine di far fronte sia a evoluzioni della normativa, sia ad eventuali esigenze di maggior completezza.

#### 3.2 - Tipologie di campo da misurare

In generale, le misure avranno per oggetto le **quattro** diverse tipologie di campo elencate sotto, ciascuna delle quali è considerata usando diverse modalità di misura e metodi di valutazione e conseguentemente diverse modalità di elaborazione dei risultati delle misure stesse. Nell'elenco che segue a ciascuna tipologia di campo è

---

<sup>1</sup> Cioè campionando opportunamente tutti gli spazi dei rotabili e in particolare quelli dove con certezza o alta probabilità staziona il personale di bordo.

associato anche un codice di tre lettere che sarà utilizzato nel seguito del documento per riferirsi a ciascuna di esse.

- **BST**: campo magnetico statico (EN50500).
- **BBF**: induzione magnetica a bassa frequenza (EN50500).
- **EBF**: campo elettrico a bassa frequenza.
- **EAF-BAF**: campo elettromagnetico ad alta frequenza (si usano due codici distinti per riferirsi alla componente elettrica EAF o alla componente magnetica BAF).

La norma EN50500 permette di escludere a priori dalle indagini sia EBF, sia EAF e BAF. Tuttavia, come già accennato, in questa procedura si considerano anche tali tipologie di campo, sia per permettere un effettivo riscontro delle ipotesi assunte nello standard CENELEC, sia per far fronte ad eventuali future modifiche.

Ai fini dell'applicazione della procedura qui delineata, si potranno quindi sia considerare valide le ipotesi formulate nella EN50500 sia procedere ad una verifica, anche solo minimale, dei livelli di esposizione al campo elettrico a bassa frequenza e al campo elettromagnetico ad alta frequenza.

D'altra parte, i risultati delle misure, riportati nei rapporti di prova allegati, confermano la scarsa rilevanza di EBF ed EAF, in considerazione della quale la norma tecnica CENELEC EN50500 indica come non vincolante l'esecuzione di questo tipo di misure.

È opportuno infine notare che dovrebbero essere considerate anche le correnti indotte negli arti e le correnti di contatto. In questo documento tuttavia non si prenderanno in considerazione anche in relazione alle evidenze riportate nella specifica Trenitalia TI.UTMR.CEM003.0 (par.3 pag.7).

Ciascun passaggio della procedura di misura sarà descritto evidenziando inizialmente gli aspetti generali e successivamente quelli specifici ad ogni tipologia di campo

### **3.3 - Articolazione in livelli**

Per ciascun tipo di campo sono previste quattro fasi di misura corrispondenti a un livello crescente di approfondimento. I primi due livelli sono mirati alla valutazione dell'entità della esposizione ai campi presenti nel rotabile, mentre il terzo ed il quarto livello possono eventualmente essere applicati qualora i primi due evidenzino superamenti dei pertinenti valori limite di campo. Questo documento si concentra sui primi due livelli descritti; il terzo e quarto, che qui sono descritti in termini generali, saranno se necessario approfonditi in successive appendici a questa procedura.

- **Livello 1 - misure esplorative**: si tratta di misure preliminari finalizzate alla determinazione dei punti nei quali procedere alle misure puntuali del livello successivo. I soli risultati delle misure esplorative non sono esaustivi dal punto di vista protezionistico ed assumono rilevanza solo insieme a quelli delle successive misure puntuali.
- **Livello 2 - misure puntuali**: si tratta delle misure più significative dal punto di vista protezionistico. Sono eseguite in un certo numero di punti fissati a priori più, eventualmente, in altri punti individuati durante le precedenti misure esplorative.
- **Livello 3 - misure per la zonizzazione**: sono misure che si possono effettuare qualora le misure dei precedenti livelli abbiano evidenziato dei superamenti e sono finalizzate a determinare le aree entro le quali i limiti sono effettivamente superati. Questo livello ha senso specialmente se è possibile interdire l'accesso a tali aree.
- **Livello 4 - misure per la dosimetria**: anche in questo caso si tratta di un livello necessario solo nel caso in cui il primo ed il secondo abbiano evidenziato dei superamenti. Le misure di livello 4 sono finalizzate infatti a determinare la distribuzione di campo che sarà poi utilizzata come dato di partenza ai fini del calcolo delle grandezze indotte internamente ad un modello numerico dell'organismo del soggetto esposto.

In generale ciascun livello è implementato diversamente per ciascuna tipologia di campo misurato.

Il campo statico può essere considerato un caso particolare in cui i primi tre livelli sostanzialmente coincidono. A rigori il quarto livello non si applica in quanto il campo magnetico statico può di fatto essere considerato una grandezza di base. Eventualmente il quarto livello dovrà essere preso in considerazione solo nel

caso si volessero o dovessero applicare le indicazioni relative al movimento in campo statico, con riferimento alle linee guida ICNIRP del 2014, dedicate a questo specifico argomento. È opportuno però notare che tali indicazioni non sono al momento recepite in alcun documento con valore giuridico.

**Tab.13:** le tipologie di valutazione e di misura vincolanti ed opzionali secondo la EN50500 e secondo questa procedura

Tipologia di campo	Codice	EN50500	Questa procedura	
			Misure esplorative	Misure puntuali
Magnetico statico	BST	Valutazione vincolante	Obbligatorie	
Magnetico a bassa frequenza	BBF	Valutazione vincolante	Obbligatorie	Obbligatorie in almeno un punto per ogni locale/ambiente del rotabile
Elettrico a bassa frequenza	EBF	Valutazione non vincolante	Consigliate	Solo nel caso di livelli significativi evidenziati durante le misure esplorative
Elettromagnetico ad alta frequenza	EAF-BAF			

Come già detto, secondo lo standard EN50500 sia il campo elettrico a bassa frequenza sia il campo elettromagnetico ad alta frequenza possono essere trascurati (par 4.1). Tuttavia, anche in relazione alle evoluzioni tecnologiche del materiale rotabile, non è possibile escludere a priori l'esistenza di casi in cui il campo ad alta frequenza o il campo elettrico a bassa frequenza siano confrontabili con i rispettivi limiti di esposizione. La procedura qui presentata, per far fronte a questo problema, prevede di effettuare inizialmente le sole misure esplorative e solo in presenza di livelli significativi di procedere con i livelli successivi.

Infine, per quanto riguarda l'induzione magnetica a bassa frequenza, si eseguiranno sempre le misure esplorative e le misure puntuali in almeno un punto per ogni locale in cui risulta suddiviso il rotabile. Le misure puntuali in ulteriori punti ed eventualmente i livelli di approfondimento successivi saranno applicati solo nei casi in cui i valori rilevati risultino significativi.

### 3.4 - *Classificazione e scelta dei punti di misura*

Come si è già avuto modo di accennare, uno degli scopi di questa procedura è quello di effettuare misure approfondite nel minor numero di punti possibile, senza che ciò pregiudichi la validità e la rappresentatività dei risultati.

Ai fini della descrizione della procedura, si distinguono le tre diverse tipologie di punti di misura, elencate nel seguito.

- Un insieme di punti fissati a priori (**punti A**, tipicamente i posti guida, l'eventuale postazione del capotreno oppure in prossimità di particolari sorgenti individuate a priori).
- Un limitato numero di eventuali punti aggiuntivi (**punti B**) nei quali eseguire le misure puntuali, scelti in base ai risultati di **misure di campo esplorative** (livello 1).
- Un'eventuale insieme di punti (**punti C**) che caratterizzano i livelli di campo in un volume in cui sono stati riscontrati valori di campo/indice tali da rendere necessari degli approfondimenti dosimetrici. Tali punti saranno individuati secondo uno schema spaziale predefinito, mirato alla successiva esecuzione dei calcoli dosimetrici.

Nell'elenco che segue si descrive brevemente in che modo ciascuna tipologia di punti è coinvolta nei diversi livelli di approfondimento.

- Durante le **misure esplorative (livello 1)** si mira alla caratterizzazione preliminare dei **punti A** e all'individuazione degli eventuali **punti B**. In particolare si effettuano misurazioni di una grandezza di riferimento nei **punti A** e si cercano eventuali punti aggiuntivi in cui si manifestano dei massimi locali della grandezza misurata (**punti B**).
- Durante le **misure puntuali (livello 2)** si eseguono misure approfondite, in un limitato numero di punti (di tipo A o B) scelti o individuati durante le misure esplorative. Inoltre, nel caso le misure esplorative abbiano evidenziato dei superamenti dei limiti di esposizione, si individua per ciascuno di essi un punto CM (quello in cui si verifica il massimo assoluto dell'esposizione) e si effettuano presso di esso misure analoghe a quelle effettuate nei punti A e B. Il punto CM si differenzia dai relativi punti A/B perché non è necessariamente caratterizzato dalle distanze dal piano di calpestio definite nella EN50500.
- Durante le **misure per la zonizzazione (livello 3)** ci si muove intorno ai **punti di tipo A e B** in cui le misure esplorative e le misure puntuali hanno evidenziato dei superamenti, cercando di determinare i confini delle aree all'interno delle quali avvengono i superamenti stessi.
- Le **misure per la dosimetria (livello 4)** caratterizzano la distribuzione di campo in un volume attraverso la misura del campo stesso in un insieme di punti (**punti C**) disposti secondo uno schema predefinito e localizzati presso un massimo locale della grandezza assunta come riferimento durante le misure esplorative.

### **3.4.1 - Criteri generali per la scelta dei punti di tipo A e B**

I criteri che vincolano la scelta dei punti di tipo A e B si ispirano a quelli definiti nello standard CEI EN 50500. Gli aspetti comuni rispetto allo standard sono quelli che riguardano le distanze dal piano di calpestio e dalle superfici in generale. Ci si discosta invece dallo standard quando non ci si riferisce all'ubicazione delle principali sorgenti di emissione del treno in quanto la conoscenza a priori della posizione di tali sorgenti non può in generale darsi per scontata. Come già accennato si ovvia al tale difetto di conoscenza prevedendo una fase preliminare di misure esplorative. D'altra parte le misure esplorative possono essere considerate come un surrogato dello studio dei dettagli costruttivi del rotabile considerato ed in tal senso organiche all'impianto della EN50500.

I criteri generali per la scelta dei punti A e B possono pertanto essere così riassunti.

- I punti devono essere situati in aree dove di solito gli addetti ai lavori possono trovarsi nelle normali condizioni di esercizio del treno.
- In generale i punti di tipo A sono quelli vincolati alle postazioni di lavoro, se ne esistono di ben definite. Sicuramente un punto (di tipo A) è posto in corrispondenza del posto di guida
- In aree accessibili da soli lavoratori, i punti di tipo A e B sono posti a 0.9 e 1.5 m dal piano di calpestio e ad almeno 0.3 m dalle pareti (EN 50500, par 4.2.1).
- In aree accessibili al pubblico i punti di tipo B sono posti a 0.3 0.9 e 1.5 m dal piano di calpestio e ad almeno 0.3 m dalle pareti (EN 50500, par 4.2.2).

### **3.4.2 - La definizione dei locali del materiale rotabile**

Ai fini della riduzione dei punti in cui effettuare approfondimenti ed elaborazioni la procedura prevede di suddividere il materiale rotabile in **locali** (o zone), dove per locale si intende un ambiente separato dagli altri da porte, divisori, rampe o scale. Gli esempi di applicazione della procedura riportati come allegati si riferiscono a due casi molto diversi da questo punto di vista. Il primo è un locomotore in cui la definizione dei locali è univoca e si distinguono chiaramente cabina, corridoio e vestibolo. Nel secondo caso, caratterizzato da superfici più ampie e spazi meno delimitati, sono invece stati individuati ben 9 locali. La definizione dei locali permette la riduzione del numero di punti in quanto, se non si verificano superamenti, saranno eseguiti approfondimenti in un solo punto per ciascuno di essi. In questa ottica è opportuno definire dei locali che non siano troppo piccoli,

per evitare la proliferazione di punti soggetti ad approfondimento e d'altra parte evitare locali troppo grandi che porterebbero ad una eccessiva perdita di dettaglio.

Nella definizione dei locali si tiene in conto anche della eventuale simmetria del materiale rotabile, in modo da non ripetere misure in locali considerabili come equivalenti. Ciò può essere utile anche per gestire gli eventuali cambi di banco durante le prove effettuate con materiale rotabile in condizioni dinamiche.

### **I punti di tipo A**

Come già detto, i punti di tipo A sono quelli corrispondenti a postazioni di lavoro ben definite. A titolo di esempio, nelle Fig.1 e Fig.2, si considera la struttura di una generica cabina di guida, nella quale i possibili punti di tipo A sono indicati con il prefisso CAB ed i numeri 5, 8, 23 e 26. I punti e la simbologia adottata sono ripresi dalle specifiche di misura Trenitalia dove sono stati considerati i soli punti corrispondenti alle postazioni di lavoro e che rispondono ai criteri sopra elencati. In particolare i punti CAB 5 e CAB 23 sono posti a 0.9 m da terra mentre i punti CAB 8 e CAB 26 sono posti a 1.5 m da terra.

Quando si parla di *possibili* punti di tipo A si intende che durante le misure puntuali non necessariamente si devono considerare tutti i quattro punti rappresentati nelle figure. Ad esempio si eseguiranno le misure esplorative nei quattro punti e, salvo che non si verifichino valori dell'indice di riferimento particolarmente intensi (si approfondirà questo aspetto per ogni tipologia di campo nel successivo capitolo dedicato alle misure esplorative), si eseguiranno misure approfondite solo in quello in cui si è misurato la massima esposizione.

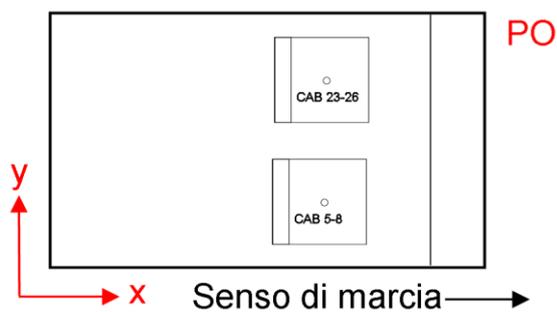


Fig.1: punti di tipo A in cabina di guida, piano orizzontale.

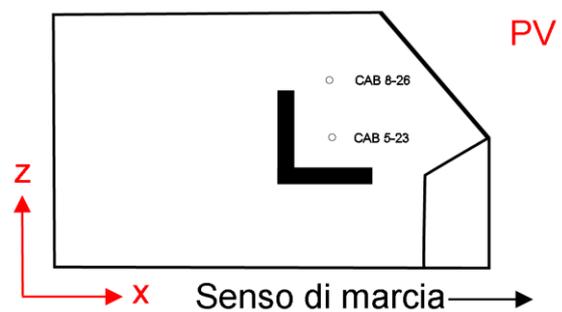


Fig.2: punti di tipo A in cabina di guida, piano verticale.

### **3.4.3 - I punti di tipo B**

I punti di tipo B non si riferiscono a postazioni di lavoro ben definite ma sono invece il frutto di una ricerca del massimo della grandezza misurata durante le misure esplorative. Sulla procedura di ricerca di tali punti torneremo in seguito quando parleremo di misure esplorative.

### **3.4.4 - I punti di tipo C**

Le misure nei punti di tipo C si effettuano nell'ultimo dei quattro livelli di approfondimento in cui si articola la procedura, cioè quello dedicato alla valutazione dosimetrica. In questo paragrafo ci si limita a descrivere in generale la disposizione spaziale dei punti e i criteri in base ai quali tale disposizione è stata scelta. Per i dettagli sulla esecuzione delle misure di quarto livello si rimanda ad eventuali documenti specifici.

