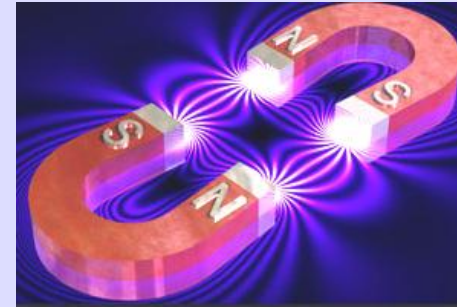


# **dba** incontri 2016

Campi Elettromagnetici nei luoghi di lavoro.  
Legislazione, Valutazione, Tutela.

Bologna, 21 ottobre 2016



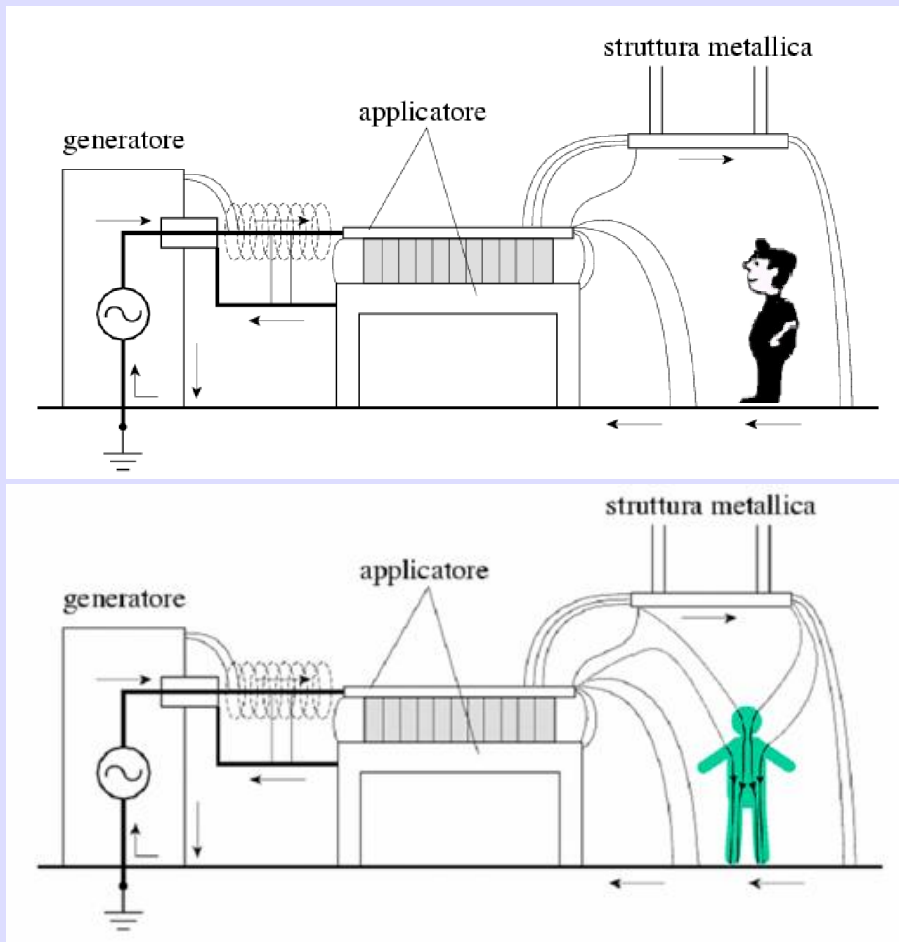
**Grandezze fisiche e criteri  
di valutazione del rischio  
di esposizione a CEM**

**Daniele Andreuccetti**

*IFAC-CNR, Firenze*



## Interazione tra CEM e sistemi biologici



Le **normative** hanno l'obiettivo di **prevenire** (solo) gli **effetti accertati** dei campi elettromagnetici.

