

Procedura di verifica del rispetto dei livelli di riferimento
dell'induzione magnetica in presenza di forme d'onda
complesse con frequenze fino a 100 kHz

Parte I: Aspetti generali

Daniele Andreuccetti⁽¹⁾, Andrea Bogi⁽²⁾, Nicola Zoppetti⁽¹⁾

⁽¹⁾ IFAC-CNR, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino, Italy

⁽²⁾ AUSL7, Siena

1 - Introduzione

Le Linee Guida ICNIRP del 1998 (1) e lo Statement ICNIRP del 2003 (2) propongono nel complesso quattro approcci distinti per la verifica del rispetto dei livelli di riferimento ICNIRP in presenza di forme d'onda "complesse" a bassa frequenza, intendendosi con questo termine le forme d'onda pulsate o, in generale, non sinusoidali, aventi componenti spettrali di frequenza fino a 100 kHz.

Tutti questi approcci conducono a definire un *indice* che rappresenta l'intensità dell'esposizione ed a proporre un metodo per calcolarne il valore. I livelli di riferimento ICNIRP sono rispettati se tale valore risulta minore o uguale ad 1. In ogni caso gli indici sono calcolati separatamente per ogni componente cartesiana X,Y,Z del campo; l'indice complessivo è dato dalla somma vettoriale degli indici delle tre componenti, secondo la relazione:

$$INDICE_COMPLESSIVO = \sqrt{(INDICE_X)^2 + (INDICE_Y)^2 + (INDICE_Z)^2} \quad (1)$$

In questo documento descriveremo questi metodi con riferimento alle esposizioni al campo magnetico in ambito occupazionale, ma quanto esporremo può essere sia facilmente esteso alle esposizioni della popolazione sia adattato al caso del campo elettrico.

2 - Indice ICNIRP 1998 (I98)

Questo approccio è stato introdotto nelle Linee Guida ICNIRP-1998 per trattare il caso in cui vi sia esposizione simultanea a campi sinusoidali a frequenze diverse ("Simultaneous exposure to multiple frequency fields"). Veniva proposto quindi per essere applicato al caso in cui vi sono più sorgenti indipendenti che emettono a frequenze diverse; tuttavia, si può ritenere che esso costituisca per l'ICNIRP un implicito riferimento anche per trattare le situazioni in cui un'unica sorgente emette un segnale "a banda larga", ovvero costituito da un certo numero di componenti spettrali distinte. Questa interpretazione è stata successivamente confermata, seppure con alcune precisazioni, dallo Statement ICNIRP-2003.

L'indice I98 si calcola nel dominio della frequenza mediante la seguente espressione, da applicare separatamente per ogni componente cartesiana X,Y,Z del campo:

$$I98_{X,Y,Z} = \sum_{j=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{B_j}{B_{L,j}} + \sum_{j=65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{B_j}{30.7\ \mu\text{T}} \quad (2)$$

Dove, per ciascuna componente cartesiana, B_j è l'ampiezza RMS della componente spettrale a frequenza j e $B_{L,j}$ è il livello di riferimento ICNIRP alla stessa frequenza (ricordiamo che i livelli di riferimento ICNIRP **sono sempre valori RMS**). L'indice complessivo si ottiene, come si è detto, come somma vettoriale degli indici relativi alle tre componenti cartesiane del campo (Eq.1).

Lo Statement ICNIRP-2003 ha riproposto questo approccio come metodo di elezione per trattare forme d'onda "non-coerenti" (vedi esempio in Fig. 1), per le quali non si può escludere che, in un certo istante, tutte le componenti a frequenza diversa (tra loro scorrelate per definizione) si trovino ad assumere contemporaneamente il proprio valore di picco. Con queste forme d'onda, però, il calcolo dell'indice risulta difficoltoso (principalmente a causa della mancanza di una effettiva periodicità e della conseguente comparsa, nello spettro, di componenti spurie – cioè non presenti nel segnale originale – dovute al fenomeno dello "spectral leakage" (3)). A segnali simili si applica più agevolmente l'indice WP03, descritto nel seguito.

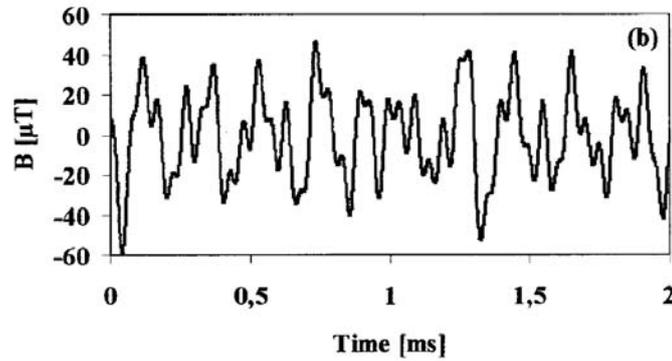


Fig. 1 - Esempio di forma d'onda non-coerente (cfr. Fig.2b dello Statement ICNIRP-2003)

3 - Impulso singolo rettangolare (RETT)

Indicazioni in merito a come trattare un impulso rettangolare isolato si trovano nelle Linee Guida ICNIRP-1998, a proposito sia delle restrizioni di base (cfr. nota 3 della Tab. 4), sia dei livelli di riferimento (cfr. nota 4 delle Tab. 6 e 7). L'approccio è ripreso in parte anche dallo Statement ICNIRP-2003 (Fig. 2).