### ***Il punto CM di massimo assoluto finalizzato ad un'analisi dosimetrica con campo omogeneo***

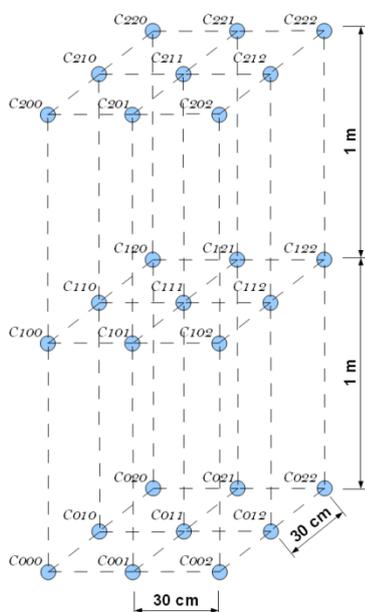
Si tratta del punto in cui si manifesta il massimo assoluto della grandezza misurata, localizzato in corrispondenza di un punto A o B in cui si è rilevato un superamento dei limiti normativi. Se ciò avviene, si individua il punto CM, cercando l'altezza dal piano di calpestio in corrispondenza della quale si ottiene l'indice massimo. Questo punto può riferirsi sia ad una postazione di lavoro (e quindi ad un punto di tipo A), sia ad un massimo locale del campo in zone di passaggio (e quindi ad un punto di tipo B). I punti CM dovranno comunque rispettare il vincolo di 30 cm dalle superfici interne del rotabile.

### ***I punti C finalizzati ad un'analisi dosimetrica con campo non omogeneo***

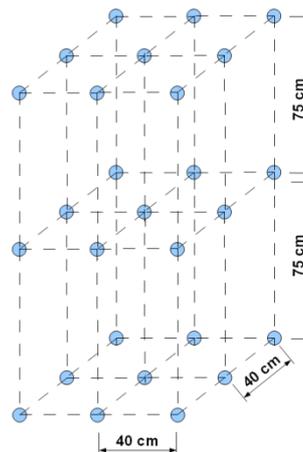
Come si può notare in Fig.3 e Fig.4, l'insieme dei punti di tipo C riferito ad una singola postazione di lavoro è composto da 27 punti di misura, suddivisi in 3 piani orizzontali, ciascuno dei quali contiene 9 punti. Ciascun punto è denominato con la sigla  $C_{ZYX}$  dove Z, Y e X sono tre indici interi compresi tra 0 e 2. L'indice Z individua il piano orizzontale a cui il punto appartiene (0 indica il piano più basso 2 il più alto) mentre gli altri due indici individuano la posizione del punto nel grigliato di 9 punti di ciascun piano.

I punti così disposti delimitano il volume entro il quale si suppone sia confinato il soggetto esposto del quale si vuole indagare l'esposizione per via dosimetrica. Per poter eseguire i calcoli dosimetrici a partire dai risultati delle misure nei punti di tipo C, è necessario ricostruire la distribuzione del campo in tutto il volume occupato dal lavoratore. Per questo motivo, è importante che il volume delimitato dai punti sia sufficientemente grande da contenere completamente il soggetto esposto.

D'altra parte, la distanza dei punti più bassi dal piano di calpestio e più in generale la distanza di qualsiasi punto dalle superfici più vicine dovrebbe essere superiore ad almeno 2 volte le dimensioni del sensore. Questo vincolo, nel caso di ambienti angusti, potrebbe portare a dover ridurre le distanze tra i punti rispetto a quelle raccomandate ed illustrate in Fig.3 e Fig.4. Per tali ragioni le misure di quarto livello dovrebbero essere eseguite con sensori più piccoli di quelli utilizzati durante le misure esplorative e di approfondimento.



**Fig.3:** griglia dei punti di tipo C nel caso di postazione di lavoro che comporta una postura eretta.



**Fig.4:** griglia dei punti di tipo C nel caso di postazione di lavoro che comporta una postura seduta.

### ***3.5 - Misure esplorative***

Le misure esplorative costituiscono il primo dei quattro livelli di approfondimento in cui si articola la procedura di misura qui presentata. Esse rivestono una grande importanza in quanto i risultati che si ottengono condizionano il percorso da intraprendere nelle fasi successive e più in generale perché la loro esecuzione rende meno stringente la necessità di uno studio a priori delle specifiche del particolare rotabile in prova.

Il risultato atteso da questa fase è la determinazione dell'insieme di punti in cui saranno eseguite le successive e più approfondite misure puntuali, cioè quelle da confrontare con i pertinenti limiti definiti dalla normativa. Insieme alla posizione dei punti, si registra il valore della grandezza misurata, anche se quest'ultimo non costituisce risultato della procedura di misura, ma solo un suo prodotto intermedio.

È necessario dedicare a questa fase particolare attenzione, sia durante la pianificazione della campagna - prevedendo tempi congrui - sia durante l'esecuzione delle misure.

Le misure esplorative devono essere eseguite per tutte le tipologie di campo indagate, misurando una grandezza scelta in modo tale da permettere un immediato confronto con i pertinenti limiti di esposizione. Questo vincolo, che è un requisito fondamentale per l'applicazione dell'intera procedura, assume particolare rilevanza nel caso in cui i limiti di esposizione siano variabili entro l'intervallo di frequenze interessato dalle misure. Come vedremo in seguito, in alcuni casi sarà necessario usare strumentazione dedicata, che fornisce un risultato pesato con i limiti, in altri si faranno invece ipotesi semplificative che permetteranno di confrontare una misura di campo con un valore limite fissato, anche in presenza di livelli di riferimento variabili con la frequenza.

Visto che la normativa definisce i limiti di esposizione per i lavoratori e per la popolazione generale, è necessario stabilire quale versione considerare durante le misure. L'approccio più corretto dal punto di vista normativo sarebbe quello di considerare i limiti di esposizione per i lavoratori se ci si trova in locali interdetti all'accesso del pubblico e adottare quelli per la popolazione in caso contrario. Tuttavia, specialmente nel caso in cui i livelli di esposizione siano molto bassi, al fine di evitare di misurare solo rumore può essere opportuno misurare l'indice più sensibile implementato dalla strumentazione, indipendentemente dal fatto che il locale del rotabile considerato sia o meno aperto al pubblico. Questo secondo approccio offre anche l'ulteriore vantaggio di non rendere necessario cambiare le impostazioni della strumentazione durante le misure esplorative.

Le misure esplorative non hanno, come si è detto, particolare rilevanza dal punto di vista protezionistico, infatti i valori significativi saranno determinati durante le misure puntuali e le successive elaborazioni. Tuttavia i risultati delle misure di primo livello hanno una notevole importanza nell'ambito della procedura in quanto è in base a questi che si decide il livello di approfondimento delle successive fasi. Inoltre, elaborando i risultati acquisiti negli stessi punti durante le eventuali successive misure puntuali, è possibile verificare se si ricavano indici di esposizione simili a quelli rilevati durante le misure esplorative. Se ciò accade si è indirettamente verificato che i risultati delle misure puntuali rappresentano la situazione verificatasi durante le misure esplorative, sulla base della quale sono stati scelti i punti in cui effettuare gli approfondimenti. È necessario però osservare che tale riscontro sarà possibile e significativo solo nei casi in cui le misure esplorative e quelle puntuali sono eseguite nelle stesse condizioni, con particolare riferimento al regime di marcia del rotabile.

Le misure esplorative riguardano inizialmente le **postazioni di lavoro** ben definite, come ad esempio i posti di guida o il banco riservato al capo treno in un vestibolo. Oltre a tali postazioni, in questa fase è necessario *esplorare* tutti i **locali** del rotabile. All'interno di ciascun locale si individuano poi tutte le **aree accessibili**, ovvero le aree in cui il lavoratore può accedere durante il normale esercizio del rotabile, anche se solo di passaggio. La distinzione tra locali e le aree in essi contenute è necessaria in particolar modo in ambienti come i corridoi di servizio di alcuni locomotori che, essendo molto lunghi, possono presentare al loro interno condizioni di esposizione differenziate.

Il diagramma a blocchi di Fig.5 descrive come si svolge una generica sessione di misure esplorative. Nel diagramma si indica con **IdR** (che sta per Indice di Riferimento) la grandezza misurata che, come si è detto, dipende dalla tipologia di campo indagata. Come si può notare nello schema, inizialmente si misura IdR in tutti i punti A corrispondenti alle postazioni di lavoro e si prende nota sia della posizione precisa del punto  $P_A$  sia del valore di IdR ivi misurato. Terminata la ricognizione delle postazioni di lavoro, si passa alla vera e propria *esplorazione*, cioè alla ricerca dei massimi della grandezza IdR nelle aree accessibili dei vari locali del rotabile. Nella ricerca dei punti B, si assumerà come riferimento il massimo valore di IdR determinato nei punti A, cosicché saranno considerati solo i punti B nei quali vale la prima parte della relazione (4). La seconda parte della espressione (4) sta a significare che si procederà comunque ad approfondimenti in tutti i punti in cui le misure esplorative determinano superamenti dei limiti di esposizione.

$$\left\{ \begin{array}{l} IdR_B > \max[ IdR_A ] \\ 1 \leq IdR_B \end{array} \right. \quad (4)$$

Nei casi in cui in un locale del rotabile non siano state individuate postazioni di lavoro si cercano i punti di massimo di IdR.

### ***Criteria per la riduzione del numero di punti di tipo A e B nei quali effettuare approfondimenti***

In generale sarà possibile che nello stesso locale si individuino più di un punto di massimo locale di IdR che soddisfi la condizione (4). Tuttavia, al fine di limitare il numero di punti nei quali eseguire le misure puntuali, sono stati previsti dei criteri secondo i quali è possibile scartarne alcuni (sia di tipo A sia di tipo B) che pure erano stati inizialmente considerati; nel seguito si elencano alcuni esempi di tali criteri.

- Per ogni punto determinato in pianta le misure esplorative selezionano uno ed un solo punto (di tipo A o B) corrispondente all'altezza dal piano di calpestio (scelta tra quelle ammissibili) in corrispondenza della quale si è misurato il maggior valore di IdR.
- Se i valori di IdR misurati sono inferiori all'unità, in genere si considera un solo punto di tipo A per ogni locale. Qualora nello stesso locale vi siano più postazioni di lavoro si considera il punto nel quale si è registrato il maggior valore di IdR.
- Si considerano comunque tutti i punti di tipo A e B nei quali si misura  $IdR > 1$ .
- Se i valori di IdR misurati sono inferiori all'unità, in genere si considera 1 punto di tipo B per ogni locale, tuttavia nel caso di locali articolati e ricchi di sorgenti nei quali vi siano più punti di massimo locale, si valuta caso per caso se considerare un solo punto oppure più di uno. Tale scelta può essere effettuata ad esempio sulla base delle seguenti considerazioni.
  - Se in un punto si misura un indice IdR significativamente più alto che negli altri nello stesso locale, allora si considera solo quello.
  - Se gli indici misurati in diversi punti dello stesso locale sono dello stesso ordine di grandezza si conservano tutti se si sospetta che le esposizioni possano essere provocate dalla vicinanza ad apparati diversi.

#### ***3.5.1 - Strumentazione di misura***

Trattandosi di misure per molti versi preliminari, per la loro esecuzione non è strettamente necessario rispettare in modo rigido tutti i requisiti definiti dalla normativa tecnica. D'altra parte, sarebbe opportuno che i risultati delle misure esplorative fossero confrontabili con quelli delle successive misure puntuali negli stessi punti. Ad esempio, durante le misure esplorative si potrà impugnare lo strumento, senza cavalletto, in tutti quei casi in cui ci si aspetta che la presenza dell'operatore influisca poco sul risultato della misura: in caso contrario, sarà indicato usare opportuni accorgimenti (cavalletti o prolunghe). Con riferimento alla ripetibilità dei risultati, sarebbe opportuno usare per le misure esplorative gli stessi sensori che si useranno poi per le misure puntuali.

#### ***3.5.2 - Regimi di corsa in condizioni dinamiche***

Le misure esplorative in condizioni dinamiche del rotabile non sono eseguite durante una corsa-tipo (massima accelerazione, mantenimento e massima decelerazione) come quella specificata nella norma EN50500; ciò nonostante, dovranno effettuarsi misure sia in fase di accelerazione sia in fase di frenatura, anche se in condizioni meno vincolanti di quelle previste dalla norma.

Durante tutte le prove effettuate, in condizioni dinamiche, nel corso delle campagne fin qui eseguite, i massimi dell'esposizione si sono manifestati in trazione o in frenatura, mentre in fase di coasting (mantenimento) i valori di campo o di indice sono sempre stati sensibilmente inferiori.

Conseguentemente, durante le misure esplorative in condizioni dinamiche si è data indicazione al personale di macchina di far muovere il rotabile secondo un regime di marcia nel quale la velocità oscilla tra due valori non troppo distanti (compatibili con la tratta percorsa, ad esempio tra 60 e 100 km/h o tra 100 e 150 km/h). Le oscillazioni dovrebbero avvenire sfruttando la massima trazione e la massima frenata elettrica supportate dal rotabile.

Durante la ricerca dei punti B, la durata del singolo ciclo di accelerazione/frenata dovrebbe essere sufficiente a esplorare un singolo locale ad altezza fissata dal piano di calpestio, tenendo presente che in ogni punto le misure dovrebbero caratterizzare sia la fase di accelerazione sia la frenata.

Durante le misure esplorative nei punti A, nei quali non si devono effettuare ricerche e lo strumento rimane fermo in ciascun punto per un intero ciclo accelerazione/frenata, può essere conveniente adottare cicli più brevi in modo da velocizzare le misure.

### 3.5.3 - Ordine di esecuzione delle prove in relazione alle tipologie di campo

Tutte le prove effettuate hanno confermato che la tipologia di campo che da luogo ai livelli di esposizione più vicini ai rispettivi limiti è BBF (induzione magnetica a bassa frequenza). Di conseguenza è spesso conveniente eseguire prima le misure esplorative di BBF, per poi proseguire con BST e poi, con ordine indifferente, con EBF, EAF/BAF.

Nei casi in cui, nei locali nei quali non sono definite postazioni fisse di lavoro, le misure esplorative di BST e delle altre tipologie di campo non evidenzino livelli di esposizione significativi, possono essere utilizzati come punti B quelli precedentemente determinati per BBF. Così facendo si intende contrastare l'inutile proliferazione di punti ed il conseguente appesantimento della reportistica.