**Esposizione:** un oggetto biologico viene immerso in un campo elettromagnetico.

**Accoppiamento:** le forze del campo inducono **grandezze fisiche** all'interno dei tessuti.

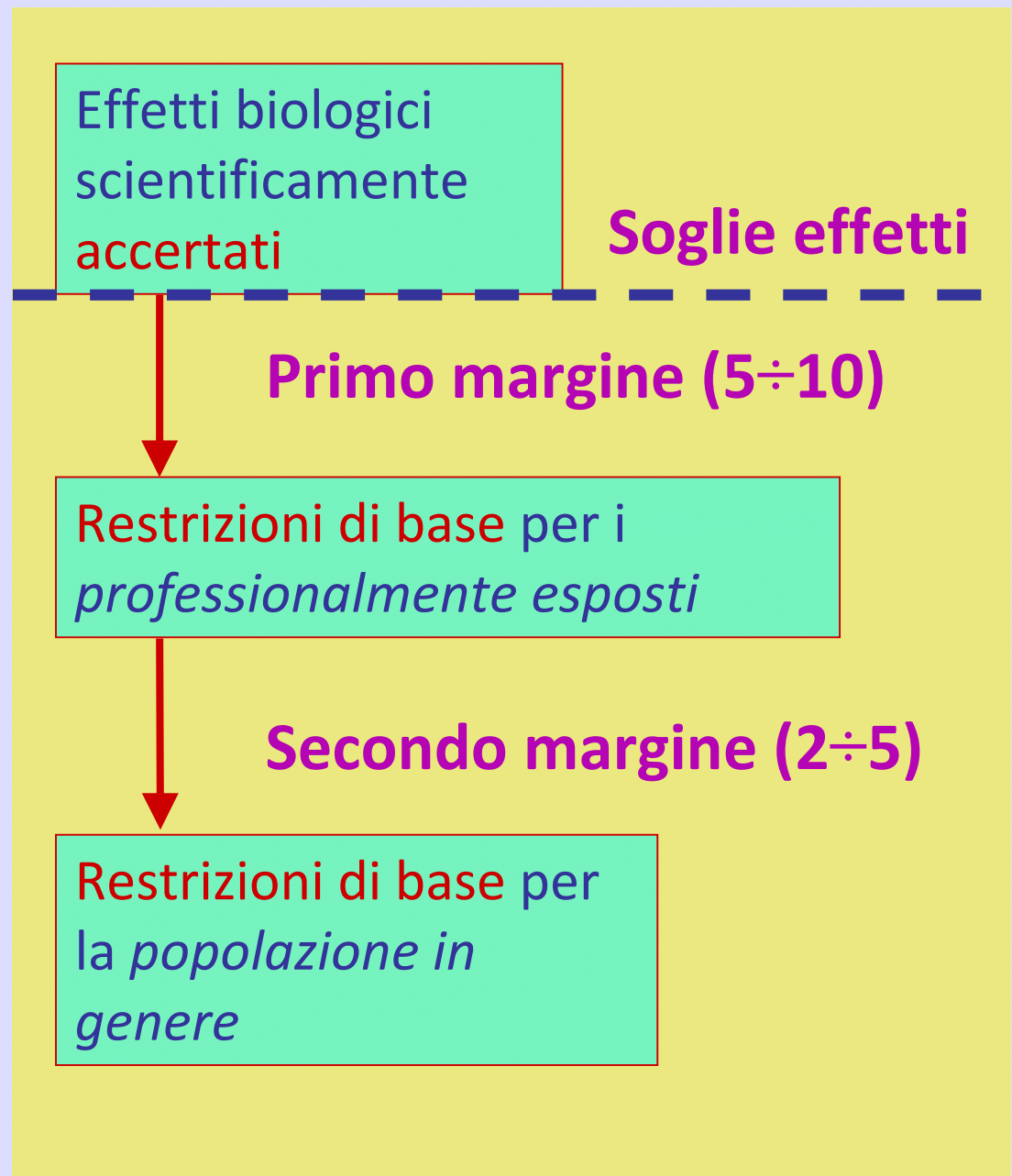
**Interazione:** i fenomeni fisici indotti dal campo esterno provocano una **deviazione dalle condizioni di equilibrio elettrico** almeno a livello **molecolare**.

**Effetto:** variazione morfologica o funzionale in tessuti, organi, o sistemi.

Si parla di **danno** quando un effetto supera la **capacità di compensazione** dell'organismo

## Come nasce una norma di sicurezza per i campi elettromagnetici

Tanto le *soglie degli effetti* quanto le *restrizioni di base* sono espresse in termini di **grandezze di base** (per lo più interne all'organismo esposto): sono le grandezze *direttamente responsabili degli effetti biologici* o almeno quelle più *adatte a correlare l'effetto osservato con l'intensità del campo*.