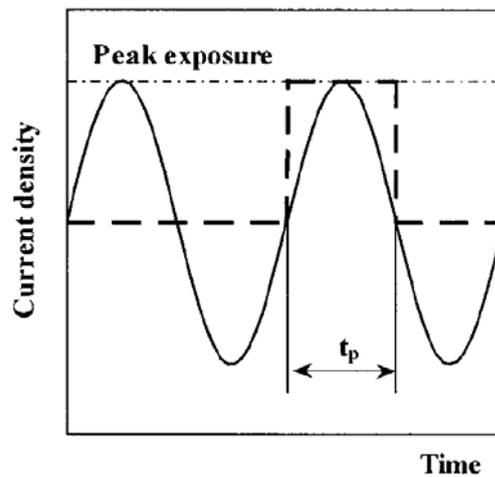


Fig. 2 - Impulso singolo rettangolare e forma d'onda sinusoidale equivalente (cfr. Fig.1 dello Statement ICNIRP-2003)

In base a queste indicazioni, si opera nel dominio del tempo e, per ciascuna componente cartesiana, si valutano l'ampiezza di picco A e la durata t_p dell'impulso e si calcola il rapporto tra l'ampiezza stessa e il livello di riferimento ICNIRP $B_{L,f_{EQ}}$, preso alla frequenza f_{EQ} avente periodo pari a $2t_p$ (detta "frequenza equivalente" dell'impulso) e moltiplicato per la radice di 2, in modo da riportarlo da valore efficace a valore di picco. In formule:

$$RETT_{x,y,z} = \frac{A}{\sqrt{2} \cdot B_{L,f_{EQ}}} \quad f_{EQ} = \frac{1}{2t_p} \quad (3)$$

L'indice complessivo si ottiene ancora come somma vettoriale degli indici relativi alle tre componenti cartesiane del campo (Eq.1).

A fronte degli ovvii vantaggi, insiti in una evidente semplicità ed immediatezza applicativa, il metodo della frequenza equivalente utilizzato per trattare l'impulso singolo presenta non poche criticità. Su un piano generale il metodo, se appare accettabile per valutare il rispetto delle restrizioni di base, lo è molto meno quando si considerino i livelli di riferimento, perché tiene sostanzialmente conto solo dell'intensità del campo e non della sua rapidità di variazione, che è invece una grandezza fondamentale in relazione agli effetti biologici imputabili ai campi di bassa frequenza. Il fatto di rimettere in gioco la frequenza,

associandola alla durata dell'impulso, non risolve in modo soddisfacente questo problema e ne introduce uno nuovo, sul versante applicativo, non appena si cerchi di identificare la "frequenza equivalente" di un impulso non perfettamente rettangolare. Sorgenti particolarmente significative a questo proposito sono le saldatrici a punti o gli stimolatori transcranici (di cui un esempio in Fig. 3).

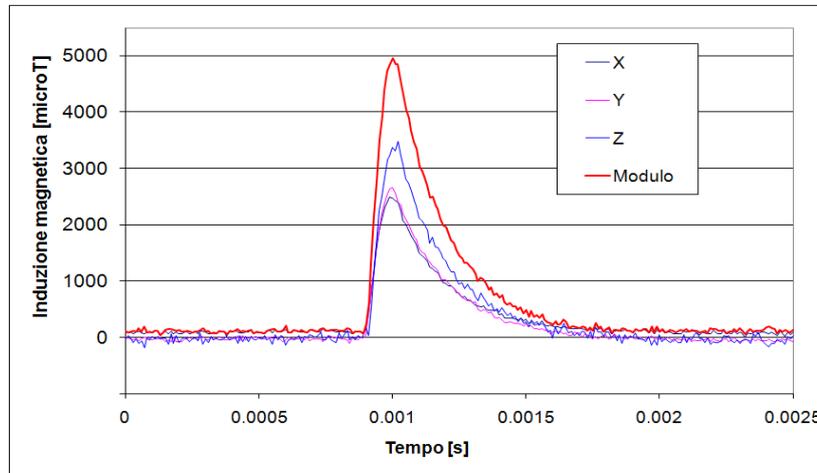


Fig. 3 - Induzione magnetica a 30 cm dall'applicatore di un apparato per stimolazione transcranica

4 - Segnale "burst" a banda stretta (BURST)

Questo approccio è preso in considerazione solo nello Statement ICNIRP-2003 (Fig. 4). Si tratta del caso di un segnale in cui siano presenti spezzoni pressoché perfettamente sinusoidali (detti "burst") di durata limitata (ma tale da contenere almeno un periodo completo della sinusoide), separati da intervalli più o meno lunghi di assenza di campo distinguibile dal rumore.