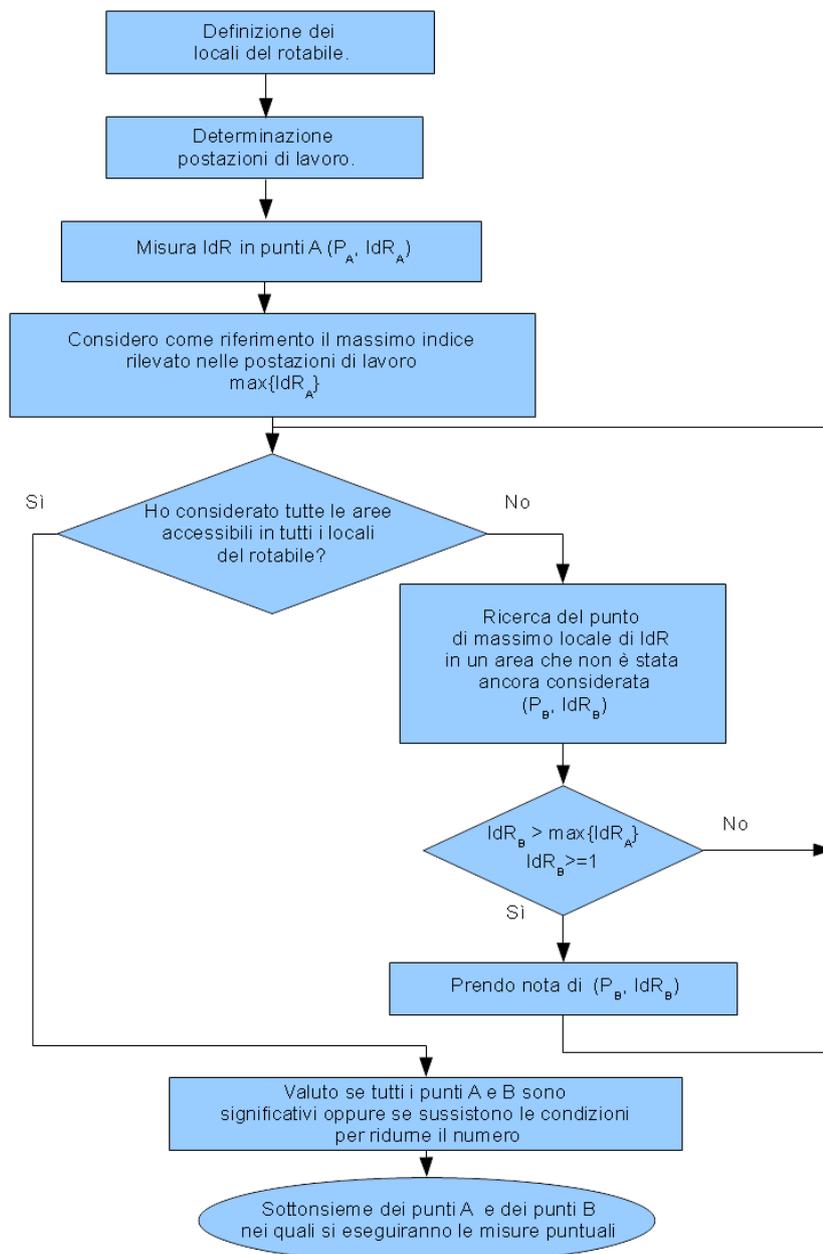


Fig.5: diagramma di flusso di una generica sessione di misure esplorative.

Nei seguenti paragrafi si elencano per punti le specificità delle misure esplorative per ciascuna tipologia di campo considerata.

### 3.5.4 - *BBF (valutazione vincolante ai sensi della EN50500)*

- Grandezza misurata: indice determinato secondo il metodo del *picco ponderato* (indice WP). Si tratta di uno dei due metodi di valutazione previsti dallo standard EN50500, in particolare nel paragrafo 5.3.2.2. Questo metodo può essere implementato sia nel dominio della frequenza sia nel dominio del tempo; lo standard EN50500 si riferisce alla seconda soluzione, che è anche quella generalmente implementata nella strumentazione di misura. L'altro metodo previsto dalla EN50500 (metodo FFT, descritto nel paragrafo 5.3.2.1) non è invece adatto per essere utilizzato nelle misure esplorative, poiché richiede l'acquisizione delle forme d'onda dell'induzione magnetica e la loro successiva elaborazione, cosa che difficilmente può essere effettuata contestualmente alla misura.
- Modalità di raccolta dei dati: valori riportati in appositi moduli cartacei o elettronici.
- Limiti di riferimento: per i motivi già spiegati nella parte dedicata alla normativa, ci si riferisce agli indici di esposizione che integrano i limiti definiti nella Direttiva EU2013/35.
- Banda di frequenza.
  - Limite superiore. L'intervallo di frequenze entro il quale devono essere considerati gli effetti di stimolazione ha un limite superiore pari 10 MHz. D'altra parte la norma EN50500 permette di limitare l'analisi a 20 kHz. La strumentazione attualmente disponibile sul mercato per queste applicazioni invece ha una banda passante limitata a frequenze dell'ordine delle centinaia di kHz. Pur essendo accettabile qualsiasi valore superiore a 20 kHz, si consiglia di effettuare le misure esplorative con la più ampia banda disponibile.
  - Limite inferiore. Gli effetti di stimolazione si riferiscono a frequenze superiori ad 1 Hz. La norma EN50500 giustificerebbe l'esclusione dell'intervallo 1-5 Hz dal campo di analisi. Si consiglia di utilizzare il più piccolo limite inferiore di banda supportato dalla strumentazione utilizzata, che è dell'ordine di uno o più hertz per quella attualmente disponibile sul mercato.
- Caratteristiche del sensore: isotropo, possibilmente con superficie utile totale di 100 cm<sup>2</sup> (ai fini di verifica è utile soddisfare questo requisito che è vincolante per l'esecuzione delle misure puntuali).
- Dinamica dello strumento: 0.05% – 200%
- Modalità di impiego: è possibile effettuare le misure con lo strumento impugnato.

### 3.5.5 - *BST (valutazione vincolante ai sensi della EN50500)*

- Grandezza misurata: valore istantaneo dell'induzione magnetica.
- Modalità di raccolta dei dati: valori riportati in appositi moduli cartacei o elettronici.
- Limiti di riferimento: ci si riferisce ai limiti definiti nella Direttiva 2013/35<sup>2</sup> che possono essere riassunti come segue:
  - 400 mT per la popolazione;
  - 0.5 mT (3mT) è il valore oltre il quale si escludono rischi in casi particolari legati a portatori di dispositivi medici impiantati (ai pericoli dovuti a oggetti volanti);
  - 2 T per i lavoratori;
  - 8 T per i lavoratori, arti e esposizioni controllate;

---

<sup>2</sup> L'ICNIRP ha pubblicato nel 2014 le linee guida dedicate agli effetti provocati dal movimento di un soggetto in un campo magnetostatico. Queste nuove linee guida, brevemente descritte nella prima parte di questo documento, non sono state al momento recepite in atti con valore giuridico; per tale motivo, esse non sono state considerate nella stesura di questa procedura, che dovrà pertanto essere aggiornata se e quando il contesto normativo maturerà in tal senso.

- Banda di frequenza: 0-1 Hz.
- Caratteristiche del sensore: isotropo di dimensioni non specificate nella normativa.
- Dinamica dello strumento: 20 mT – 4T.
- Modalità di impiego: è possibile effettuare le misure con lo strumento impugnato. In condizioni statiche del rotabile è però conveniente, una volta individuato il punto di tipo A o B, effettuare una misura (con cavalletto, ad altezza normata) in modo da poterla utilizzare anche come misura puntuale.

### 3.5.6 - EBF (valutazione non vincolante ai sensi della EN50500)

- Grandezza misurata: indice WP. Valgono le stesse considerazioni fatte per l'induzione magnetica a bassa frequenza, anche se in questo caso lo standard EN50500 non impone di effettuare la valutazione.
- Modalità di raccolta dei dati: valori riportati in appositi moduli cartacei o elettronici.
- Valore limite di riferimento: valgono le stesse indicazioni date per l'induzione magnetica a bassa frequenza, salvo notare che le linee guida ICNIRP più recenti introducono livelli di riferimento mediamente più bassi di quelle precedenti.
- Banda di frequenza:
  - Limite superiore. L'intervallo di frequenze entro il quale devono essere considerati gli effetti di stimolazione ha un limite superiore pari 10 MHz. La limitazione a 20 kHz introdotta nella norma EN 50500 si riferisce alla sola induzione magnetica. La strumentazione attualmente disponibile sul mercato invece ha una banda passante limitata a frequenze dell'ordine delle centinaia di kHz. Si consiglia di effettuare le misure esplorative con la più ampia banda disponibile.
  - Limite inferiore. Gli effetti di stimolazione si riferiscono a frequenze superiori ad 1 Hz. Si consiglia di utilizzare il più piccolo limite inferiore di banda supportato dalla strumentazione utilizzata.
- Dinamica dello strumento: 0.05% – 200%
- Modalità di impiego: misure da effettuare usando un cavalletto di materiale isolante e mantenendo la massima distanza possibile tra strumento ed operatore. Durante la ricerca dei punti di massimo locale muoversi impugnando il cavalletto o un'apposita prolunga in materiale isolante.

### 3.5.7 - EAF e BAF (valutazioni non vincolante ai sensi della EN50500)

Per esposizioni ad alta frequenza si intendono quelle che danno luogo ad effetti di tipo termico, che si manifestano per frequenze maggiori di 100 kHz. I limiti di esposizione per la prevenzione degli effetti termici assumono i valori più bassi per frequenze comprese fra 10 e 400 MHz e questi valori sono costanti con la frequenza. È quindi opportuno confrontare con essi i valori rilevati durante le misure esplorative, per le quali potranno essere vantaggiosamente impiegate le sonde a larga banda. In questo modo, si introduce ovviamente un notevole margine di cautela, in quanto non è detto che la misura si riferisca ad un CEM con uno spettro prevalentemente contenuto nella banda 10 – 400 MHz. Inoltre, i valori limite previsti dalle normative si riferiscono a medie su 6 minuti, mentre le misure esplorative, per praticità, riguardano i valori efficaci misurati su intervalli di tempo dell'ordine del secondo o frazioni di secondo (a seconda della strumentazione utilizzata). Ciò introduce un ulteriore fattore di cautela, che può essere anche molto ampio nel caso di esposizioni intermittenti.

Poiché, infine, l'esposizione a campi ad alta frequenza a bordo treno può avvenire anche in zona di campo reattivo, il campo elettrico e il campo magnetico devono essere considerati agenti fisici indipendenti e misurati entrambi con sensori specifici. Per questo motivo, nel seguito si considerano separatamente la componente elettrica e quella magnetica. A tal proposito, la specifica Trenitalia TI.UTMR.CEM003.0 indica che l'unica misura significativa ad alta frequenza dovrebbe essere quella di campo magnetico a frequenze comprese tra 100 kHz e 30 MHz. Anche in considerazione di ciò, si è scelto di valutare la componente elettrica in un

intervallo di frequenze che comprende sia le esposizioni in regime reattivo, sia quelle in regime radiativo, con un limite superiore di frequenza determinato dalla strumentazione disponibile. Per quanto riguarda la componente magnetica, ci si può limitare a considerare solo le esposizioni in regime reattivo nella banda di frequenza indicata dalla specifica di misura Trenitalia citata sopra.

### **EAF**

- Grandezza misurata: se disponibile, usare strumentazione in grado di restituire una misura pesata con il limite. Alternativamente misurare il valore efficace del campo elettrico (tempo di media breve, i 6 minuti saranno considerati durante le eventuali misure puntuali).
- Modalità di raccolta dei dati: valori riportati in appositi moduli cartacei o elettronici.
- Limite di riferimento: se il risultato della misura non è già pesato con il limite, ci si riferisce ai valori più bassi nell'intervallo di frequenze di interesse dei livelli di azione della Direttiva 2013/35.
  - 61 V/m per i lavoratori;
  - 28 V/m per la popolazione.
- Banda di frequenza.
  - Teorica: 100 kHz-300 GHz.
  - Strumentazione: 100 kHz-alcuni GHz.
- Modalità di impiego: misure da effettuare usando un cavalletto di materiale isolante e mantenendo la massima distanza possibile tra strumento ed operatore. Durante la ricerca dei punti di massimo locale muoversi impugnando il cavalletto o un'apposita prolunga in materiale isolante.

### **BAF**

- Grandezza misurata: se disponibile, usare strumentazione in grado di restituire una misura pesata con il limite. Alternativamente, misurare valore efficace del campo magnetico o dell'induzione magnetica.
- Modalità di raccolta dei dati: valori riportati in appositi moduli cartacei o elettronici.
- Limiti di riferimento: se il risultato della misura non è già pesato con il limite, ci si riferisce ai valori più bassi nell'intervallo di frequenze di interesse dei livelli di azione indicati dalla Direttiva 2013/35.
  - 0.16 A/m o 0.2  $\mu$ T per i lavoratori;
  - 0.073 A/m o 0.92  $\mu$ T per la popolazione.
- Banda di frequenza: 100 kHz-30 MHz (la limitazione a 30 MHz si ispira alla specifica di misura Trenitalia, tutte le esposizioni che avvengono in regime radiativo sono già valutate con la componente elettrica).
- Modalità di impiego: misure da effettuare preferibilmente usando un cavalletto di materiale isolante e mantenendo la massima distanza possibile tra strumento ed operatore. Durante la ricerca dei punti di massimo locale muoversi impugnando il cavalletto o un'apposita prolunga in materiale isolante.

## **3.6 - Misure puntuali**

Le misure puntuali sono effettuate in un sottoinsieme dei punti  $P_A$  e  $P_B$  considerati durante le misure esplorative. Trattandosi di misure i cui risultati sono significativi dal punto di vista protezionistico, esse devono essere necessariamente svolte osservando le pertinenti norme tecniche.

Le misure puntuali, a differenza di quelle esplorative, non sono necessariamente di immediata interpretazione. Nel caso dell'induzione magnetica a bassa frequenza, ad esempio, è necessaria una elaborazione successiva alla misura per ottenere gli indici di esposizione desiderati. Infatti, durante le misure puntuali, si mira ad acquisire dati anche nell'ottica di una loro archiviazione, in modo che, se necessario, sia possibile elaborarli a

distanza di tempo, eventualmente riferendosi a limiti di sicurezza o metodi di valutazione differenti da quelli originariamente previsti.

L'archiviazione dei dati e la loro elaborazione fuori linea sono utilizzate per la tipologia di campo indicata come più critica dalla normativa, cioè quella che più probabilmente può dar luogo al superamento dei limiti. Per le altre tipologie, come vedremo, le misure puntuali possono essere simili alle misure esplorative (in alcuni casi si fanno coincidere le due fasi) e diventano più approfondite solo in caso siano presenti valori di campo vicini o superiori ai limiti.

### ***Punti di massimo assoluto in corrispondenza di eventuali superamenti (punti CM)***

Qualora in uno o più punti A e/o B individuati, l'indice di riferimento IdR superi l'unità, è opportuno considerare delle azioni aggiuntive finalizzate alla ricerca del punto di massimo assoluto di IdR, detto  $P_{CM}$  nel seguito, svincolandosi dalle altezze dal piano di calpestio previste dalla normativa tecnica.

Le misure in  $P_{CM}$  sono utilizzate per stabilire il livello massimo di esposizione da utilizzare in analisi dosimetriche semplificate che considerano il soggetto esposto ad una distribuzione di campo, omogenea nello spazio, con intensità pari a quella rilevata nel punto  $P_{CM}$  stesso.

La ricerca dei punti CM si effettua contestualmente alle misure puntuali, considerando l'indice di esposizione IdR misurato durante le prove esplorative. Una volta individuato il punto di massimo si procede ad effettuare la misura del campo come nel punto  $P_A/P_B$  corrispondente. In condizioni dinamiche le misure si devono riferire ad una corsa tipo del rotabile.

La dosimetria con campo disomogeneo e le onerose misure necessarie ad eseguirla, saranno effettivamente necessarie solo se la dosimetria con campo omogeneo evidenzierà una non conformità ai valori limite di esposizione.

### **3.6.1 - BBF (valutazione vincolante ai sensi della EN50500)**

- Grandezza misurata: valore istantaneo dell'induzione magnetica.
- Modalità di raccolta dei dati:
  - acquisizione simultanea delle forme d'onda delle tre componenti cartesiane del campo (per esempio mediante sistema di acquisizione collegato ad uscite analogiche della strumentazione di misura);
  - sensore possibilmente orientato in modo da avere allineamento tra un asse di misura e la direzione delle rotaie.
  - frequenza di campionamento:
    - almeno in un punto (possibilmente quello in cui le misure esplorative hanno evidenziato il valore maggiore di indice), una acquisizione alla massima frequenza di campionamento supportata dal sistema di acquisizione, utilizzando il sensore di campo come filtro anti-aliasing. L'acquisizione dovrà rappresentare un tempo di osservazione più breve rispetto alle misure a regime, ma sufficiente per ottenere una risoluzione spettrale adeguata (ad esempio 1s);
    - in tutti gli altri punti del rotabile usare i parametri di misura definiti nella EN50500, cioè frequenza di campionamento superiore a 40 kS/s e durata dell'acquisizione variabile in funzione delle condizioni del rotabile;
  - durata dell'acquisizione:
    - rotabile in condizioni statiche: 30-60 s;
    - rotabile in condizioni dinamiche: acquisizione dell'intera corsa-tipo composta dalle seguenti fasi:
      - partenza da fermo fino alla massima velocità con massima accelerazione;
      - almeno 10 s a velocità massima costante;
      - decelerazione con massima frenatura elettrica fino all'arresto.