## Le grandezze di base secondo l'ICNIRP

Effetto	Banda di frequenza	Grandezza di base	
Induzione di nausea o vertigini	0 - 1 Hz	Induzione magnetica <b>B</b> esterna e sua variazione $\Delta B$ su 3 secondi	(1)
Stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili	0 - 10 MHz	Campo elettrico interno <b>E<sub>in</sub></b>	(2)
Riscaldamento	100 kHz - 10 GHz	Rateo interno di assorbimento specifico ( <b>SAR</b> )	(2)

1. Grandezza esterna
2. Grandezze interne

$$SAR = \frac{\sigma E_{in}^2}{\rho}$$

## Distanze di rispetto e zonizzazione



# Restrizioni di base ICNIRP 2014

## Effetto di induzione di nausea o vertigini

### Basic restrictions for $\Delta B$

In order to prevent transient sensory effects such as vertigo and nausea arising from motion-induced electric field below a few Hz, ICNIRP recommends that the change of the magnetic flux density  $\Delta B$  should not exceed 2 T during any 3-s period. Note that the maximum value for the measured  $\Delta B$  may not always occur at the end of the 3-s period because the direction of  $dB/dt$  may change during the period. The basic restriction for  $\Delta B$  has been plotted in Fig. 1

Frequency $f$ (Hz)	Basic restrictions			
	$\Delta B$ (T) <sup>a</sup>	$B_{\text{peak to peak}}$ (T)	Internal electric field strength [ $\text{Vm}^{-1}$ (peak)]	
Critical effect	Vertigo due to movement in static B field	Vertigo due to time-varying B field	PNS effects due to movement in static B field and due to time-varying B field	Phosphenes due to movement in static B field and due to time-varying B field
Exposure condition <sup>b</sup>	Uncontrolled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled
0	2			
0–1		2		
0–0.66			1.1	1.1
0.66–1 <sup>c</sup>			1.1	0.7/ $f$

<sup>a</sup>The maximum change of magnetic flux density  $\Delta B$  is determined over any 3 s period.

<sup>b</sup>For controlled exposure conditions, a  $\Delta B$  of 2 T may be exceeded.

# Restrizioni di base ICNIRP 2014

**Effetti di stimolazione  
dei tessuti  
elettricamente eccitabili**

## Basic restrictions for induced electric field

In order to prevent stimulation of peripheral nerves in controlled exposure, ICNIRP recommends that the induced electric field should not exceed the basic restriction of  $1.1 \text{ Vm}^{-1}$  (peak) over the frequency range of motion-induced field. This restriction was obtained by converting the basic restriction of  $0.8 \text{ Vm}^{-1}$  (Root-Mean-Square) to the peak value that applies to all tissues in the frequency range below 3 kHz (ICNIRP 2010).

Basic restrictions				
Frequency $f$ (Hz)	$\Delta B$ (T) <sup>a</sup>	$B_{\text{peak to peak}}$ (T)	Internal electric field strength [ $\text{Vm}^{-1}$ (peak)]	
Critical effect	Vertigo due to movement in static B field	Vertigo due to time-varying B field	PNS effects due to movement in static B field and due to time-varying B field	Phosphenes due to movement in static B field and due to time-varying B field
Exposure condition <sup>b</sup>	Uncontrolled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled
0	2			
0–1		2		
0–0.66			1.1	1.1
0.66–1 <sup>c</sup>			1.1	$0.7/f$

<sup>a</sup>The maximum change of magnetic flux density  $\Delta B$  is determined over any 3 s period.

<sup>b</sup>For controlled exposure conditions, a  $\Delta B$  of 2 T may be exceeded.

In order to avoid the induction of magnetophosphenes, the strength of the induced electric field should not exceed the basic restrictions for occupational exposure defined by ICNIRP (2010) for time-varying magnetic fields, with an extension to frequencies below 1 Hz. The linear increase of the basic restriction for magnetophosphenes as a function of  $1/f$  ceases at 0.66 Hz where it reaches the level of  $1.1 \text{ Vm}^{-1}$  (peak), which is the basic restriction for peripheral nerve stimulation (Fig. 2). Basic restrictions for magnetophosphenes apply only to uncontrolled exposures, since workers in controlled exposure situations are considered to be able to avoid this effect by limiting their motion speed. Basic restrictions for peripheral nerve stimulation apply to both conditions.