All'interno di ciascun *burst*, si valutano l'ampiezza di picco A e la frequenza f_B della sinusoide e si confronta l'ampiezza stessa con livello di riferimento ICNIRP B_{L,f_B} , preso alla frequenza f_B e moltiplicato per la radice di 2, in modo da riportarlo da valore efficace a valore di picco. In formule:

$$BURST_{X,Y,Z} = \frac{A}{\sqrt{2} \cdot B_{L,f_B}} \quad (4)$$

Come sempre, l'indice complessivo si ottiene come somma vettoriale degli indici relativi alle tre componenti cartesiane del campo (Eq. 1).

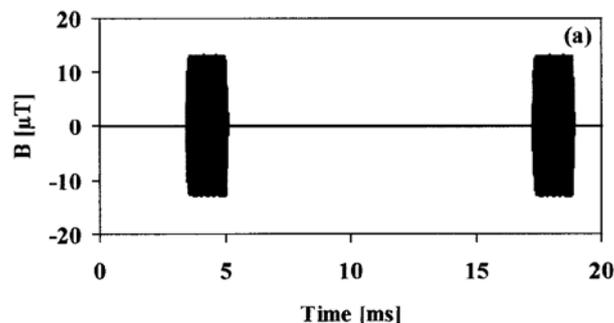


Fig. 4 - Esempio di forma d'onda di tipo *burst* (cfr. Fig.2a dello Statement ICNIRP-2003)

5 - Metodo del picco ponderato (WP03)

Il metodo del picco ponderato (*weighted peak*) è definito nello Statement ICNIRP-2003, dove viene indicato come approccio d'elezione per i segnali con forma d'onda complessa, aventi componenti spettrali

con frequenza compresa tra 8 Hz e 65 kHz (150 kHz per la popolazione) e rapporti di fase relativamente stabili (forme d'onda "coerenti", vedi esempi in Fig. 5). Per queste forme d'onda, il metodo fornisce risultati meno cautelativi e più realistici rispetto all'indice ICNIRP originario I198, perché non postula la coincidenza temporale dei valori di picco delle singole componenti spettrali (che, nel caso di forme d'onda coerenti, può anche non avvenire mai). Se applicato alle forme d'onda non-coerenti, il metodo WP03 fornisce in teoria gli stessi risultati del metodo I198, a condizione di scegliere un tempo di osservazione sufficientemente lungo da poter supporre che si sia effettivamente verificata la condizione in cui tutti i contributi a frequenza diversa si siano trovati a raggiungere il valore di picco nello stesso istante.

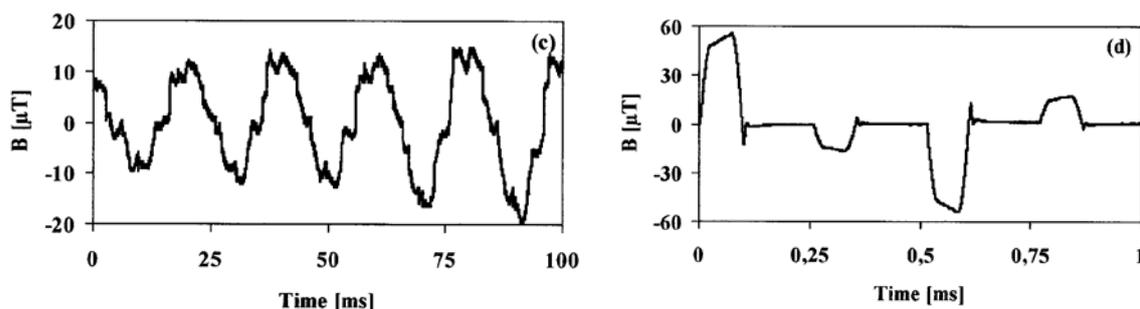


Fig. 5 - Esempi di forme d'onda coerenti (cfr. Fig. 2c e 2d dello Statement ICNIRP 2003)

In sintesi, per applicare il metodo del picco ponderato, ciascuna componente cartesiana del campo deve essere fatta passare attraverso un filtro la cui risposta in frequenza riproduca l'inverso del livello di riferimento ICNIRP tra 8 Hz e 65 kHz. L'uscita del filtro rappresenta l'indice (variabile nel tempo) che, se minore o uguale ad 1 denota – come negli altri casi – il rispetto delle prescrizioni normative. Nel realizzare il filtro, è considerata accettabile una certa approssimazione nell'intorno della *frequenza critica* ICNIRP di 820 Hz (800 Hz per le esposizioni della popolazione).

Nello Statement ICNIRP-2003, il metodo veniva giustificato con riferimento agli studi biofisici di Jokela (4). Attraverso questi, era in qualche modo motivata anche la limitazione all'intervallo di frequenza tra 8 Hz e 65 kHz. Nella bozza delle nuove Linee Guida ICNIRP del 2009 (5), il metodo del picco ponderato viene proposto come approccio preferenziale per qualsiasi forma d'onda complessa con spettro limitato entro 100 kHz.