- NB: oltre alla eventuale registrazione delle forme d'onda del campo, annotare a parte l'intensità di picco del campo visualizzata sul display dello strumento (ai fini sia della verifica delle impostazioni dello strumento sia di validazione dei dati acquisiti).
- Caratteristiche del sensore: isotropo, triassiale, con superficie totale utile pari a 100 cm<sup>2</sup>.

### 3.6.2 - BST (valutazione vincolante ai sensi della EN50500)

- In generale le misure puntuali avvengono con le stesse modalità con cui sono state effettuate le misure esplorative.
- In condizioni statiche del rotabile si possono assumere validi i risultati delle misure esplorative.
- In condizioni dinamiche del rotabile le misure puntuali devono essere effettuate durante la corsa-tipo definita nella EN50500 (in un sottoinsieme dei punti P<sub>A</sub> e P<sub>B</sub>).
- In condizioni dinamiche del rotabile annotare in appositi moduli cartacei/elettronici:
  - massima intensità del campo in accelerazione;
  - massima intensità del campo in fase di mantenimento;
  - massima intensità del campo in fase di frenata;
  - se possibile memorizzare anche l'intensità del campo con treno fermo, anche per confronto/verifica con i risultati delle misure in condizioni statiche.

### 3.6.3 - EBF (valutazione non vincolante ai sensi della EN50500)

- Grandezza misurata: valore istantaneo del campo elettrico. Se non si dispone di strumentazione adeguata è possibile ricorrere ad una misura di indice, con tutte le limitazioni del caso (prime fra tutte quelle che ogni misura si riferirà ad un singolo limite di esposizione e che non sarà possibile determinare un indice diverso mediante elaborazione, se non ricorrendo ad approssimazioni).
- Modalità di raccolta dei dati: la norma 50500 si riferisce alla sola induzione magnetica: per omogeneità, sarebbe opportuno riferirsi ad essa per quanto riguarda frequenza di campionamento, durata delle acquisizioni ed allineamento degli assi di misura alle rotaie.

### 3.6.4 - EAF e BAF (valutazione non vincolante ai sensi della EN50500)

Nel caso sia necessario procedere a misure puntuali, l'obiettivo principale di queste sarà di comprendere quali sono le frequenze principali che caratterizzano lo spettro del campo. Per fare ciò è necessario procedere con misure cosiddette 'a banda stretta' ovvero che permettono di ricavare lo spettro del campo. Per raggiungere questo obiettivo è possibile utilizzare sia catene di misura complesse, i cui componenti principali sono un'antenna e l'analizzatore di spettro, sia sistemi portatili che integrano tali componenti in un unico strumento.

In questo contesto non si entra nei dettagli, anche perché si tratta del secondo livello di misure che già di per sé sono opzionali secondo la EN50500. Per approfondimenti sulle misure in banda stretta si rimanda alle pertinenti norme tecniche ed in particolare alla CEI 211-7.

## 3.7 - Misure per la zonizzazione

Le misure per la zonizzazione costituiscono il terzo livello di approfondimento della procedura di misura e sono messe in atto nel caso in cui nelle precedenti fasi della procedura sia stato evidenziato un superamento dei limiti. L'obiettivo di questa fase è quello di determinare i confini delle zone entro le quali uno specifico limite normativo è superato. Tale operazione è finalizzata ad un'eventuale restrizione all'accesso, che può essere parziale (interdizione al pubblico o a specifiche categorie di lavoratori) oppure totale. Qualora tale restrizione non fosse possibile è quindi inutile procedere alla zonizzazione e, a fronte dei superamenti, è necessario prendere altri provvedimenti.

In questo paragrafo si descrivono gli aspetti generali di questo livello di approfondimento entrando nel merito del solo caso relativo all'induzione magnetica a bassa frequenza. D'altra parte, per quanto riguarda il campo magnetico statico, le considerazioni generali dovrebbero essere sufficienti, anche perché le modalità di

misura non variano rispetto alle misure esplorative e puntuali. Inoltre, per quanto riguarda campo elettrico a bassa frequenza e campo elettromagnetico, non si è voluto appesantire questo documento con approfondimenti relativi ad agenti fisici che sia la norma EN50500, sia le specifiche Trenitalia indicano come di minor rilevanza.

L'approccio alla zonizzazione è stato introdotto nello standard EN50499 e può considerarsi adattabile sia a sorgenti ben definite e localizzabili, sia ad ambienti in cui coesistono diverse sorgenti e quindi difficilmente rappresentabili mediante modellazione matematica.

In questo contesto daremo per scontato di trovarsi nella seconda situazione cioè di non disporre di un modello individuale della sorgente di campo di interesse e conseguentemente di dover ricavare i confini delle zone mediante misure.

Con riferimento all'induzione magnetica a bassa frequenza e alle precedenti fasi di questa procedura, si potrà procedere alla determinazione delle 'zone' con due diversi approcci.

- Mediante misura diretta degli indici, con modalità analoghe a quelle delle misure esplorative.
- Mediante acquisizione delle forme d'onda delle componenti cartesiane del campo e determinazione dei confini delle zone in fase di elaborazione.

Il primo approccio ha il vantaggio di permettere una immediata determinazione delle distanze di rispetto e quindi delle zone in cui limitare l'accesso. Gli svantaggi sono legati principalmente (1) alla esecuzione di misure mirate alla determinazione di zone riferite ad un singolo indice e quindi alla necessità di ripetere le misure per considerarne più di uno, (2) alla disponibilità di strumentazione in grado di misurare tutti gli indici di interesse ed infine (3) alla impossibilità, se non con metodi approssimati, di riutilizzare i risultati delle misure in caso di modifiche alla normativa.

Il secondo approccio ha il vantaggio di permettere la determinazione di zone riferite a diversi indici, anche a posteriori, ma ha lo svantaggio di non permettere una diretta visualizzazione degli indici stessi, cosicché potrebbe risultare difficoltoso stabilire in quali punti (fino a quale distanza dalla sorgente o dai punti nei quali si verificano i livelli di esposizione maggiori) procedere con le acquisizioni.

Tuttavia è possibile anche un approccio, che può essere considerato un ibrido tra i due precedenti, secondo il quale:

- si esegue un'unica acquisizione del campo nel dominio del tempo (in genere nel punto in cui si è verificato il massimo locale;
- si elaborano le forme d'onda acquisite ed in particolare si calcolano i rapporti tra i diversi indici di esposizione di interesse;
- si eseguono misure puntuali di un unico indice, a varie distanze dal punto di massimo, determinando sia i confini della zona entro la quale avviene il superamento, sia l'andamento dell'indice nelle principali direzioni;
- si scalano le misure di indice supponendo che il campo sia caratterizzato in tutti i punti di misura dalle forme d'onda acquisite e quindi gli indici di esposizione siano caratterizzate dai mutui rapporti calcolati in precedenza a partire dalle acquisizioni stesse.

Indipendentemente dal particolare approccio utilizzato, le misure per la zonizzazione relative all'induzione magnetica a bassa frequenza saranno condotte rispettando i seguenti vincoli:

- si usano sensori con superficie totale pari a 100 cm<sup>2</sup> cioè che rispettano i requisiti della EN50500;
- si eseguono le misure ad una distanza fissata dal piano di calpestio tra quelle definite nella EN50500 per ambienti accessibili al pubblico (30, 90, 150 cm) o per ambienti accessibili ai soli lavoratori (90 e 150 cm): la particolare altezza scelta sarà quella del punto di massimo locale individuato durante le misure esplorative.

### **3.7.1 - Zonizzazione per locali**

È possibile effettuare una zonizzazione semplificata basandosi sui risultati delle misure puntuali, senza necessità di eseguire prove aggiuntive. In tal caso le zone definite dalla EN50499 corrispondono ai locali del rotabile e ciascun locale è caratterizzato dal massimo livello di esposizione misurato nei punti P<sub>A</sub>/P<sub>B</sub> in esso contenuti.

### 3.7.2 - Zonizzazione in condizioni dinamiche del rotabile

Durante l'esecuzione delle misure per la zonizzazione in condizioni dinamiche è necessario considerare sia la fase di accelerazione, sia quella di frenata. In tal caso è opportuno eseguire misure (di indice o di campo a seconda dell'approccio scelto) a distanze crescenti dal punto di massimo, dove ciascuna misura si riferisce ad un'intera corsa-tipo (massima accelerazione - mantenimento - massima frenata).

### 3.8 - Misure per la dosimetria con campo non omogeneo

Le misure per la dosimetria sono il quarto ed ultimo livello di approfondimento della procedura di misura. L'obiettivo di questa fase è quello di raccogliere i dati sulla distribuzione spaziale del campo nel volume in cui avviene un superamento dei limiti di esposizione. Tale distribuzione verrà poi utilizzata come termine noto durante l'esecuzione dei calcoli dosimetrici.

Come nel caso delle misure per la zonizzazione, ci si riferisce qui alla sola induzione magnetica a bassa frequenza.

È opportuno ricordare che, in caso di superamenti dei livelli di azione, può essere inizialmente effettuata una dosimetria meno onerosa in termini sia di misure, sia di calcoli. Tali analisi si riferiscono ad un campo con distribuzione spaziale omogenea, le cui componenti cartesiane assumono, istante per istante, le intensità delle componenti del campo acquisite nel punto  $P_{CM}$  corrispondente al superamento. La determinazione dei punti  $P_{CM}$  e le misure da effettuare presso di essi sono già state descritte nel paragrafo dedicato alle misure puntuali.

Nel seguito si elencano le modalità di esecuzione delle misure per la dosimetria.

- La disposizione dei 27 punti di misura che caratterizzano il volume di interesse è illustrata in Fig.3 e Fig.4.
- Il punto di massimo locale degli indici rilevato durante le precedenti fasi e in base al quale si è deciso di procedere agli approfondimenti dosimetrici, dovrebbe possibilmente giacere sull'asse verticale centrale del volume definito dai tre punti C011, C111 e C211.
- Visto che l'acquisizione completa delle forme d'onda in tutti i 27 punti previsti sarebbe molto onerosa, è possibile limitare l'acquisizione ad un sottoinsieme di punti, ad esempio:
  - nei soli tre punti C011, C111 e C211;
  - nel solo punto di massimo assoluto dell'indice.
- Negli altri 24/26 punti presso i quali non si effettuano acquisizioni complete si potrà procedere in due modi:
  - misurare il valore di picco del campo visualizzato sul display dello strumento;
  - misurare il valore di picco ed il corrispondente valore di ciascuna componente cartesiana del campo nell'istante di massima ampiezza. Nel caso lo strumento di misura utilizzato non fornisca sul display l'indicazione delle singole componenti, questa seconda ipotesi implicherebbe comunque l'acquisizione del campo.
- L'acquisizione delle forme d'onda deve riferirsi alle condizioni che, durante le precedenti fasi, hanno dato luogo ai massimi valori di indice di esposizione. Cioché, ad esempio, se i valori massimi sono stati ottenuti in fase di accelerazione, le acquisizioni potranno limitarsi a tale fase.
- Non si fissano a priori vincoli relativi alla durata dell'acquisizione; se sono state chiaramente individuate le condizioni che determinano il massimo dell'esposizione, allora l'acquisizione può essere limitata ad un intervallo di tempo che comprende l'evento, preceduto e seguito da un intervallo di acquisizione pari ad almeno un secondo.
- La frequenza di campionamento da utilizzare deve essere decisa in base ai risultati delle misure puntuali ed in particolare in base alle acquisizioni effettuate alla massima frequenza di campionamento possibile.
- I dettagli relativi ai calcoli dosimetrici non sono riportati in questo documento. Per una panoramica delle problematiche da affrontare e per degli esempi di applicazione ci si può riferire

ai due report citati tra la documentazione di riferimento insieme alle specifiche di misura Trenitalia.

### **3.9 - Quadro generale della procedura di misura.**

In questo paragrafo sono riportati dei diagrammi di flusso che illustrano in modo generale la procedura di misura per ciascun agente fisico considerato. I diagrammi comprendono anche gli eventuali possibili interventi di risanamento (blocchi in giallo), che sono riportati in quanto permettono una visione più generale e completa del contesto trattato.

#### **3.9.1 - BST (valutazione vincolante ai sensi della EN50500)**

Lo schema di Fig.6 rappresenta la procedura di misura del campo magnetico statico. La procedura non prevede dosimetria, perché i limiti di campo statico sono da considerarsi restrizioni di base. Come si può notare nel diagramma, le misure esplorative effettuate in condizioni statiche del rotabile coincidono con quelle puntuali. Le misure puntuali in condizioni dinamiche si differenziano da quelle esplorative in quanto le prime devono riferirsi necessariamente alla corsa-tipo del rotabile, condizione non richiesta durante le misure esplorative.

#### **3.9.2 - BBF (valutazione vincolante ai sensi della EN50500)**

Nel diagramma a blocchi di Fig.7 si rappresenta lo schema generale della procedura di misura riguardante l'induzione magnetica a bassa frequenza. Lo schema risulta più articolato di quello relativo al campo statico, in quanto comprende anche l'eventuale ricorso alla dosimetria.

Nel caso dell'induzione magnetica a bassa frequenza, le misure puntuali sono effettuate n almeno un punto per ogni locale individuato; ciò discende dalla necessità di attenersi alle prescrizioni della norma EN50500. Le misure puntuali consistono nell'acquisizione delle forme d'onda delle componenti del campo e la loro elaborazione consiste in un procedimento che in genere si effettua fuori linea.

Le misure per la zonizzazione e quelle per la dosimetria si intendono effettuate nelle condizioni del rotabile in cui si sono verificati i superamenti evidenziati durante le misure puntuali ed esplorative.

#### **3.9.3 - EBF, EAF, BAF (valutazioni non vincolanti ai sensi della EN50500)**

In Fig.8, in un unico diagramma, si rappresenta la procedura di misura nel caso del campo elettrico a bassa frequenza e di quello elettromagnetico ad alta frequenza.

La principale differenza rispetto ai casi precedenti consiste nel fatto che l'esecuzione delle misure puntuali è condizionata all'esito delle misure esplorative ed è quindi possibile che non sia necessario effettuare alcuna misura puntuale.

Per stabilire la soglia oltre la quale procedere al secondo livello di approfondimento ci si è riferiti alla norma CEI 211-7. Per quanto riguarda il campo elettromagnetico ad alta frequenza si è quindi ripreso direttamente tale norma e si fa in modo di procedere a misure puntuali (a banda stretta) se durante le misure esplorative (a banda larga) si supera il 75% dei pertinenti limiti di esposizione.

Per trasporre tale soglia a bassa frequenza si è tenuto presente che i limiti ad alta frequenza intendono proteggere dagli effetti termici i quali sono direttamente proporzionali alla potenza del campo incidente e quindi al quadrato della sua intensità. Perciò affermare che la soglia è del 75% in termini di intensità di campo è equivalente ad affermare che gli approfondimenti sono necessari se si supera circa il 55% dei corrispondenti limiti in termini di densità di potenza, che sono quelli direttamente connessi alle soglie degli effetti biologici.

A bassa frequenza (EBF), dove i limiti di esposizione intendono proteggere dall'insorgenza di fenomeni istantanei di stimolazione, si procede quindi alle misure puntuali se durante le misure esplorative si sono registrati valori che superano il 55% dei limiti in termini di campo (in quanto sono questi ultimi ad essere direttamente collegati agli effetti biologici dai quali i limiti intendono proteggere).