## Effetti di stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili

**Table 2.** Basic restrictions for human exposure to time-varying electric and magnetic fields.

Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric field (V m <sup>-1</sup> )
Occupational exposure CNS tissue of the head	1–10 Hz	0.5/f
	10 Hz–25 Hz	0.05
	25 Hz–400 Hz	2 × 10 <sup>-3</sup> f
	400 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	2.7 × 10 <sup>-4</sup> f
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	2.7 × 10 <sup>-4</sup> f
General public exposure CNS tissue of the head	1–10 Hz	0.1/f
	10 Hz–25 Hz	0.01
	25 Hz–1000 Hz	4 × 10 <sup>-4</sup> f
	1000 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	1.35 × 10 <sup>-4</sup> f
	All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz
	3 kHz–10 MHz	1.35 × 10 <sup>-4</sup> f

**Notes:**

- f is the frequency in Hz.
- All values are rms.
- In the frequency range above 100 kHz, RF specific basic restrictions need to be considered additionally.

In view of the considerations above for frequencies in the range 10 Hz to 25 Hz, occupational exposure should be limited to fields that induce electric field strengths in CNS tissue of the head (i.e., the brain and retina) of less than 50 mV m<sup>-1</sup> in order to avoid the induction of **retinal phosphenes**. These restrictions should also prevent any possible transient effects on brain function. These effects are not considered to be adverse health effects; however, ICNIRP recognizes that they may be disturbing in some occupational circumstances and should be avoided but no additional reduction factor is applied. Phosphene thresholds rise rapidly at higher and

Exposure in controlled environments, where workers are informed about the possible transient effects of such exposure, should be limited to fields that induce electric fields in the head and body of less than 800 mV m<sup>-1</sup> in order to avoid peripheral and central myelinated nerve stimulation. A reduction factor of 5 has been applied to a stimulation threshold of 4 V m<sup>-1</sup> in order to account for the uncertainties described above. Such restrictions rise above 3 kHz.

**Time averaging**

ICNIRP recommends that the restrictions on internal electric fields induced by electric or magnetic fields including transient or very short-term peak fields be regarded as **instantaneous values** which should not be time averaged (see also section on non-sinusoidal exposure).