Per calcolare effettivamente l'indice WP03 non è necessario determinare lo spettro delle componenti cartesiane del campo. Infatti, una volta definite le caratteristiche del filtro (che può essere implementato sia per via analogica, cioè in hardware all'interno della sonda di misura, sia per via numerica, cioè elaborando al computer le forme d'onda acquisite con una sonda a risposta piatta), l'indice è costituito dall'uscita del filtro stesso. Tuttavia, nello Statement ICNIRP-2003 è riportata anche l'espressione dell'indice WP03 nel dominio della frequenza, utile ai fini della comprensione del funzionamento del metodo; per ciascuna componente cartesiana risulta:

$$WP03_{x,y,z} = \left| \sum_{f_j=8\text{ Hz}}^{65\text{ kHz}} \frac{B_j}{\sqrt{2}B_{L,j}} \cos(2\pi f_j t + \theta_j + \varphi_j) \right| \quad (5)$$

Dove B_j e θ_j sono l'ampiezza di picco e la fase della componente spettrale alla frequenza f_j , $B_{L,j}$ è il livello di riferimento ICNIRP alla stessa frequenza e φ_j è lo sfasamento introdotto dal filtro a quella frequenza.

Al solito, l'indice complessivo è dato dalla somma vettoriale degli indici delle tre componenti (Eq.1).

6 - Altri metodi

Nelle Linee Guida ICNIRP-1998 (cfr. nota 4 della Tab. 4) si cita la possibilità di calcolare la densità di corrente indotta a partire dal massimo valore della derivata dell'induzione magnetica rispetto al tempo (dB/dt), a sua volta determinato a partire dai fronti più ripidi rilevati nella forma d'onda del campo. Per poter confrontare la densità di corrente con un limite è però necessario riferirsi ad una frequenza: nella nota tuttavia non si specifica come determinare tale frequenza.

In ogni caso, la nota in questione si riferisce a rigore alla possibilità di stimare la densità di corrente a partire da (dB/dt) per verificare le restrizioni di base e non alla verifica del superamento dei livelli di riferimento in termini di B : tant'è vero che la nota 4 non è replicata nelle tabelle successive, relative appunto ai livelli di riferimento.

7 - Modalità di misura e successiva elaborazione dei dati

Nel seguito si suppone di effettuare le rilevazioni dell'induzione magnetica per mezzo di uno strumento come il Narda ELT-400, che mette a disposizione – oltre alla modalità di funzionamento FS con risposta in frequenza piatta – anche la modalità STD, nella quale è implementato in hardware il metodo del picco ponderato WP03. Lo strumento dispone di tre uscite analogiche (relative ai tre assi cartesiani) su cui è presente un segnale di tensione, che risulta proporzionale all'induzione magnetica in modalità FS ed all'indice WP03 in modalità STD. Si suppone anche di operare collegando a queste uscite un dispositivo di acquisizione, campionamento e digitalizzazione del segnale.

In questa situazione, i risultati delle misure potranno essere dei seguenti tipi:

- dati a display in modalità FS;
- dati a display in modalità STD;
- campioni nel dominio del tempo per le tre componenti cartesiane, misurati in modalità FS, relativi ad un certo tempo di osservazione e ad un periodo di campionamento fissato;
- campioni nel dominio del tempo per le tre componenti cartesiane, misurati in modalità STD, relativi ad un certo tempo di osservazione e ad un periodo di campionamento fissato.

Si suppone, infine, di essere in grado di effettuare numericamente, con accuratezza adeguata, il filtraggio nel dominio del tempo necessario a determinare l'indice WP03 – e di essere quindi in grado di ricavare le indicazioni fornite dallo strumento in modalità STD – a partire dai campioni forniti dallo stesso strumento utilizzato in modalità FS.

In generale, per quanto riguarda l'acquisizione nel dominio del tempo, si possono fare le considerazioni che seguono.

- L'acquisizione in modalità STD:
 - ha il vantaggio di non richiedere elaborazione (se non elementare) dei dati acquisiti per la verifica dello standard considerato;
 - ha lo svantaggio di dover essere ripetuta per standard diversi (lavoratori, popolazione);
 - ha lo svantaggio di non permettere di utilizzare facilmente le misure in caso di aggiornamento della normativa.
- L'acquisizione in modalità FS:
 - ha lo svantaggio di richiedere una elaborazione fuori linea relativamente complessa dei dati acquisiti, per fornire indicazioni in merito alla verifica dello standard;
 - ha il vantaggio di poter utilizzare gli stessi dati di base per la verifica di standard diversi (lavoratori, popolazione);
 - ha il vantaggio di permettere di riutilizzare le misure in caso di aggiornamento della normativa.

8 - Procedura operativa

All'atto pratico, la valutazione dell'indice di esposizione secondo i vari approcci introdotti, avviene nel modo sotto descritto.

Indice BURST

- Si utilizza lo strumento in modalità FS.
- Per ciascuna componente cartesiana, occorre lavorare o sulla forma d'onda disponibile all'uscita analogica della sonda, visualizzandola direttamente su un oscilloscopio, oppure sui campioni digitalizzati della stessa forma d'onda.
- Dall'analisi della forma d'onda nel dominio del tempo si ricavano l'ampiezza di picco A e la frequenza f_B del *burst*.