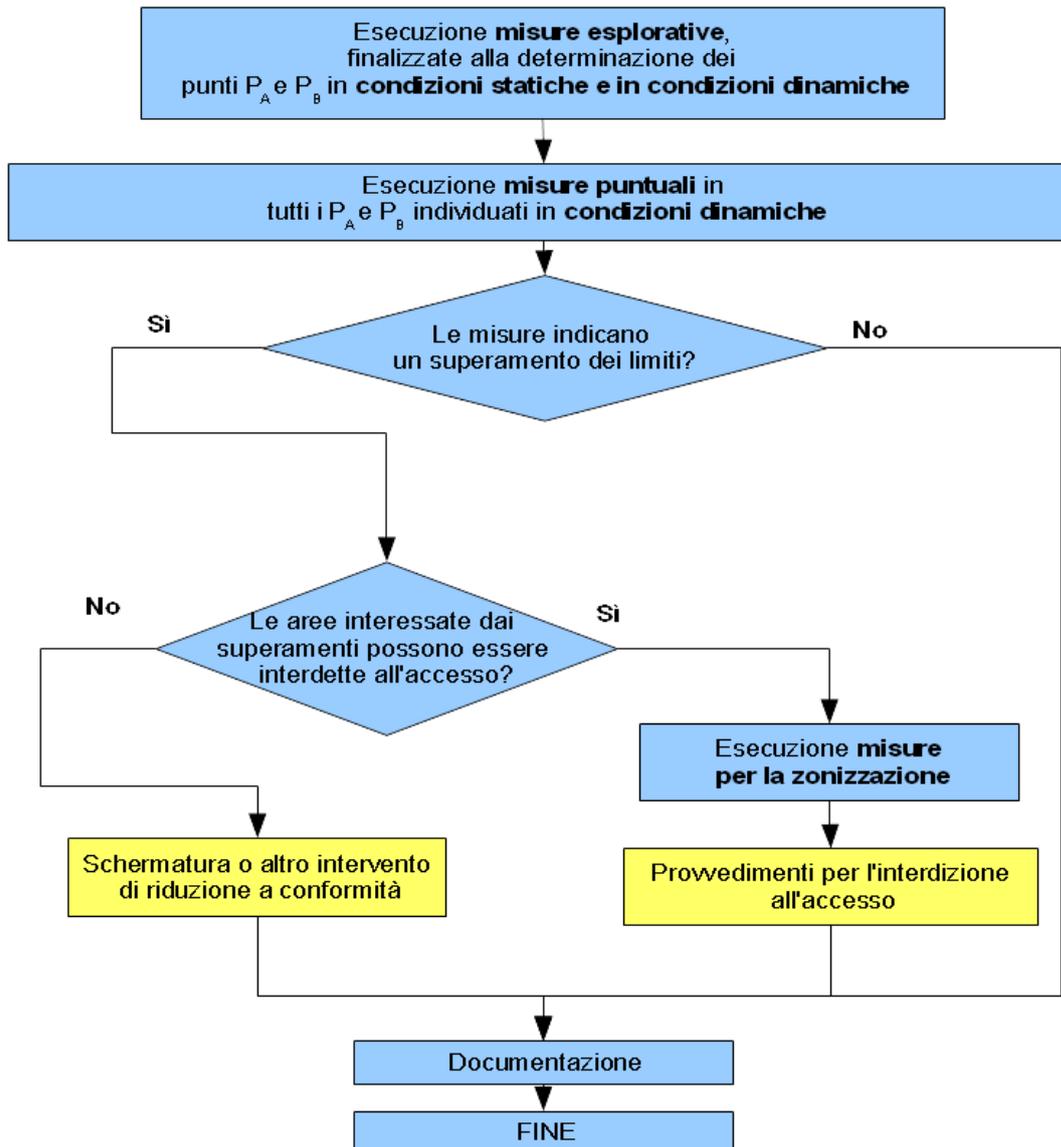


Fig.6: diagramma di flusso della procedura di valutazione del campo magnetico statico.

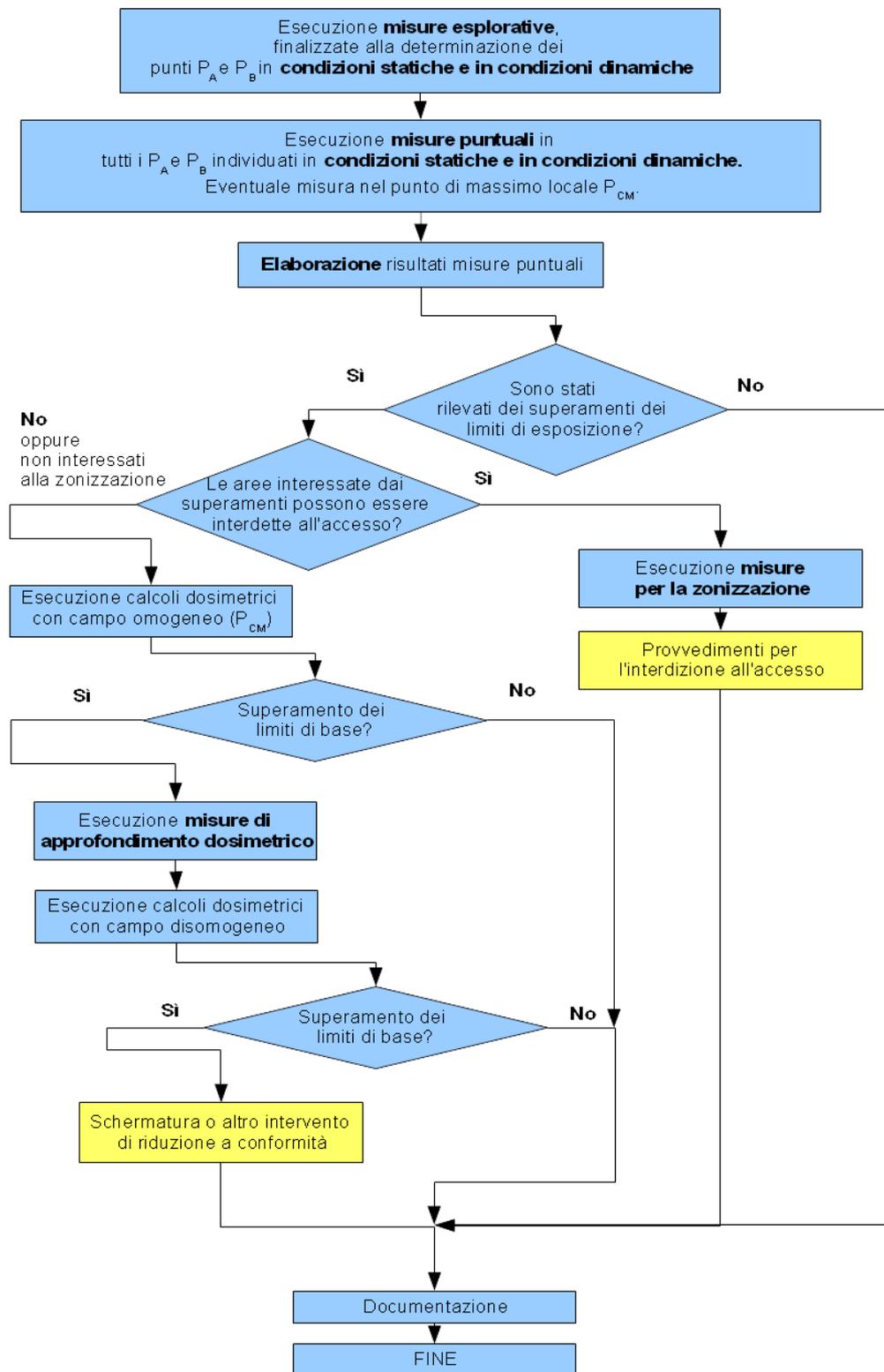
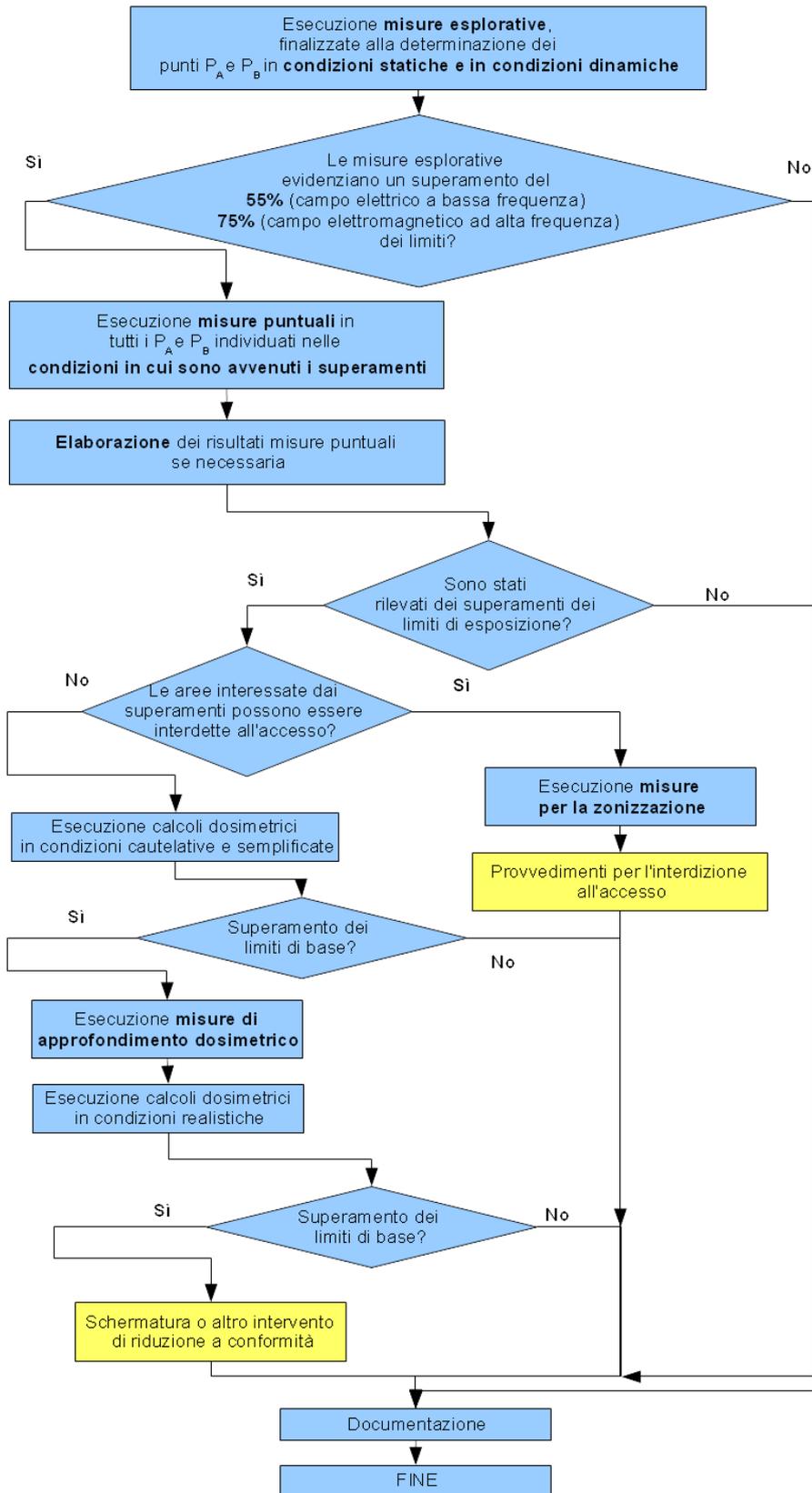


Fig.7: diagramma di flusso della procedura di valutazione dell'induzione magnetica a bassa frequenza.



**Fig.8:** diagramma di flusso della procedura di valutazione del campo elettrico a bassa frequenza e del campo elettromagnetico ad alta frequenza.

## 4 - Elaborazione dei risultati delle misure puntuali

In questo capitolo si presentano le elaborazioni necessarie per ottenere gli indici di esposizione a partire dai file dei campioni acquisiti durante le misure puntuali. Per i motivi già esposti in precedenza ci si limita al caso dell'induzione magnetica a bassa frequenza e agli indici riferiti agli effetti di stimolazione del sistema nervoso.

In generale, lo spettro dell'induzione magnetica misurabile a bordo di materiale rotabile è composto da più componenti significative ed essendo i limiti di esposizione variabili con la frequenza, è necessario determinare degli indici di esposizione che integrino in sé le caratteristiche degli spettri insieme all'andamento dei limiti. A questo fine, lo standard EN50500 indica due possibili approcci. Inizialmente si presenteranno in generale i pro ed i contro delle due metodologie e si spiegheranno le motivazioni che hanno spinto a sceglierne una delle due. In seguito si passerà alla descrizione di come è possibile determinare l'indice di esposizione secondo l'approccio scelto.

### 4.1 - Scelta del metodo di valutazione

Lo standard EN50500, nel caso dell'induzione magnetica a bassa frequenza, prevede due diversi metodi di valutazione. Il primo è basato sulla esecuzione di una trasformata di Fourier veloce (FFT, EN50500, par 5.3.2.1) e può essere ricondotto al *metodo standard* definito dalle linee guida ICNIRP del 1998. L'altro metodo invece viene introdotto come riferimento nel dominio del tempo e si riconduce direttamente al metodo del picco ponderato definito nelle successive linee guida ICNIRP.

In più incisi la norma indica come la valutazione nel dominio del tempo sia più immune a problemi nel caso particolare di fenomeni non periodici e/o impulsivi (EN50500 par. 5.3.2 e 5.3.2.2).

In questa procedura si è scelto di calcolare gli indici di esposizione usando il metodo del picco ponderato nel dominio del tempo. Tale scelta è giustificata, oltre che dalle argomentazioni della norma EN50500, citate precedentemente, anche da considerazioni aggiuntive, specifiche di questa procedura, brevemente esposte nel seguito.

Come si è visto, le misure esplorative di BBF si basano sulla misura dell'indice di picco ponderato, grazie anche dal fatto che sul mercato vi è disponibilità di strumenti che implementano tale metodo. Al contrario vi è carenza di strumentazione che implementa il metodo standard ICNIRP secondo le specifiche della norma EN50500. Di conseguenza per poter applicare tale metodo è necessaria l'acquisizione delle forme d'onda dell'induzione magnetica e la loro successiva elaborazione, cosa che difficilmente può essere effettuata in tempo reale, specialmente in un contesto di misura come quello di un rotabile. Di conseguenza, se si adotta l'indice del picco ponderato per l'elaborazione dei risultati delle misure puntuali, si ha anche la possibilità di confrontare i valori degli indici elaborati con quelli misurati nella fase precedente e quindi una indicazione della ripetibilità dei fenomeni acquisiti e più in generale della qualità delle misure.

### 4.2 - Possibili implementazioni del metodo del picco ponderato

Il metodo del picco ponderato può essere applicato sia nel dominio del tempo sia nel dominio della frequenza, come riportato anche nell'appendice delle linee guida ICNIRP del 2010 dal titolo "*Determination of the weighted peak exposure*".

Nel caso in cui si applichi il metodo nel dominio della frequenza, sorge un'ambiguità nella scelta delle risposte in ampiezza ed in fase delle funzioni peso applicate alle forme d'onda del campo. In particolare è possibile riferirsi sia a dei filtri ideali caratterizzati da risposte in ampiezza lineari a tratti e risposte in fase a gradini ('*piecewise linear*' nelle linee guida ed in Fig.9), sia a quelle continue che derivano dalle corrispondenti versioni 'analogiche' dei filtri ('*RC functions*' nelle linee guida ed in Fig.9). Nella Fig.9 si riporta un estratto delle linee guida ICNIRP in cui si rappresentano le risposte in ampiezza ed in fase secondo le due possibili opzioni, con riferimento ai limiti di base per il campo elettrico indotto.