# Restrizioni di base ICNIRP 1998

## Effetti termici

**Table 4.** Basic restrictions for time varying electric and magnetic fields for frequencies up to 10 GHz.<sup>a</sup>

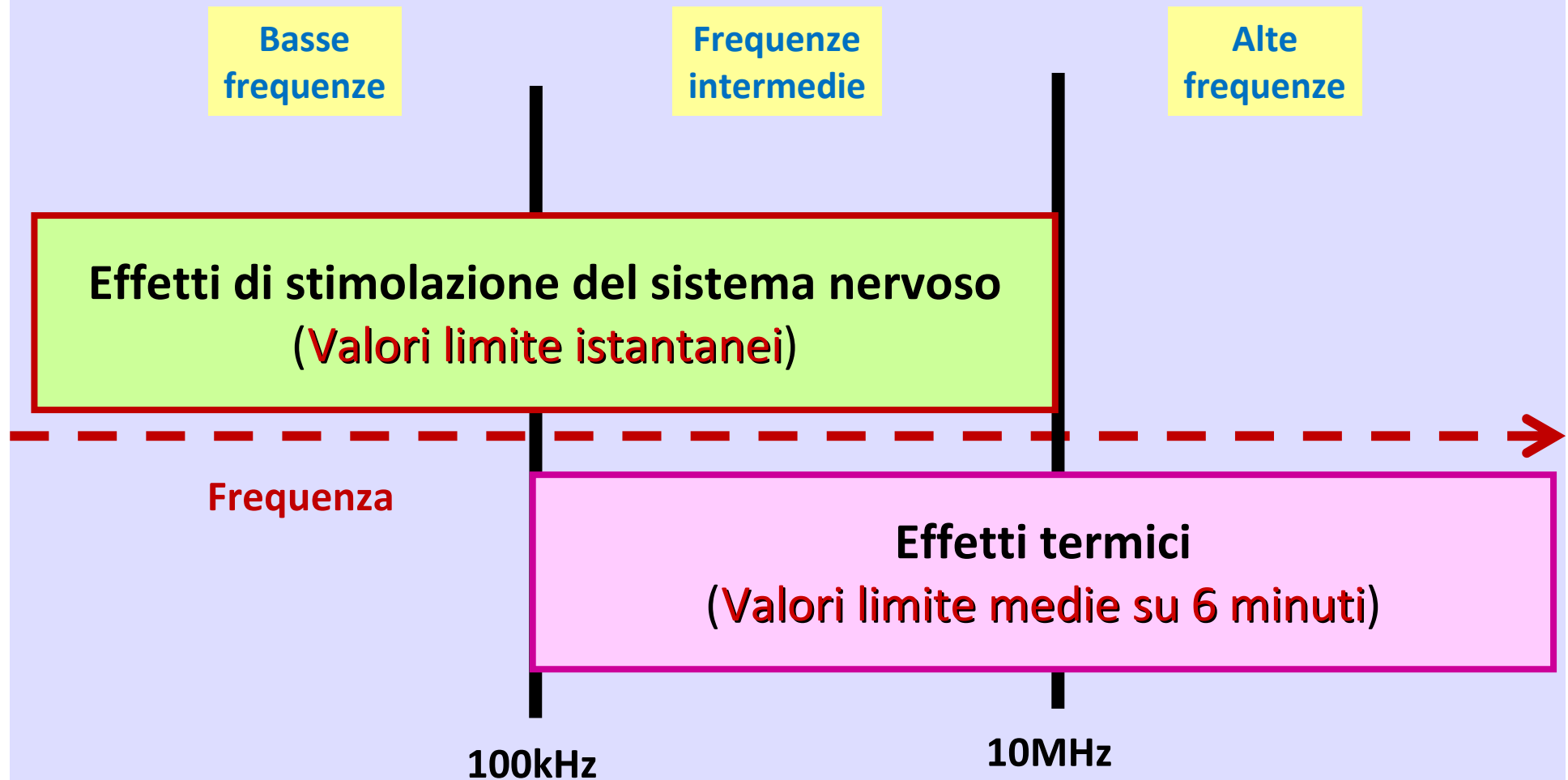
Exposure characteristics	Frequency range	Current density for head and trunk (mA m <sup>-2</sup> ) (rms)	Whole-body average SAR (W kg <sup>-1</sup> )	Localized SAR (head and trunk) (W kg <sup>-1</sup> )	Localized SAR (limbs) (W kg <sup>-1</sup> )
Occupational exposure	up to 1 Hz	40	—	—	—
	1–4 Hz	40/ <i>f</i>	—	—	—
	4 Hz–1 kHz	10	—	—	—
	1–100 kHz	<i>f</i> /100	—	—	—
	100 kHz–10 MHz	<i>f</i> /100	0.4	10	20
	10 MHz–10 GHz	—	0.4	10	20
General public exposure	up to 1 Hz	8	—	—	—
	1–4 Hz	8/ <i>f</i>	—	—	—
	4 Hz–1 kHz	2	—	—	—
	1–100 kHz	<i>f</i> /500	—	—	—
	100 kHz–10 MHz	<i>f</i> /500	0.08	2	4
	10 MHz–10 GHz	—	0.08	2	4

<sup>a</sup> Note:

5. All SAR values are to be averaged over any 6-min period.

- La sperimentazione di laboratorio su volontari ed animali ha evidenziato che **nessun effetto termico** si manifesta per esposizioni che determinino una SAR **inferiore a 4 W/kg** come valore medio sull'intero organismo.

# Intervalli di frequenza, effetti, metrica



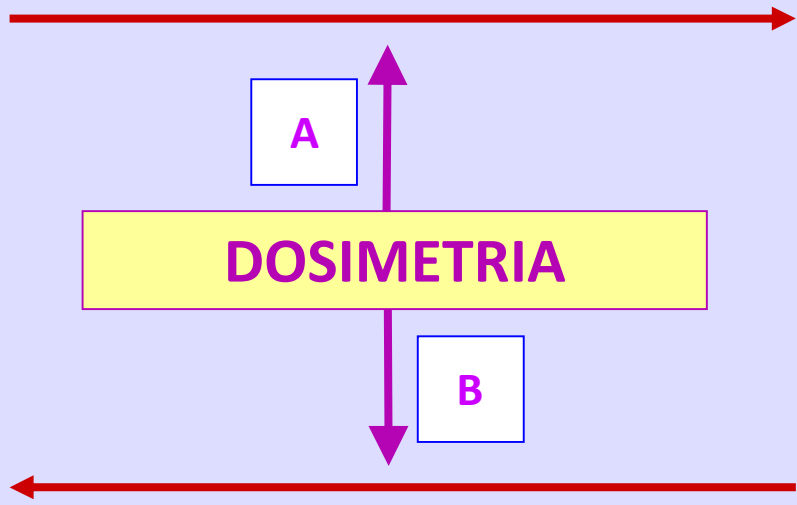
# Dosimetria e normative

**Restrizioni di base ( $E_{in}, SAR$ ) per i professionalmente esposti e per la popolazione in genere**

**A: Costruzione della normativa**

Individuazione dei livelli di riferimento a partire dalle **restrizioni di base** (modelli dosimetrici **semplificati e cautelativi**)