- Si calcola quindi l'indice BURST per ciascuna componente cartesiana con l'Eq.4.
- L'indice ICNIRP complessivo è dato dalla somma vettoriale degli indici delle tre componenti cartesiane, come indicato dall'Eq.1.

Indice RETT

- Si utilizza lo strumento in modalità FS.
- Per ciascuna componente cartesiana, occorre lavorare o sulla forma d'onda disponibile all'uscita analogica della sonda, visualizzandola direttamente su un oscilloscopio, oppure sui campioni digitalizzati della stessa forma d'onda.
- Lavorando nel dominio del tempo, occorre assimilare tale forma d'onda ad un impulso rettangolare, di durata t_p da stabilire in base alla durata del segnale e di ampiezza A pari al valore di picco del segnale stesso.
- Si calcola quindi l'indice RETT per ciascuna componente cartesiana con l'Eq.3.
- L'indice ICNIRP complessivo è dato dalla somma vettoriale degli indici delle tre componenti cartesiane, come indicato dall'Eq.1.

Indice II98

- Si utilizza lo strumento in modalità FS.
- Si sceglie un opportuno tempo di osservazione, si determina lo spettro di ciascuna delle tre componenti cartesiane del campo e si calcola l'indice ICNIRP per ognuna di esse, relativo all'intervallo di tempo osservato, con l'Eq.2.
- L'indice ICNIRP complessivo è dato dalla somma vettoriale degli indici delle tre componenti cartesiane, come indicato dall'Eq.1.

Indice WP03

Sono possibili vari approcci, lavorando in tutti i casi nel dominio del tempo.

- Si può determinare l'indice WP03 per ciascuna componente cartesiana a partire:
 - direttamente dai dati mostrati a display in modalità STD, con funzione MAX HOLD (se disponibile) inserita per l'intero tempo di osservazione;
 - dai campioni acquisiti in modalità STD, moltiplicati per un opportuno fattore di scala;
 - dai campioni acquisiti in modalità FS, ai quali deve essere applicato un filtro numerico che riproduca l'inverso del livello di riferimento ICNIRP in funzione della frequenza ed introduca anche un opportuno fattore di scala.
- L'indice ICNIRP complessivo è dato dalla somma vettoriale degli indici delle tre componenti cartesiane, come indicato dall'Eq. 1.

9 - Scelta dell'approccio più idoneo

Alla luce di quanto esposto nei paragrafi precedenti, la scelta dell'approccio più adatto alla valutazione del rispetto dei livelli di riferimento ICNIRP in presenza di forme d'onda complesse deve partire dall'analisi delle caratteristiche del segnale, come illustrato nel diagramma a blocchi di Fig. 6. Nel seguito si discutono brevemente gli aspetti operativi relativi ai vari approcci possibili, identificati in base ai differenti "casi" a cui conduce la classificazione delineata in figura.

9.1 - Caso A: forma d'onda assimilabile ad un burst sinusoidale singolo o ad una sequenza, anche persistente, di burst sinusoidali

Il metodo di elezione, secondo lo Statement ICNIRP-2003, è ovviamente l'approccio BURST. Tuttavia è possibile, in linea di principio, anche applicare il metodo del picco ponderato WP03, facendo

partire la misura un po' prima dell'inizio del *burst* e protraendola fino a dopo il termine dello stesso. In presenza di una sequenza di più *burst*, si dovrà ovviamente identificare e controllare il più intenso, oppure ripetere il controllo su tutti i *burst* presenti.

Di regola, ci si deve attendere che l'indice WP03 risulti maggiore o uguale dell'indice BURST, salvo che per frequenze vicine alla *frequenza critica* ICNIRP di 820 Hz (come si vede in Tab. 1, riga a 1000 Hz).

Più in dettaglio, se la sinusoide del *burst* inizia partendo da zero (caso "STEP=No" in Tab. 1), allora ci si deve aspettare che i due metodi siano sempre in accordo, qualunque sia la frequenza della sinusoide stessa. Il risultato corrisponde anche a quello che si otterrebbe calcolando l'indice ICNIRP standard II98 per un segnale persistente perfettamente sinusoidale, alla frequenza della sinusoide del *burst*. Se invece il *burst* inizia con una discontinuità (caso "STEP=Si" in Tab. 1, dove si è anche supposto che la discontinuità abbia ampiezza pari all'ampiezza di picco della sinusoide del *burst*), allora il metodo WP03 tenderà a fornire valori maggiori, perché la discontinuità stessa passerà pressoché inalterata attraverso il filtro che implementa il metodo, mentre la successiva sinusoide verrà più o meno attenuata dal filtro a seconda della sua frequenza. Per frequenze abbastanza maggiori della *frequenza critica* ICNIRP di 820 Hz (800 Hz per la popolazione), il metodo WP03 tornerà a fornire valori uguali al metodo BURST.