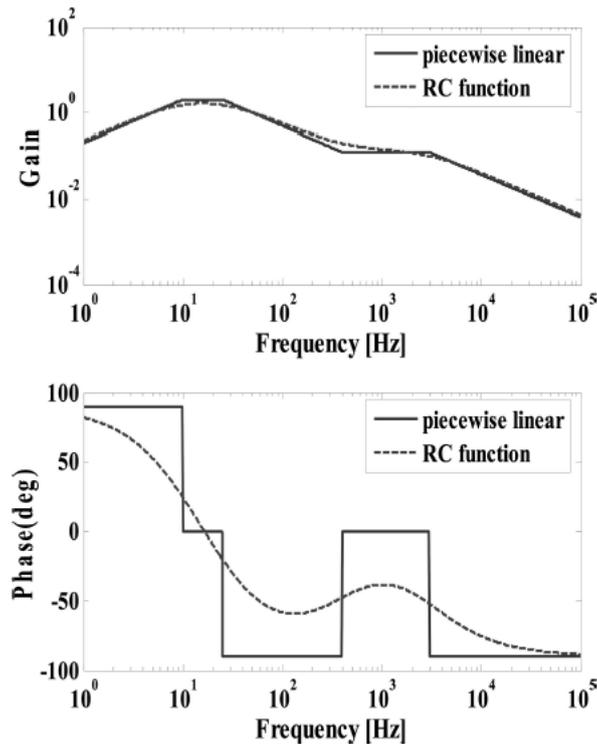


Fig. A1. Amplitude and phase response for the weighting of the induced electric field.

Fig.9: figura A1 estratta dalle linee guida ICNIRP del 2010

Se invece si sceglie di applicare il metodo del picco ponderato nel dominio del tempo è necessario utilizzare funzioni di peso continue in quanto le funzioni indicate come 'piecewise linear' (Fig.9) fanno riferimento a risposte di filtri ideali, definiti nel dominio della frequenza, che non possono essere realizzate se non determinando ed elaborando lo spettro delle forme d'onda.

Tuttavia, la norma EN50500 parla di "valutazione nel dominio del tempo" e non di "metodo del picco ponderato". Ciò elimina l'ambiguità relativa alla scelta delle risposte in ampiezza ed in fase dei filtri di cui sopra. Nel seguito si farà quindi riferimento alla versione analogica dei filtri, indipendentemente dal fatto che questi siano realizzati in hardware o in software, mediante tecniche digitali.

#### 4.3 - Implementazione del metodo del picco ponderato nel dominio del tempo

La descrizione generale del metodo del picco ponderato è riportata, oltre che nelle linee guida ICNIRP, nella prima parte di questo stesso documento; di seguito si presentano invece alcune considerazioni relative alla sua implementazione sotto forma di procedure software.

Per la descrizione delle tecniche usate ci riferiremo nel seguito ai livelli di riferimento per l'induzione magnetica e per i lavoratori definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010. Ciò da un lato è coerente con quanto indicato a proposito dell'elaborazione successiva alle misure puntuali, dall'altro le linee guida del 2010 descrivono il metodo del picco ponderato con maggiore precisione, eliminando alcune delle ambiguità che sorgono se si vuole applicare il metodo facendo riferimento alle linee guida del 1998 e al successivo *statement* ICNIRP del 2003.

Il punto di partenza è ovviamente costituito dai dati raccolti durante le misure puntuali, che consistono in insiemi di campioni che rappresentano il valore istantaneo delle tre componenti cartesiane dell'induzione magnetica nel punto di misura prescelto. L'acquisizione dei campioni delle tre componenti deve essere simultanea ed è effettuata con una frequenza di campionamento che, ai sensi della EN50500, deve essere superiore a 40 kS/s. La durata di ciascuna acquisizione e quindi anche il numero di campioni dipende dalle condizioni di prova. A titolo di esempio, supponendo di adottare la frequenza di campionamento di 40 kS/s ed una acquisizione di 30 secondi si ottengono 1,2 milioni di campioni per ciascuna componente cartesiana.

Per applicare il metodo del picco ponderato alle forme d'onda dell'induzione magnetica acquisite durante le misure puntuali è necessario realizzare dei programmi che eseguono le seguenti operazioni:

1. elaborano i campioni misurati di ciascuna componente cartesiana dell'induzione magnetica e restituiscono una nuova sequenza di campioni che rappresenta l'andamento nel tempo dell'indice di esposizione relativo alla componente considerata;
2. determinano, istante per istante, la somma vettoriale dei tre indici relativi alle diverse componenti cartesiane;
3. determinano il massimo dell'indice complessivo di cui al precedente punto nell'intervallo di tempo considerato, tenendo conto degli eventuali artefatti introdotti dai filtri (con particolare riferimento al transitorio iniziale dei filtri stessi, trattato in appendice).

In relazione al primo dei tre punti sopra elencati è necessario che le operazioni effettuate sui campioni riproducano le funzioni di trasferimento in ampiezza e fase dei filtri analogici corrispondenti ai livelli di riferimento considerati, che possono essere realizzati in hardware con circuiti composti da resistenze, condensatori e amplificatori operazionali. Nei successivi paragrafi si descriveranno inizialmente le caratteristiche del filtro analogico scelto come riferimento e successivamente le tecniche utilizzate per trasformarlo in un filtro realizzato in software, in grado di operare su forme d'onda campionate.

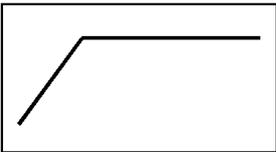
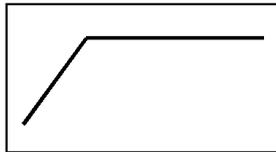
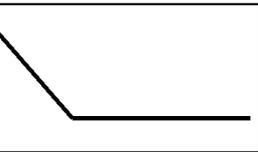
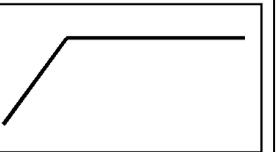
**4.3.1 - Descrizione del filtro ICNIRP analogico**

Le funzioni di trasferimento di filtri analogici sono in genere definite mediante la trasformata di Laplace. Il filtro analogico che rappresenta l'inverso dei livelli di riferimento occupazionali per l'induzione magnetica secondo le linee guida ICNIRP del 2010 è caratterizzato dalla funzione di trasferimento ingresso-uscita di equazione (5), completata dai parametri riportati in

Tab.14. Questa funzione rappresenta il rapporto tra la trasformata di Laplace della forma d'onda dell'indice in uscita  $WPB10occ(s)$  e quella della induzione magnetica in ingresso  $B(s)$ .

$$H_c(s) = \frac{WPB10occ(s)}{B(s)} = A_f \frac{s^2(s+c)}{(s+a)(s+b)(s+d)} \tag{5}$$

**Tab.14:** parametri della funzione di trasferimento del filtro ICNIRP analogico relativo ai livelli di riferimento occupazionali per l'induzione magnetica definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010

			
$f_1 = 8Hz$	$f_2 = 25Hz$	$f_3 = 300Hz$	$f_4 = 3000Hz$
$a = 2\pi \cdot f_1$	$b = 2\pi \cdot f_2$	$c = 2\pi \cdot f_3$	$d = 2\pi \cdot f_4$
$\frac{s}{s+a}$	$\frac{s}{s+b}$	$\frac{s+c}{s}$	$\frac{s}{s+d}$
$A_f = \frac{1}{10^{-4} \cdot \sqrt{2}}$			

**4.3.2 - Descrizione del filtro ICNIRP discretizzato (numerico)**

Per poter essere applicato a sequenze di campioni come quelle acquisite durante le misure puntuali, il filtro analogico deve essere opportunamente "discretizzato". Per descrivere i filtri numerici, in grado di elaborare sequenze discrete di campioni si usa la cosiddetta trasformata Z. Vi sono più metodi per ottenere la trasformata Z della funzione di trasferimento di un filtro discretizzato a partire dalla trasformata di Laplace che

rappresenta il corrispondente filtro analogico. I criteri che possono guidare nella scelta dipendono dall'utilizzo che si intende fare del filtro. In questo particolare caso i criteri che hanno guidato la scelta possono essere riassunti come segue.

- La risposta in ampiezza del filtro numerico deve ricalcare quanto più possibile quella del filtro analogico. A questo proposito si ricorda che le linee guida ICNIRP del 2010 indicano che il massimo scostamento del filtro adottato rispetto alla curva lineare a tratti del filtro ideale, deve essere limitato a 3 dB.
- La risposta in fase del filtro numerico deve ricalcare quanto più possibile quella del filtro analogico. A questo proposito si ricorda che le linee guida ICNIRP indicano che il massimo scostamento rispetto alla curva a gradini del filtro ideale deve essere limitato a 90 gradi.

Per la discretizzazione dei filtri ICNIRP sono state prese in considerazione varie tecniche e alla fine la scelta è caduta su quella denominata "match poli-zero", che ha dato i migliori risultati in termini dei criteri sopra elencati.

La versione numerica del filtro analogico descritto nel precedente paragrafo ha una funzione di trasferimento rappresentata dalla trasformata Z di equazione (6). In Tab.15 si riportano i parametri che completano la funzione definiti in base a quelli riportati in Tab.14.

Tab.14

$$H_d(z) = K \cdot \frac{1 - (2 + c_1) \cdot z^{-1} + (1 + 2c_1) \cdot z^{-2} - c_1 z^{-3}}{1 + e_1 z^{-1} + f_1 z^{-2} + g_1 z^{-3}} \quad (6)$$

È da notare che i parametri che definiscono il filtro dipendono sia dalla frequenza di campionamento, sia dalla cosiddetta "frequenza di normalizzazione". Quest'ultima è la frequenza alla quale si impone l'uguaglianza in ampiezza delle risposte in frequenza dei filtri analogico e numerico. È anche opportuno ricordare che, come conseguenza del teorema di Shannon, il filtro numerico avrà come limite superiore della sua banda di funzionamento la cosiddetta frequenza di Nyquist ( $f_{nyq}$ ) che corrisponde alla metà della frequenza di campionamento ( $f_c$ ).

**Tab.15:** parametri della funzione di trasferimento del filtro ICNIRP numerico relativo ai livelli di riferimento occupazionale per l'induzione magnetica definiti nelle linee guida ICNIRP del 2010. I parametri si riferiscono alla discretizzazione mediante il cosiddetto metodo 'match poli-zero'.

$a_1 = e^{-aT_c}$	$b_1 = e^{-bT_c}$	$c_1 = e^{-cT_c}$	$d_1 = e^{-dT_c}$
$\begin{cases} e_1 = -(a_1 + b_1 + d_1) \\ f_1 = a_1 b_1 + a_1 d_1 + b_1 d_1 \\ g_1 = -a_1 b_1 d_1 \end{cases}$			
$K = \frac{ H_c(j2\pi f_n) }{\left  \frac{1 - (2 + c_1) \cdot e^{-j2\pi f_n T_c} + (1 + 2c_1) \cdot e^{-j4\pi f_n T_c} - c_1 e^{-j6\pi f_n T_c}}{1 - e_1 e^{-j2\pi f_n T_c} + f_1 e^{-j4\pi f_n T_c} - g_1 e^{-j6\pi f_n T_c}} \right }$			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>T_c</math> è il tempo di campionamento (<math>f_c</math> è la frequenza di campionamento).</li> <li>• <math>f_n</math> è la cosiddetta frequenza di normalizzazione.</li> </ul>			

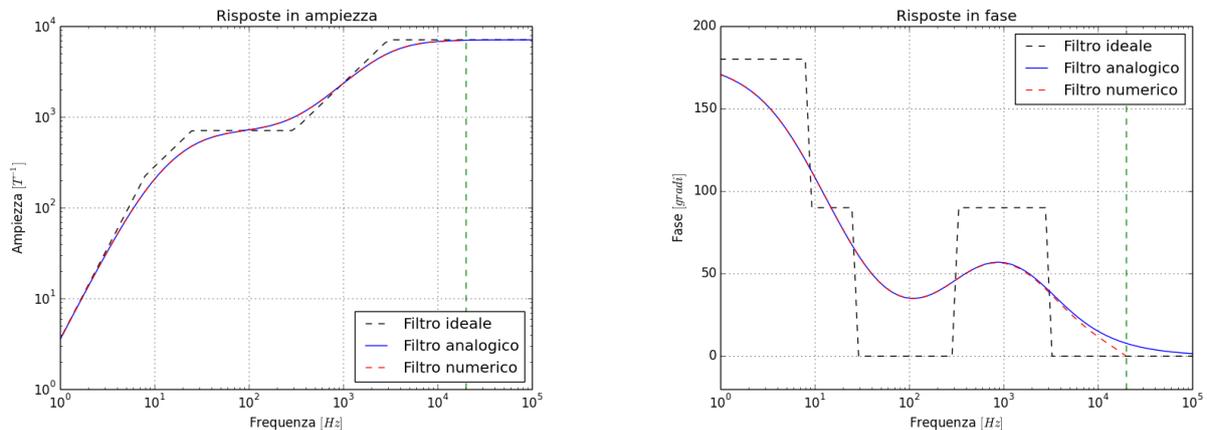
### 4.3.3 - Prestazioni del filtro numerico

In questo paragrafo si valutano le prestazioni del filtro numerico realizzato, confrontandone le risposte in ampiezza ed in fase sia con quelle del filtro analogico di partenza sia con quelle del corrispondente filtro ideale. Tale confronto è mirato anche ad evidenziare se sono rispettati i requisiti sui filtri imposti nelle linee guida ICNIRP 2010, già citati in precedenza ma elencati per convenienza nel seguito.

1. La risposta in ampiezza del filtro non si deve discostare di più di 3 dB da quella del corrispondente filtro ideale.
2. La risposta in fase del filtro non si deve discostare di più di 90 gradi da quella del corrispondente filtro ideale.

Nelle linee guida ICNIRP, i requisiti sopra elencati sono stati introdotti riferendosi esplicitamente ad un filtro analogico e quindi sarebbe lecito aspettarsi che siano rispettati prima di tutto per questa tipologia di filtro.

In Fig.10 si presentano i diagrammi di Bode di ampiezza e fase dei filtri ICNIRP ideale, analogico e numerico; per quest'ultimo, ci si è riferiti ad una frequenza di campionamento di 40 kHz, che è quella minima prevista dalla EN50500. Nelle figure, la linea tratteggiata verticale rappresenta la frequenza di Nyquist, ovvero il limite superiore della banda di funzionamento del filtro numerico.



**Fig.10:** diagrammi di bode dei filtri ICNIRP ideale, analogico e numerico ( $f_c=40$  kHz)

Entrambe le figure evidenziano un buon accordo tra filtro analogico e filtro numerico, almeno per frequenze sufficientemente lontane dalla frequenza di Nyquist. In prossimità di quest'ultima invece, si osservano sensibili scostamenti tra le risposte in fase del filtro analogico e di quello numerico.

Gli scostamenti massimi tra le risposte in ampiezza ed in fase rappresentati in Fig.10 sono riportati in Tab.16, dove si considerano diverse implementazioni del filtro numerico corrispondenti a diverse frequenze di campionamento.

È interessante osservare che neanche il filtro analogico preso a riferimento dall'ICNIRP rispetta il requisito sul massimo scostamento della risposta in ampiezza, che risulta infatti superiore a 3 dB. Questa incongruenza è probabilmente dovuta al fatto che gli estensori non hanno considerato che a 8 Hz si risente anche del polo a 25 Hz; di conseguenza, si ottengono scostamenti superiori ai 3 dB previsti per poli posti a frequenze tanto distanti da poter essere considerati indipendenti. Seppure non formalmente rispondente ai requisiti imposti, si considera quindi utilizzabile un filtro che non introduca scostamenti aggiuntivi rispetto a quelli del filtro analogico.