**Livelli di riferimento ( $E, H, B, S$ ) per i professionalmente esposti e per la popolazione in genere**



**A) Le normative utilizzano modelli dosimetrici cautelativi, in modo che si possa ritenere che il rispetto dei livelli di riferimento garantisca il rispetto delle restrizioni di base in condizioni di esposizione standardizzate.**

**B: Verifica del rispetto delle normative**

Eventuale verifica del rispetto delle **restrizioni di base** quando i **livelli di riferimento** sono superati (modelli **specifici il più possibile realistici**)

**B) In linea di principio, è necessario applicare “in proprio” i modelli dosimetrici, se si vuole verificare il rispetto delle restrizioni di base laddove risultino superati i livelli di riferimento!**

Normativa	Limiti in termini di grandezze dosimetriche	Limiti in termini di grandezze radiometriche
Linee guida ICNIRP	Restrizioni di base	Livelli di riferimento
Raccomandazione 1999/519/CE	Limiti di base (LB)	Livelli di riferimento (LR)
Direttiva 2013/35/UE	Valori limite di esposizione (VLE)	Livelli di azione (LA)
D.Lgs. 1 agosto 2016 n,159	Valori limite di esposizione (VLE)	Valori di azione (VA)

## La Direttiva 2013/35/UE

**Effetti NON termici**  
(Allegato II)  
Campo **magnetico** tra 0 e 1 Hz

*VLE sensoriali*  
*VLE sensoriali per i soli arti*  
*VLE sanitari*  
*LA per correnti di contatto*  
*LA per effetti indiretti*

**Effetti NON termici**  
(Allegato II)  
Tra 1 Hz e 10 MHz

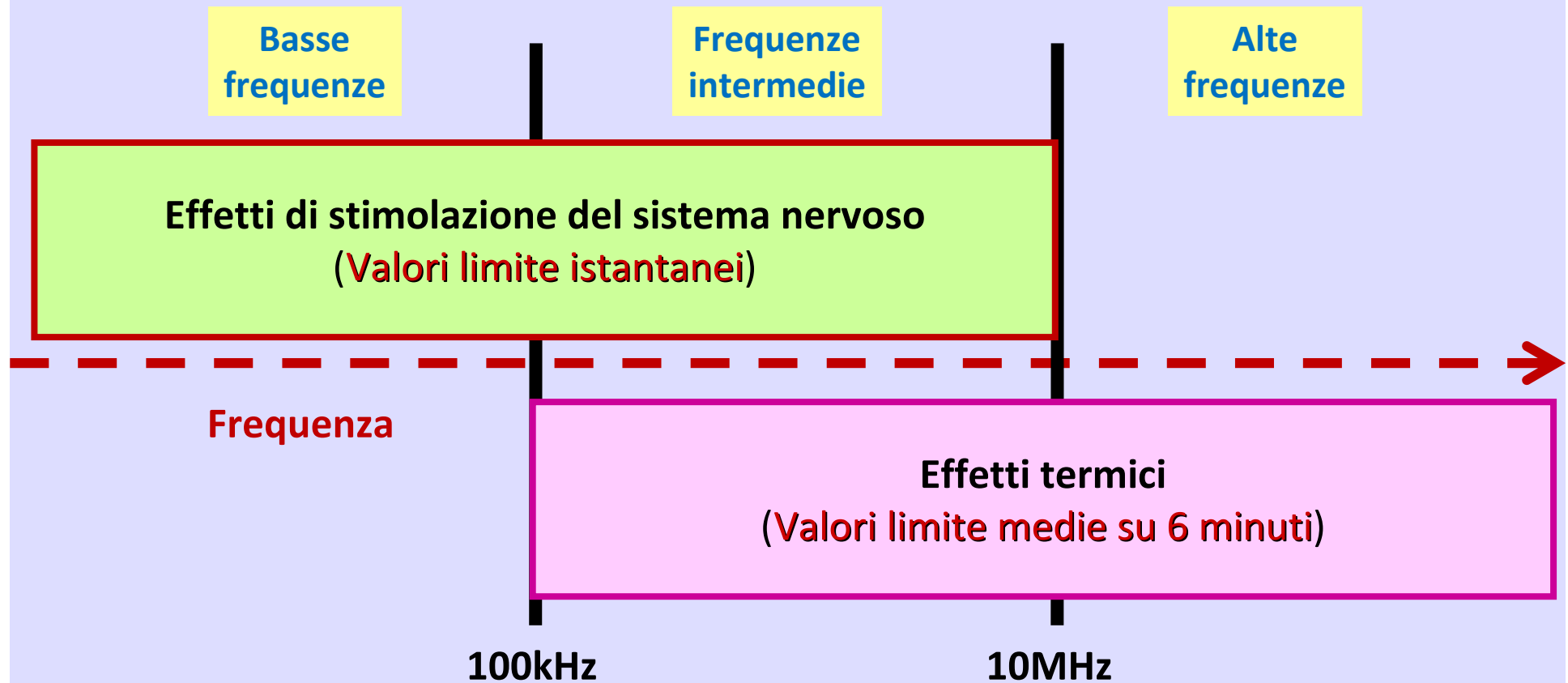
*VLE sanitari*  
*VLE sensoriali*  
*LA inferiori*  
*LA superiori*  
*LA per i soli arti*  
*LA per correnti di contatto*