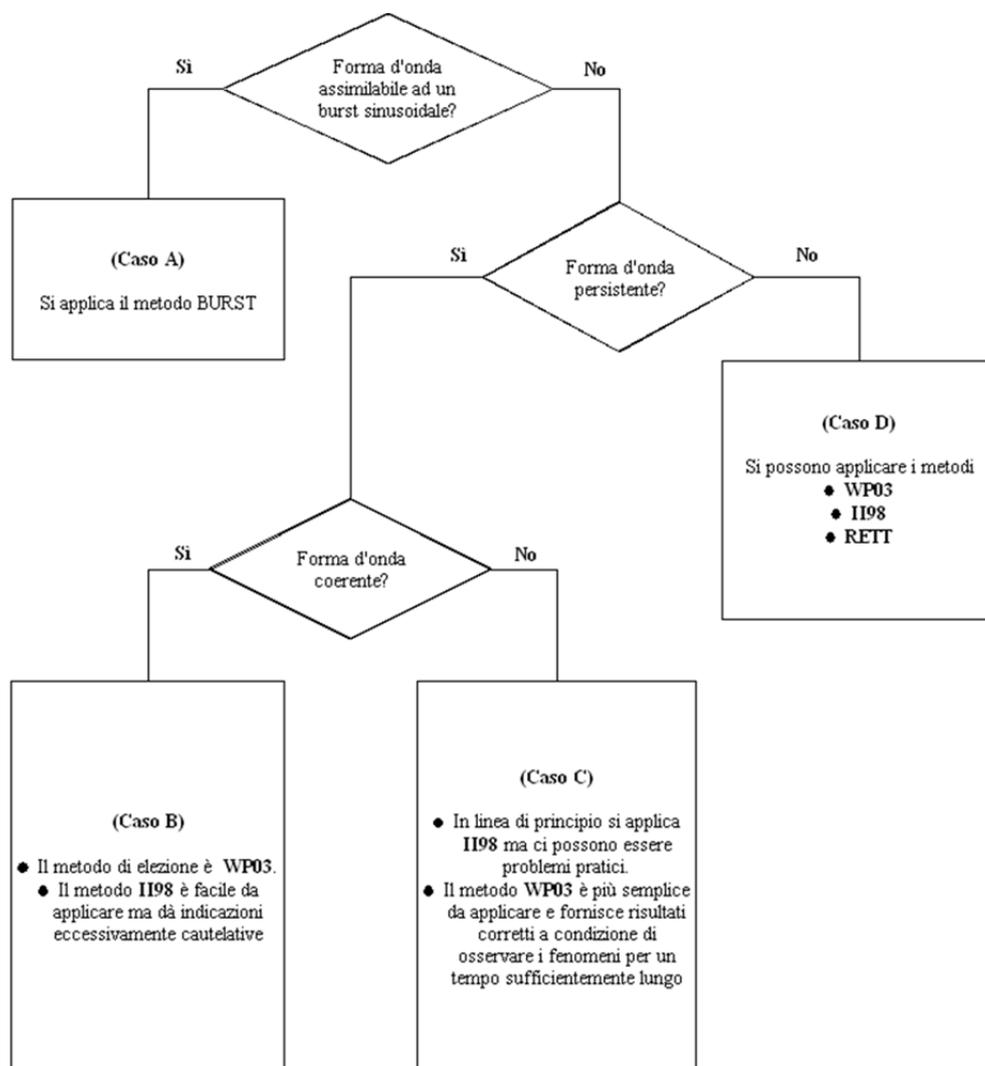


Fig. 6 - Diagramma a blocchi per la scelta dell'approccio di valutazione

Per un *burst* di ampiezza pari a 100 microtesla e frequenza variabile tra 100 Hz e 10 kHz, si ottengono i risultati riportati in Tab. 1.

Per interpretare i dati della tabella si tenga conto del fatto che il metodo BURST fa riferimento agli esatti livelli di riferimento ICNIRP specificati nelle linee guida, mentre per calcolare l'indice WP03 si

utilizzano filtri analogici o numerici la cui risposta in ampiezza può, come si è detto, discostarsi da essi in corrispondenza della *frequenza critica* ICNIRP di 820 Hz / 800 Hz.

9.2 - Caso B: forma d'onda persistente coerente

Si tratta della forma d'onda originata dalla somma di più contributi sinusoidali correlati in fase e aventi frequenze multiple (dette *armoniche*) di una frequenza comune (detta *fondamentale*). È il caso, per esempio, delle forme d'onda periodiche emesse da sorgenti a frequenza fissa caratterizzate da un certo livello di distorsione armonica.

Poiché l'approccio basato sull'indice ICNIRP originale II98 fornisce in questo caso risultati quasi sempre eccessivamente cautelativi, lo Statement ICNIRP-2003 propone come approccio di elezione per le forme d'onda coerenti il metodo del picco ponderato WP03.