Seguono altre osservazioni relative alle differenze tra le risposte in ampiezza dei filtri (seconda, terza e quarta colonna di Tab.16).

- La massima differenza tra la risposta in ampiezza del filtro analogico e quella del filtro ideale si manifesta a 8 Hz ed è superiore a 3 dB.
- La massima differenza tra la risposta in ampiezza del filtro numerico e quella del filtro ideale si manifesta a 8 Hz solo quando la frequenza di campionamento  $f_c$  è sufficientemente maggiore della frequenza dei poli e degli zeri dei filtri; in tali casi è pari a quella che si verifica tra filtro analogico e filtro ideale e quindi anche in questo caso superiore a 3 dB.
- La massima differenza tra la risposta in ampiezza del filtro analogico e quella del filtro numerico decresce all'aumentare della frequenza di campionamento  $f_c$  e si manifesta sempre alla frequenza di Nyquist. In ogni caso, se la frequenza di Nyquist è sufficientemente maggiore della frequenza dei poli del filtro, la differenza è molto più piccola di 3 dB.

**Tab.16:** Differenze tra le risposte in ampiezza ed in fase di filtri ICNIRP ideale, analogico e numerico riferiti all'induzione magnetica ed ai limiti occupazionali.

fc [kHz]	$\Delta_{\text{max}}$ Ampiezza ideale-analogico [dB] (f [Hz])	$\Delta_{\text{max}}$ Ampiezza ideale-numeric [dB] (f [Hz])	$\Delta_{\text{max}}$ Ampiezza analog.-num. [dB] (f [Hz])	$\Delta_{\text{max}}$ Fase ideale-analogico [gradi] (f [Hz])	$\Delta_{\text{max}}$ Fase ideale-numeric [gradi] (f [Hz])	$\Delta_{\text{max}}$ Fase analog.-num. [gradi] (f [Hz])
3	<b>3.43 (8)</b>	3.68 (1500)	2.88 (1500)	<b>65.44 (26)</b>	90.00 (1500)	53.39 (1500)
5		4.22 (2500)	1.99 (2500)		90.00 (2500)	44.11 (2500)
6		4.60 (3000)	1.64 (3000)		90 (3000)	39.92 (3000)
10		3.43 (8)	0.80 (5000)		65.33 (3000)	27.91 (5000)
20		3.43 (8)	0.23 (10000)		65.40 (26)	15.17 (10000)
<b>40</b>		<b>3.43 (8)</b>	<b>0.06 (20000)</b>		<b>65.43 (26)</b>	<b>7.77 (20000)</b>
60		3.43 (8)	0.03 (30000)		65.43 (26)	5.20 (30000)
100		3.43 (8)	0.01 (50000)		65.43 (26)	3.13 (50000)

Seguono altre osservazioni relative alle differenze tra le risposte in fase dei filtri (quinta sesta e settima colonna di Tab.16).

- La massima differenza tra la risposta in fase del filtro analogico e quella del filtro ideale si manifesta a 26 Hz ed è inferiore a 90 gradi.
- Se la frequenza di campionamento è sufficientemente maggiore di 3 kHz, la massima differenza tra la risposta in fase del filtro numerico e quella del filtro ideale si manifesta a 26 Hz indipendentemente dalla frequenza di campionamento stessa. Tale differenza è pari a quella che si verifica tra filtro analogico e andamento ideale.
- Nel caso di frequenza di campionamento inferiore a 10 kHz, la massima differenza delle risposte in ampiezza del filtro numerico e del filtro ideale può anche essere pari a 90 gradi.
- La massima differenza tra la risposta in fase del filtro analogico e quella del filtro numerico decresce all'aumentare della frequenza di campionamento e si manifesta sempre alla frequenza di Nyquist. Ciò deriva dal fatto che i filtri ICNIRP hanno un comportamento assimilabile ad un filtro passa alto (con risposta in fase nulla ad alta frequenza) e che un generico filtro numerico ha sempre risposta in fase nulla alla frequenza di Nyquist.

In conclusione, si può ritenere che il filtro numerico implementato ed in particolare quello corrispondente a una frequenza di campionamento superiore o uguale a 40 kHz, costituisca una valida implementazione del metodo del picco ponderato nel dominio del tempo.

Tuttavia l'uso di procedure software e di filtri numerici per l'applicazione del metodo del picco ponderato non è immune da problemi. Per approfondimenti in tal senso si rimanda alla Appendice A.

## Parte III Appendici

### Appendice A

#### Approfondimenti sull'utilizzo di filtri numerici per la determinazione dell'indice di picco ponderato nel dominio del tempo

##### A.1 Il transitorio dei filtri numerici

In genere, durante le misure puntuali di BBF, non è possibile garantire che l'inizio dell'acquisizione delle forme d'onda avvenga in assenza di campi significativi. Ciò può generare una serie di problemi legati all'elaborazione dei campioni delle forme d'onda mediante i filtri numerici descritti nel paragrafo 4.3 - di questo documento. Tali filtri numerici infatti elaborano i primi campioni delle forme d'onda acquisite partendo da una condizione iniziale di riposo. In altre parole la risposta dei filtri ad una determinata forma d'onda, rappresentata da un numero N di campioni, è in realtà la risposta ad una forma d'onda in cui gli N campioni di interesse sono preceduti da infiniti campioni nulli. In corrispondenza del primo campione delle acquisizioni **il filtro reagisce quindi ad una discontinuità che non rappresenta un fenomeno reale**. In generale, la risposta del filtro a tale discontinuità sarà di entità e durata trascurabile se i primi campioni della forma d'onda acquisita rappresentano il solo rumore mentre potrà incidere significativamente sui risultati della valutazione se l'inizio dell'acquisizione rappresenta fenomeni non assimilabili al rumore.

All'inizio di questo capitolo si descrive il problema attraverso alcuni esempi, che saranno poi utilizzati nei paragrafi successivi per illustrare alcune possibili soluzioni, da adottare per la gestione dei fenomeni illustrati.

##### A.1.1. Transitorio con campo costante (gradino)

Il primo esempio si riferisce alla presenza di un campo statico con ampiezza pari a  $B_0$ . Il filtro ICNIRP descritto nel paragrafo 4.3 - è sostanzialmente un filtro passa alto e quindi la sua risposta in ampiezza per  $f=0$  Hz (risposta in continua) è nulla. Tuttavia tale risposta in ampiezza si riferisce al comportamento *a regime* del filtro e non tiene conto che, pur essendo tutti i campioni della forma d'onda acquisita pari al valore di campo statico presente nel momento della misura, in realtà il filtro numerico risponde ad un *gradino*, cioè ad una forma d'onda che è identicamente nulla per  $t < 0$  e vale  $B_0$  per  $t \geq 0$ , fino al termine dell'acquisizione.

In tal caso la risposta del filtro analogico può essere determinata tenendo conto che la trasformata di Laplace della sua risposta ad un gradino con ampiezza  $B_0$  assume la forma riportata in (7).

$$\frac{B_0}{s} \cdot H_c(s) = B_0 \cdot A_f \frac{s(s+c)}{(s+a)(s+b)(s+d)} = B_0 \cdot A_f \left[ \frac{k_a}{s+a} + \frac{k_b}{s+b} + \frac{k_d}{s+d} \right] \quad (7)$$

I coefficienti adimensionali  $k_a$ ,  $k_b$  e  $k_d$  usati nella (7) assumono le espressioni ed i valori riportati nelle (8).

$$\begin{aligned} k_a &= \frac{-a \cdot (c-a)}{(b-a) \cdot (d-a)} \approx -0.046 \\ k_b &= \frac{-b \cdot (c-d)}{(d-b) \cdot (a-b)} \approx +0.136 \\ k_d &= \frac{-d \cdot (c-d)}{(a-d) \cdot (b-d)} \approx +0.910 \end{aligned} \quad (8)$$

La risposta al gradino nel dominio del tempo è descritta dalla espressione (9), dove  $u(t)$  è la funzione gradino unitario (che vale 1 per  $t \geq 0$  e vale 0 per  $t < 0$ ).

$$f(t) = B_0 \cdot A_f \cdot (k_a \cdot e^{-at} + k_b \cdot e^{-bt} + k_d \cdot e^{-dt}) \cdot u(t) \quad (9)$$

In generale, l'uscita del filtro potrà essere considerata valida, solo una volta che l'eventuale *transitorio* del filtro si è esaurito. Nel particolare caso di campo costante l'uscita del filtro dovrebbe essere identicamente nulla e quindi la funzione  $f(t)$  coincide con il transitorio del filtro stesso. La durata del transitorio si valuta quindi determinando l'istante oltre il quale  $f(t)$  permane al di sotto di una certa soglia. Nel seguito, per valutare la durata del transitorio, ci si riconduce ad alcune approssimazioni.

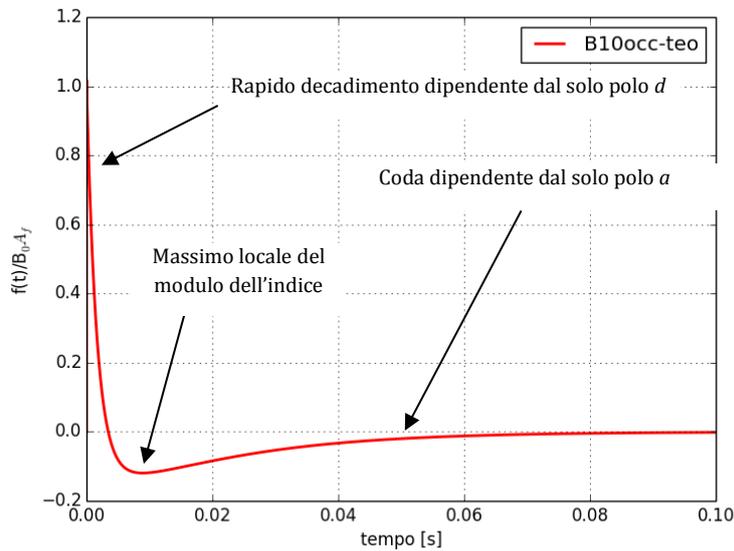


Fig.11: andamento della risposta al gradino

La prima e principale approssimazione è quella di assumere che il contributo legato al polo  $d$ , essendo quest'ultimo a frequenza oltre 100 volte maggiore di  $a$  e  $b$ , possa essere considerato trascurabile già a tempi molto più piccoli dell'istante in cui si verifica il massimo locale del modulo dell'indice evidenziato in Fig.11. In tale figura si rappresenta la risposta del filtro ad un gradino di campo con ampiezza pari a  $B_0=1/A_f$  (la frequenza dei poli  $a$ ,  $b$  e  $c$  del filtro usato per creare la figura è stata modificata per esigenze di visualizzazione). Se vale l'approssimazione descritta in precedenza, l'istante in cui si verifica il massimo locale assume l'espressione (10), indipendente dall'ampiezza  $B_0$ . In questa espressione si può osservare che per  $t > t_{max}$  il modulo dell'indice complessivo sarà sempre minore del solo contributo del polo  $a$  a 8 Hz. L'ampiezza dell'indice nell'istante  $t_{max}$  dipende invece da  $B_0$  e si ottiene sostituendo l'espressione di  $t_{max}$  nella (9).

$$t_{max} \approx \frac{1}{b-a} \cdot \ln\left(-\frac{b \cdot k_b}{a \cdot k_a}\right) \approx 0.0208 \text{ s} \tag{10}$$

$$f(t_{max}) \approx 77.52 \cdot B_0$$

Fatte queste osservazioni è possibile ottenere una relazione che esprime il tempo  $t_{tr}$  oltre il quale l'ampiezza del transitorio permane al di sotto un valore fissato  $I_{soglia}$ , in funzione dell'ampiezza del campo  $B_0$ . Questa relazione è espressa in (11) ed è rappresentata graficamente in Fig.12, in cui considerano due diversi valori di  $I_{soglia}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } B_0 < \frac{I_{soglia}}{A_f} \quad t_{tr} = 0 \\ \text{se } \frac{I_{soglia}}{A_f} < B_0 < \frac{I_{soglia}}{77.52} \quad t_{tr} = t_{max} \\ \text{se } \frac{I_{soglia}}{77.52} < B_0 \quad t_{tr} = \frac{1}{a} \cdot \ln\left(\frac{-k_a B_0 A_f}{I_{soglia}}\right) \end{array} \right. \tag{11}$$

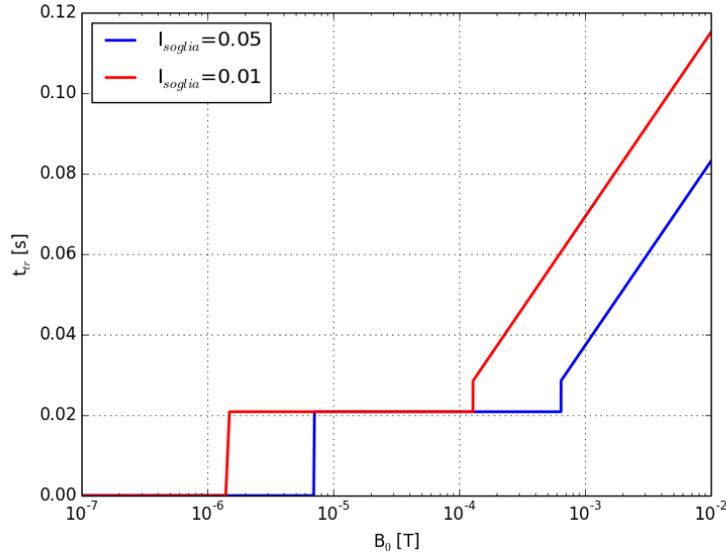


Fig.12: durata del transitorio al gradino in funzione della sua ampiezza

### A.1.2. Transitorio con campo sinusoidale (seno)

Come illustrato nel precedente paragrafo, nel caso di campo costante è possibile determinare una relazione che permette di stabilire la durata del transitorio in funzione del primo campione acquisito. In particolare, secondo tale relazione, se il primo campione acquisito è molto piccolo la durata del transitorio è trascurabile e l'uscita del filtro ICNIRP può essere considerata valida a partire dal primo campione. Purtroppo però questa non è una considerazione generalizzabile, come dimostrato con il seguente esempio.

Si considera un campo persistente con forma d'onda sinusoidale con ampiezza  $B_0$ , pulsazione  $\omega=2\pi f$  ed una acquisizione che inizia nello stesso istante in cui si ha un passaggio per lo zero del campo. Si assume per convenzione l'inizio dell'acquisizione come origine dei tempi. In tal caso il filtro ICNIRP risponderà ad una forma d'onda che è nulla per  $t<0$  ed è pari alla sinusoide effettivamente acquisita per  $t>0$ . Anche in questo caso la risposta del filtro nel dominio del tempo può essere determinata analiticamente, tenendo conto che la trasformata di Laplace della risposta del filtro alla forma d'onda considerata è la seguente:

$$\frac{B_0 \cdot \omega}{s^2 + \omega^2} \cdot H_c(s) = \frac{B_0 \cdot A_f \cdot \omega \cdot s^2 (s + c)}{(s^2 + \omega^2)(s + a)(s + b)(s + d)} = B_0 \cdot A_f \left[ \frac{k_a}{s + a} + \frac{k_b}{s + b} + \frac{k_d}{s + d} + \frac{k_{\cos} \cdot s + k_{\sin}}{s^2 + \omega^2} \right] \quad (12)$$

Il termine con  $(s^2 + \omega^2)$  a denominatore che compare nella (12) rappresenta una sinusoide mentre gli altri termini rappresentano degli esponenziali analoghi a quelli visti nel paragrafo precedente. In questo caso, i coefficienti adimensionali  $k_a$ ,  $k_b$  e  $k_d$ , che si riferiscono ai termini esponenziali, dipendono dalla frequenza della sinusoide. Come si può notare nelle espressioni (13), tali coefficienti sono per qualsiasi frequenza minori in modulo rispetto a quelli determinati in caso di campo costante riportati in equazione (8).