**Effetti termici**  
(Allegato III)  
Tra 100 kHz e 300 GHz

*VLE sanitari*  
*VLE sensoriali*  
*LA*  
*LA per correnti di contatto e indotte*



# Gestione delle forme d'onda complesse



*Nel caso dei campi non sinusoidali, la valutazione dell'esposizione ... si basa sul **metodo del picco ponderato** (filtraggio nel dominio del tempo), spiegato nella guida pratica non vincolante di cui all'articolo 14, ma possono essere applicate altre procedure di valutazione scientificamente provate e validate, purché conducano a risultati approssimativamente equivalenti e comparabili.*

*Per campi multifrequenza l'analisi è basata sulla **somma quadratica**, come indicato nella guida pratica non vincolante di cui all'art. 14.*

## Forme d'onda complesse - effetti termici

$$\begin{aligned}
 B_1(t) &= \sqrt{2}B_1^{\text{rms}} \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) \\
 B_2(t) &= \sqrt{2}B_2^{\text{rms}} \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) \\
 &\dots \\
 B_N(t) &= \sqrt{2}B_N^{\text{rms}} \cos(2\pi f_N t + \theta_N)
 \end{aligned}$$

$$I_{\text{TERM}} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{B_i^{\text{RMS}}}{B_{\text{LA-TERM}}(f_i)} \right)^2 \leq 1$$

- Si applica a segnali **a banda larga** (p.es.: presenza simultanea di più sorgenti).
- Si basa sulla limitazione del **valore efficace (RMS)**.
- Fa storicamente riferimento all'eventualità di misurare le ampiezze delle singole componenti spettrali o con uno strumento a banda larga (accendendo una sorgente per volta), oppure con un radiorecettore o un analizzatore di spettro; in tutti i casi **le relazioni di fase tra le componenti spettrali sono sconosciute e vengono pertanto ignorate**.
- *Le relazioni di fase di fatto hanno poca o nessuna rilevanza dal punto di vista termico.*
- Esistono **limitazioni ulteriori sul valore RMS di picco**.

**Il metodo del picco ponderato** consiste nel combinare opportunamente i vari contributi spettrali della grandezza considerata, pesando ognuno in rapporto al valore limite alla frequenza corrispondente, tenendo conto in modo appropriato anche delle rispettive fasi

$$\begin{aligned}
 B_1(t) &= \sqrt{2}B_1^{\text{rms}} \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) \\
 B_2(t) &= \sqrt{2}B_2^{\text{rms}} \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) \\
 &\dots \\
 B_N(t) &= \sqrt{2}B_N^{\text{rms}} \cos(2\pi f_N t + \theta_N)
 \end{aligned}$$