Tab. 1 - Applicazione dei metodi BURST e WP03 al burst sinusoidale

A_{PICCO} [μT]	f_{BURST} [Hz]	Livello di riferimento ICNIRP @ f_{BURST} [μT]	Indice BURST	STEP	Indice WP03
100	100	250	0.282	No	0.279
				Sì	2.24
100	1000	30.7	2.30	No	1.82
				Sì	2.24
100	3000	30.7	2.30	No	2.38
				Sì	2.24
100	10000	30.7	2.30	No	2.42
				Sì	2.30

Applicazione dell'approccio II98

- È possibile limitare il tempo di osservazione a qualche periodo della frequenza fondamentale.
- Il risultato potrebbe con buona probabilità risultare eccessivamente cautelativo.

Applicazione dell'approccio WP03

- È possibile limitare il tempo di osservazione a qualche periodo della frequenza fondamentale.
- L'indicazione strumentale a display dovrebbe essere sufficientemente stabile da rendere superfluo l'utilizzo della funzione MAX HOLD.

9.3 - Caso C: forma d'onda persistente non-coerente

Si tratta della forma d'onda originata dalla somma di più contributi sinusoidali senza correlazione di fase e/o aventi frequenze che non risultano multiple di una frequenza comune. Può, per esempio, risultare dalla sovrapposizione delle emissioni di più sorgenti tra loro indipendenti.

I metodi di elezione in questo caso sono l'indice ICNIRP originale II98 e il metodo del picco ponderato WP03, che dovrebbero in linea di principio fornire lo stesso risultato.

Applicazione dell'approccio II98

- Può essere impossibile scegliere un tempo di osservazione che sia multiplo del periodo di tutte le componenti spettrali significative; a causa di ciò, l'analisi spettrale sarà affetta dal fenomeno dello *spectral leakage*, con conseguente comparsa di componenti spettrali "spurie", cioè non presenti nel

segnale originale. In alcuni casi il problema può essere risolto aumentando il tempo di osservazione e/o applicando tecniche di *windowing* e interpolazione spettrale, ma – a parte la complicazione computazionale che ne consegue – non sempre si ottengono risultati completamente soddisfacenti.

- I file dati possono risultare molto voluminosi nel caso di lunghi tempi di osservazione.

Applicazione dell'approccio WP03

- Occorre prolungare la misura per un tempo di osservazione sufficientemente lungo da poter supporre che si presenti la condizione di coincidenza temporale dei valori di picco delle diverse componenti spettrali; in molti casi può essere problematico averne la certezza.
- I file dati possono risultare molto voluminosi nel caso di lunghi tempi di osservazione.

9.4 - Caso D: forma d'onda non persistente

Si tratta delle forme d'onda limitate nel tempo, che esistono cioè per un tempo limitato (che nel seguito chiameremo *transitorio*), preceduto e seguito da “silenzio”, cioè assenza di campo distinguibile dal rumore. Sono generate dalle emissioni delle sorgenti genericamente “impulsive”, che risultano abbastanza frequenti in ambito occupazionale. In formule, detta $b(t)$ la generica componente dell'induzione magnetica, dovrà essere possibile scegliere un istante iniziale ed identificare un intervallo t_p in modo che risulti:

$$\begin{cases} b(t) \neq 0 & 0 \leq t \leq t_p \\ b(t) = 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (6)$$

Come già si vede, nell'analisi degli approcci alla valutazione da utilizzarsi in questo caso si cercherà di prescindere per quanto possibile dall'effettiva forma del transitorio.

Applicazione dell'approccio RETT

- È l'approccio di elezione, indicato fin dalle Linee Guida ICNIRP-1998, nel caso di impulsi perfettamente rettangolari.
- Quanto meno il segnale assomiglia ad un impulso rettangolare, tanto più vi è discrezionalità nella scelta del valore di t_p . Il problema può essere aggirato adottando un atteggiamento cautelativo, cioè scegliendo, tra quelli plausibili, il valore di t_p che dà luogo al valore più alto dell'indice RETT.

Applicazione dell'approccio II98

Come è noto, i segnali non persistenti (o limitati nel tempo) sono caratterizzati da uno spettro continuo, mentre l'indice II98 è a rigore definito solo con riferimento ad uno spettro discreto. È possibile tuttavia generalizzare nel modo seguente tale definizione.

Cominciamo dal ricordare che la trasformata di Fourier del segnale di cui all'Eq.6 è data da:

$$B(f) = \int_0^{t_p} b(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (7)$$

Per l'antitrasformata si può dimostrare che:

$$b(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(f) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t} df = 2 \int_0^{+\infty} |B(f)| \cdot \cos[2\pi ft + \arg(B(f))] df \quad (8)$$

Sulla base di queste espressioni, risulta abbastanza naturale generalizzare come segue l'espressione dell'indice II98:

$$II98 = \sqrt{2} \int_{1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{|B(f)|}{B_{L,f}} df + \sqrt{2} \int_{65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{|B(f)|}{30.7 \mu T} df \quad (9)$$

Applicazione dell'approccio WP03

- Occorre far partire la misura un po' prima dell'inizio del transitorio e prostrarla fino a dopo il termine dello stesso.
- Se ci si vuole limitare all'utilizzo del display (con lo strumento necessariamente in modalità STD), la funzione MAX HOLD è in questo caso pressoché irrinunciabile. Infatti, se non disponibile, il valore mostrato non risulterà probabilmente abbastanza stabile per essere letto in modo affidabile. In tal caso, per calcolare l'indice WP03, si dovrà utilizzare il segnale prelevato dalle uscite analogiche, campionato ed elaborato con opportune tecniche numeriche, diverse a seconda che si decida di lavorare con lo strumento in modalità FS oppure in modalità STD.