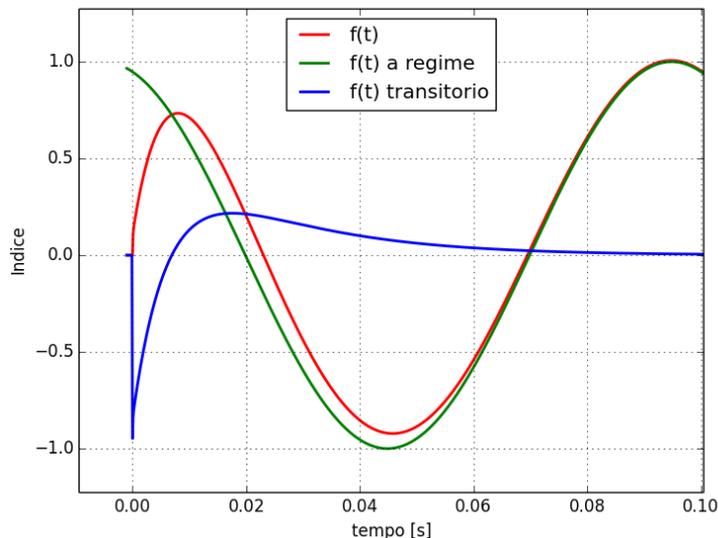
$$\begin{aligned} k_a &= \frac{\omega}{\omega^2 + a^2} \cdot \frac{a^2(c - a)}{(b - a)(d - a)} \\ k_b &= \frac{\omega}{\omega^2 + b^2} \cdot \frac{b^2(c - b)}{(a - b)(d - b)} \\ k_d &= \frac{\omega}{\omega^2 + d^2} \cdot \frac{d^2(c - d)}{(a - d)(b - d)} \end{aligned} \quad (13)$$

L'espressione nel dominio del tempo della risposta del filtro è dunque quella di equazione (14), dove  $u(t)$  è la funzione gradino unitario (che vale 1 per  $t \geq 0$  e vale 0 per  $t < 0$ ). In questo caso la funzione  $f(t)$  è composta da un termine sinusoidale *permanente*, che è la cosiddetta *risposta a regime* del filtro, più una somma di termini

esponenziali che tendono a scomparire e che costituiscono il *transitorio* del filtro ICNIRP. Si nota che il termine transitorio ha la stessa forma del caso precedente anche se i coefficienti  $k_a$ ,  $k_b$  e  $k_c$  assumono un valore numericamente diverso. Ma soprattutto si osserva che siamo in presenza di un termine transitorio anche in un caso in cui il primo campione acquisito è identicamente nullo. Infatti in questo caso  $B_0$  rappresenta l'ampiezza massima della sinusoide, che si manifesta un quarto di periodo dopo l'inizio dell'acquisizione. Per completezza si aggiunge che il termine  $k_\omega$  della (14) è pari al rapporto  $A_\omega/A_f$  dove  $A_\omega$  è la risposta in ampiezza del filtro alla frequenza della sinusoide in ingresso mentre il termine  $\varphi_\omega$  è la risposta in fase del filtro alla frequenza della sinusoide stessa.

$$f(t) = B_0 \cdot A_f \cdot \left[ k_a \cdot e^{-a \cdot t} + k_b \cdot e^{-b \cdot t} + k_d \cdot e^{-d \cdot t} + k_\omega \cdot \sin(\omega t + \varphi_\omega) \right] \cdot u(t) \quad (14)$$

In Fig.13 sono rappresentati l'andamento della  $f(t)$  complessiva, il termine a regime e quello transitorio, nel caso di una sinusoide a 10 Hz con ampiezza  $B_0=1/A_\omega$ . L'indice a regime è una sinusoide con fase  $\varphi_\omega$  ed ampiezza 1.0, dove il termine  $\varphi_\omega$  fa sì che la risposta a regime nell'origine sia diversa da zero. Poiché il filtro risponde ad una forma d'onda che è nulla per  $t \leq 0$ , ne consegue che anche l'indice complessivo sarà nullo per  $t=0$ . Di conseguenza il termine transitorio assume valore opposto a quello a regime nell'origine dei tempi in modo che l'indice complessivo parta da 0 e si ricongiunga in modo graduale con quello a regime.



**Fig.13:** andamento della risposta al seno con frequenza pari a 10 Hz

Nel particolare caso illustrato in Fig.13 l'indice complessivo durante il periodo in cui il transitorio porta un contributo significativo non supera mai l'unità; tuttavia questa non è una affermazione generalizzabile, come evidenziato dalla Fig.14. In tale figura si rappresenta la risposta ad una sinusoide in ingresso con frequenza pari a 100 Hz con ampiezza pari ad  $B_0=1/A_\omega$ . Si osserva in particolare che l'indice complessivo durante il transitorio assume un'ampiezza superiore all'unità (pari a circa 1.09).

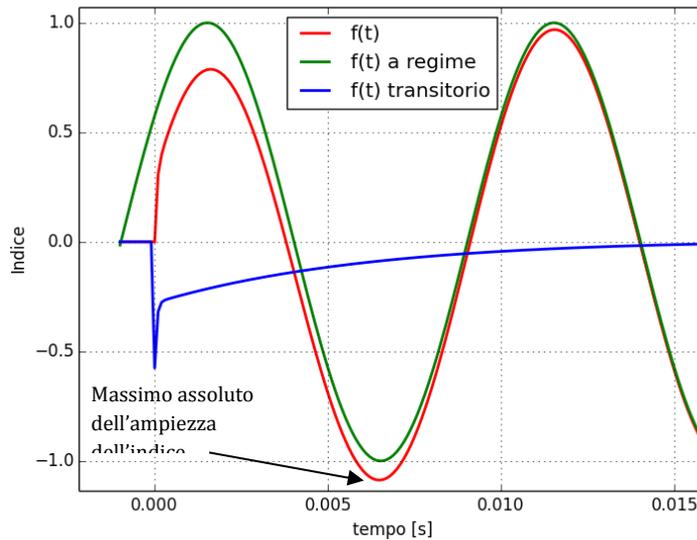


Fig.14: andamento della risposta al seno con frequenza pari a 100 Hz

### A.1.3. Transitorio con campo sinusoidale (coseno)

Il caso di una campo sinusoidale persistente, con ampiezza costante, con inizio dell'acquisizione corrispondente ad un punto di massimo del campo stesso può essere considerato una combinazione dei due casi precedenti e non verrà trattato diffusamente nel seguito. Ci si limita ad osservare che il transitorio è esprimibile mediante la stessa somma di tre esponenziali utilizzata nei casi precedenti e che le espressioni dei relativi coefficienti  $k_a$ ,  $k_b$  e  $k_d$  sono riportate in (15). Tali coefficienti assumono i valori massimi per  $\omega=0$ , ed in tal caso coincidono con i coefficienti espressi in (8), validi per un campo costante (gradino).

$$\begin{aligned}
 k_a &= \frac{a^2}{\omega^2 + a^2} \cdot \frac{-a(c-a)}{(b-a)(d-a)} \\
 k_b &= \frac{b^2}{\omega^2 + b^2} \cdot \frac{-b(c-b)}{(a-b)(d-b)} \\
 k_d &= \frac{d^2}{\omega^2 + d^2} \cdot \frac{-d(c-d)}{(a-d)(b-d)}
 \end{aligned} \tag{15}$$

## A.2 Tecniche per la gestione del transitorio dei filtri ICNIRP numerici

Visto che una generica forma d'onda è rappresentabile secondo la teoria di Fourier come una somma (infinita o finita) di sinusoidi e da un eventuale costante (valor medio), gli esempi presentati nel paragrafo precedente forniscono suggeriscono diverse strategie per la gestione del transitorio, che saranno presentate e brevemente discusse nel seguito.

### A.2.1. Scarto di un tempo fissato

Visto che il transitorio è di fatto la somma di tre termini che decadono esponenzialmente e che il termine più lento decade come  $e^{-at}$  e considerato che per  $t > 5/a \approx 0.1$  s il termine  $e^{-at}$  si è ridotto di circa 150 volte, si può assumere di scartare i primi 100 ms delle acquisizioni indipendentemente dai valori acquisiti.

Ciò, da un lato è molto semplice da implementare in software, dall'altro non tiene conto né di quei casi in cui l'uscita del filtro è sin da subito valida, sia di eventuali situazioni in cui i primi campioni rappresentano campi talmente intensi che un fattore di riduzione pari a 150 non è sufficiente affinché il transitorio possa essere considerato trascurabile.

### A.2.2. Scarto di un tempo dipendente dall'ampiezza dei campioni

**Prima ipotesi.** A partire dalle espressioni (8) (12) (13) e dalle osservazioni ad esse collegate, è possibile attribuire validità più generale alla relazione tra lunghezza del transitorio e ampiezza dei campioni descritta in (11) e rappresentata graficamente in Fig.12. La generalizzazione di tale espressione si basa sia sul fatto che i coefficienti  $k_a$ ,  $k_b$  e  $k_d$  nel caso di campo costante assumono valori più grandi in modulo rispetto a quelli determinati in caso di campo sinusoidale sia sul considerare come termine  $B_0$  non il primo campione acquisito, bensì il campione più intenso tra quelli misurati nell'intervallo di tempo immediatamente successivo all'inizio dell'acquisizione. La lunghezza di tale intervallo di tempo può essere stabilita in base a considerazioni qualitative; ad esempio si può scegliere 0.1s in base a quanto riportato nel precedente paragrafo oppure 0.25 s, se si fa riferimento al tempo necessario affinché una sinusoide con frequenza pari ad 1 Hz raggiunga il suo massimo partendo da 0. Altre scelte sono comunque possibili, purché opportunamente giustificate.

**Seconda ipotesi.** Si utilizza la relazione tra lunghezza del transitorio e ampiezza dei campioni descritta in (11), considerando  $B_0$  come l'ampiezza del primo campione acquisito. In tal caso si accetta di determinare l'indice di una forma d'onda che è nulla prima dell'inizio della acquisizione dei campioni ed eventualmente si scarta un certo numero di campioni in base alla sola ampiezza della discontinuità dovuta all'ampiezza del primo campione. In altre parole si accetta la possibilità di assumere come valido il massimo dell'ampiezza dell'indice evidenziato in Fig.14.

### A.2.3. Cenni ad altre tecniche per la gestione del transitorio

**Finestratura.** Si intende per finestratura la modulazione della sequenza acquisita in modo che raggiunga gradualmente, partendo da zero, il valore di campo effettivamente acquisito. Normalmente la finestratura altera sia l'inizio sia la fine della sequenza acquisita e lascia invariata la parte centrale. Questa tecnica è utilizzata e completamente caratterizzata teoricamente in abbinamento a tecniche di elaborazione nel dominio della frequenza. È opportuno notare che la finestratura, se utilizzata in abbinamento al filtraggio nel dominio del tempo, è necessaria solo all'inizio della sequenza acquisita.

**Aggiunta di un preambolo.** In generale, scartare un certo numero di campioni o applicare una finestratura implicano una perdita di informazione, derivante dal fatto che l'indice relativo ad un certo numero di campioni o non è considerato valido oppure è alterato dalla finestratura. Per ovviare a tale limitazione, è possibile aggiungere alla forma d'onda in ingresso un preambolo di campioni che si raccordino in modo dolce ai campioni acquisiti ed in particolare in modo tale che il massimo dell'indice sia raggiunto dopo l'inizio del preambolo stesso. In altre parole si ricostruisce (o meglio si inventa) la forma d'onda nell'intervallo di tempo precedente alla acquisizione, utilizzando come criterio generale per la sua ricostruzione la minimizzazione dell'indice in uscita dal filtro.

## **A.3 Altre problematiche nell'utilizzo dei filtri ICNIRP numerici**

È noto che campionando con una frequenza pari a  $f_c$  è possibile memorizzare senza perdita di informazioni delle forme d'onda con spettri confinati entro il limite di Nyquist pari a  $f_c/2$ . Tuttavia, nel caso della determinazione dell'indice WP, pur rispettando il limite di Nyquist e quindi pur non sussistendo una sostanziale perdita di informazione, è possibile che l'indice massimo calcolato non sia corretto e più in particolare che avvenga una sottostima dell'indice reale. Ciò avviene ad esempio quando esistono componenti con frequenza pari ad una frazione intera della frequenza di campionamento con denominatore relativamente piccolo. Infatti, se si considera una sinusoide con frequenza fissa pari a  $f_c/N$  in ingresso, si ha che, a regime, l'indice in uscita è una sinusoide alla stessa frequenza che viene rappresentata con N campioni per ogni periodo. Se N è relativamente grande si è sicuri che un punto di acquisizione cadrà sufficientemente vicino al massimo della sinusoide stessa. Tuttavia, se N è piccolo, può accadere che il massimo assoluto della sinusoide non sia rappresentato ed il fatto che il periodo della sinusoide sia un multiplo del tempo di campionamento fa sì che la posizione dei campioni all'interno del periodo della sinusoide sia stabile.

Tale problema si risolve tipicamente con il *sovra campionamento* (o *oversampling*) della forma d'onda, che consiste nell'utilizzare un filtro passa basso in ingresso con frequenza di taglio più piccola del limite di

Nyquist. Tale filtro passa basso (che funge anche da filtro anti aliasing) fa sì che le componenti dello spettro della forma d'onda a frequenze più alte siano rappresentate con un numero di campioni sufficiente a far sì che il massimo assoluto della forma d'onda stessa sia correttamente rappresentato.

## Appendice B

### Codifica del nome dei punti di misura

Nelle elaborazioni e nella reportistica ci si è riferiti ad i punti di misura con una codifica alfanumerica descritta nel seguito. In generale, indipendente dalla codifica scelta la attribuzione di un codice univoco a ciascun punto dovrebbe essere messa in atto quanto prima nell'ambito della procedura di valutazione. La codifica utilizzata in questo contesto è costituita da otto caratteri ed è definita dalla Tab.17. Quando si vuole distinguere tra le diverse posizioni in pianta ma non tra le diverse altezze, ci si limita ai primi 4 caratteri del codice.

Tab.17: codifica del nome dei punti di misura.

Numero carattere	1	2	3	4	5	6	7	8
Contenuto o codice contenuto	A,B,C,M	L,P	nn		-	hhh		

dove:

- **Carattere 1:**
  - "A": punto di tipo A
  - "B": punto di tipo B
  - "C": punto di tipo C
  - "M": punto di tipo CM
- **Carattere 2:**
  - "L": punto con valutazioni relative ai soli lavoratori
  - "P": punto che può interessare valutazioni per la popolazione
- **Caratteri 3 e 4:**
  - **nn**: indice intero (da 01 a 99) che identifica il punto (parte da 01). La numerazione è indipendente per ciascuna tipologia di punto. Nel caso di punti B relativi a locali nei quali la grandezza misurata non presenti massimi ben collocabile si è utilizzato per questo gruppo di caratteri una doppia lettera maiuscola (ad es. BL\_XX o BP\_YY)
- **Carattere 5:**
  - "-" (underscore).
- **Caratteri 6, 7, 8:**
  - **hhh**: altezza dal piano di calpestio in cm che inizia con 0 se il punto di misura è posto a meno di 100 cm dal piano di calpestio stesso (se ci si attiene alla EN50500 vi saranno tre sole possibilità cioè 030, 090 e 150).