**Determination of the weighted peak exposure.** The weighting may be implemented by computing first the spectrum of the waveform and then applying eqn (7). In many applications, however, it is more convenient to use analog or digital filtering of the waveform in the time domain. The gain of the filter (ratio of the output to the input signal) should vary as a function of frequency in direct proportion to the exposure limit  $G = EL(f_{\text{ref}})/EL(f)$ , where  $EL$  is the limit at frequency  $f$  and  $f_{\text{ref}}$  is an arbitrary reference frequency from 1 Hz to 100 kHz. The peak value of the filtered waveform should not exceed the exposure limit (basic restriction or reference level) converted to the peak (amplitude) value at the reference frequency. Table 6 shows an example of the derived peak

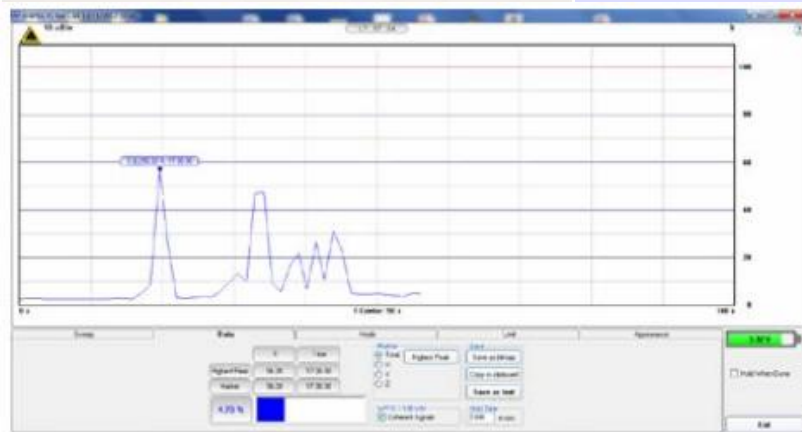
limits. In addition to the amplitude physical filters always influence on the phase of the field, which changes the peak value of the filtered field. As shown in Figs. 1, 2, and 3 the limits are divided to the frequency ranges where the limit varies directly proportional to  $1/f^2$ ,  $1/f$ ,  $f^0$  (constant), or  $f$ . On the  $1/f^2$ ,  $1/f$ ,  $f^0$ , and  $f$  ranges the phase angle of the filter  $\varphi_i$  (see eqn 7) is 180, 90, 0, and  $-90^\circ$ , respectively. The weighting filter can be approximated with an electronic or digital filter where the attenuation should not deviate more than 3 dB and phase more than  $90^\circ$  from the exact piecewise linear frequency response.

$$I_{WP} = \text{Max} \left| \sum \frac{B_i^{\text{rms}}}{B_{\text{LA-NONTERM}}(f_i)} \cos[2\pi f_i t + \theta_i + \varphi(f_i)] \right| \quad [\leq 1]$$

## Strumentazione commerciale che incorpora il metodo del picco ponderato



Narda (PMM)



Funzione del Picco Ponderato con registrazione nel tempo.

### Safety Evaluation Within a Magnetic Field Environment

#### Narda

- ▲ Direct evaluation of field exposure in comparison with major standards and regulations such as Directive 2013/35/EU for workplaces
- ▲ Automatic exposure evaluation for various waveforms in compliance with Weighted RMS and Weighted Peak methods
- ▲ Eliminates the overestimation that occasionally occurs with FFT-based evaluation
- ▲ Ultra wide frequency range (1 Hz to 400 kHz)
- ▲ Wide measurement range up to 80 mT (dependent on type)
- ▲ IEC/EN 62311 and 62233 standard compliant including isotropic 100 cm<sup>2</sup> and 3 cm<sup>2</sup> probe
- ▲ Three-axis analog signal output



Exposure Level Tester ELT-400



## Modalità di applicazione del metodo del picco ponderato



**Metodo del picco ponderato  
in hardware**

**Metodo del picco ponderato  
in software**



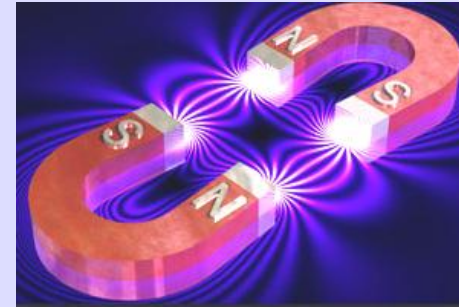
**Scheda di acquisizione dati**



# **dba** incontri 2016

Campi Elettromagnetici nei luoghi di lavoro.  
Legislazione, Valutazione, Tutela.

Bologna, 21 ottobre 2016



**È tutto, grazie!**

Daniele Andreuccetti

*IFAC-CNR, Firenze*