Confronto tra i diversi approcci

Nel caso della forma d'onda rettangolare, se il tempo di salita dell'impulso risulta abbastanza minore della costante di tempo corrispondente alla *frequenza critica* ICNIRP di 820 Hz / 800 Hz, l'approccio WP03 dà luogo a valutazioni in genere diverse (più cautelative) rispetto a quelle ottenute con RETT; solo per impulsi molto corti, quando la frequenza equivalente del metodo RETT risulta maggiore della *frequenza critica* ICNIRP, i due metodi forniscono la stessa indicazione.

Come si è detto, la determinazione dell'indice WP03 è possibile sia per via numerica sia per via strumentale, purché lo strumento disponga della funzione MAX HOLD; in ogni caso, poiché i fronti (se sufficientemente ripidi) passano pressoché inalterati attraverso il filtro che implementa l'indice, il valore risultante dipende solo dall'ampiezza e non dalla durata dell'impulso.

Per un impulso singolo di ampiezza pari a 100 microtesla e durata variabile tra i 50 ms e i 100 μs, si hanno i risultati riportati in Tab. 2.

Tab. 2 - Applicazione dei metodi RETT e WP03 all'impulso singolo rettangolare

A _{PICCO} [μT]	t _p [s]	f _{EQ} =1/2t _p [Hz]	Livello di riferimento ICNIRP @ f _{EQ} [μT]	Indice RETT	Indice II98	Indice WP03
100	0.05	10	2500	0.02828	9.719	2.303
100	0.01	50	500	0.1414	9.722	2.303
100	0.001	500	50	1.414	9.722	2.303
100	0.0001	5000	30.7	2.303	8.961	2.303

10 - Note conclusive

- Per inquadrare correttamente la forma d'onda in analisi, classificarla in modo appropriato nella casistica A-D sopra introdotta e scegliere infine l'approccio di valutazione più appropriato non si può in genere prescindere dall'osservazione del segnale nel dominio del tempo.
- In tutti i casi in cui sia appropriato servirsi dell'approccio WP03, si dovrebbe a rigore verificare preliminarmente che il contenuto spettrale del segnale sia interamente contenuto nell'intervallo di frequenze tra 8 Hz e 65 kHz. Se questa condizione non è verificata, si introduce una distorsione di fase relativa alle *frequenze critiche* ICNIRP di 8 Hz e di 65 kHz (150 kHz per la popolazione), che non risulta giustificata sul piano biofisico. Stando però alle indicazioni contenute nella bozza

ICNIRP-2009 (5), questa restrizione verrebbe parzialmente rilassata qualora entrassero definitivamente in vigore le nuove linee guida in essa presentate.

Riconoscimenti

Le considerazioni svolte in questo rapporto tecnico sono maturate nell'ambito di recenti attività che hanno portato il nostro gruppo a confrontarsi con numerose situazioni di esposizione a campi magnetici di bassa frequenza con forma d'onda complessa.

Queste attività si sono svolte in collaborazione e con il supporto finanziario delle seguenti aziende ed istituzioni: Trenitalia SpA (contratto di consulenza TRNITCORP.7437 del 15/02/2008 per una *Valutazione dosimetrica per esposizione a campo magnetico a bassa frequenza a bordo di materiale rotabile*), Ispesl (contratto di ricerca B/N.02/DIL/07 del 24/11/2008 per l'*Utilizzo di tecniche di dosimetria numerica per la valutazione dell'esposizione a campi elettromagnetici degli operatori sanitari operanti su apparati di risonanza magnetica (inclusa la pratica interventistica), nel quadro delle disposizioni della direttiva 2004/40/CE – sottoprogetto bassa frequenza*), Ispra (convenzione del 9/1/2009 per una *Attività di studio inerente l'esposizione della popolazione a sorgenti ELF con forma d'onda complessa*), Azienda USL7 di Siena (convenzione del 25/05/2009 per una *Collaborazione in tema di rischi occupazionali derivanti da agenti fisici - campi elettromagnetici*).

Bibliografia

1. ICNIRP Guidelines April 1998: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)"; Health Physics, Vol.74, N.4, pp.494-522.
2. ICNIRP Statement March 2003: "Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines"; Health Physics, Vol.84, N.3, pp.383-387.
3. T.Grandke: "Interpolation algorithms for discrete Fourier transforms of weighted signals"; IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. IM-32, June 1983, pp 350-355.
4. K.Jokela: "Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields"; Health Physics, Vol.79, N.4, pp.373-388.
5. Draft ICNIRP Guidelines July 2009: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)".