

Grandezze fisiche e criteri di valutazione del rischio di esposizione a CEM¹

Daniele Andreuccetti, CNR-IFAC, Firenze

1. Estratto e adattato dal testo "Grandezze fisiche e criteri di valutazione del rischio di esposizione a CEM", di D. Andreuccetti, pubblicato negli Atti del convegno dBA Incontri 2016 "Campi elettromagnetici nei luoghi di lavoro: legislazione, valutazione, tutela" svoltosi a Bologna il 21 ottobre 2016.

Indice

1 – Introduzione	3
2 – Il razionale scientifico delle normative.....	4
2.1 – Distinzione tra lavoratori esposti e popolazione generale	4
2.2 – Impostazione basata sugli effetti	5
2.2.1 – Effetti acuti	5
2.2.2 – Effetti indiretti dei campi elettromagnetici.....	6
2.2.3 – Effetti a lungo termine	6
2.3 – Articolazione su due piani di valutazione	6
3 – Effetti e limiti	8
3.1 – Protezione dagli effetti di induzione di nausea o vertigini.....	8
3.2 – Protezione dagli effetti di stimolazione dei tessuti eccitabili.....	8
3.2.1 – Aspetti generali	8
3.2.2 – Nota sulle disposizioni comunitarie	9
3.2.3 – Metrica di valutazione.....	9
3.2.4 – Campi con forma d'onda complessa	10
3.3 – Protezione dagli effetti termici.....	11
3.3.1 – Aspetti generali e metrica di valutazione	11
3.3.2 – Esposizione simultanea a molteplici contributi a frequenze diverse	12
Appendice – Sintesi dei valori limite	13
A.1 – Popolazione generale: Raccomandazione 1999/519/CE	13
A.2 – Lavoratori: Direttiva 2013/35/UE	14
A.3 – Linee guida ICNIRP: esposizione professionale.....	16
Bibliografia.....	17

1 – Introduzione

Le principali grandezze fisiche coinvolte nel processo di valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici (CEM) sono in primo luogo le ben note grandezze fondamentali del campo elettromagnetico stesso: il campo elettrico E (che descrive l'interazione tra cariche elettriche), il campo magnetico H o l'induzione magnetica B (che riguardano l'interazione tra cariche in movimento e quindi tra correnti elettriche) e la densità di potenza S (che misura l'energia trasportata da un'onda elettromagnetica per unità di tempo e unità di superficie attraversata). A queste si aggiungono le grandezze indotte dal campo nei tessuti dell'organismo esposto: la corrente elettrica che scorre in essi e la potenza depositata, misurata dal parametro SAR (Specific Absorption Rate). Infine, occorre tenere presenti gli indici di esposizione, necessari in particolare per la valutazione dell'esposizione a campi con forma d'onda non sinusoidale.

Un buon punto di partenza per discutere il ruolo di queste grandezze nel processo di valutazione dell'esposizione è fornito dalle linee guida internazionali "a base scientifica". Esse, partendo da presupposti consolidati ed applicando processi logici e matematici il più possibile rigorosi, giungono a formulare:

- i **limiti di sicurezza**, cioè i valori massimi delle grandezze fisiche coinvolte, 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 o del contenuto spettrale delle grandezze considerate.

In questa sede ci riferiremo, in particolare, alle linee guida dell'International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, www.icnirp.org) [1,2,3,4,5] che, come è noto, rappresentano una delle più autorevoli fonti normative attualmente disponibili; esse costituiscono anche la base scientifica delle disposizioni in materia emanate dalle istituzioni della Comunità o dell'Unione Europea [6,7].

Le linee guida sono completate dalle norme tecniche (come le norme CEI/CENELEC, vedere ad esempio [8,9]), in cui vengono fornite le indicazioni attraverso le quali dare applicazione pratica al processo di verifica della conformità ai limiti di sicurezza indicati dalle linee guida, nel rispetto della metrica di valutazione di volta in volta appropriata.

Valutare il rischio connesso all'esposizione di un individuo ad un campo elettromagnetico significa quindi determinare – mediante misure o calcoli – il valore assunto dalle grandezze fisiche indicate nelle normative, adottando procedure di misura e/o di elaborazione conformi alle metriche richieste, in modo da poter poi confrontare il risultato ottenuto con il valore limite specificato nelle norme stesse.

2 – Il razionale scientifico delle normative

Il "razionale" delle normative comprende i presupposti scientifici e i percorsi metodologici sulla base dei quali esse sono state costruite. In ambito ICNIRP, i punti fondamentali del razionale comprendono: (1) la distinzione tra lavoratori professionalmente esposti e popolazione generale; (2) l'impostazione basata sugli effetti; (3) l'articolazione su due piani di valutazione.

2.1 – Distinzione tra lavoratori esposti e popolazione generale

L'impianto normativo pressoché universalmente accettato (non solo in ambito ICNIRP) prevede che si tuteli maggiormente (cioè con valori limite più bassi) la popolazione generale rispetto ai lavoratori professionalmente esposti, in considerazione sia dei controlli sanitari che la legge impone di effettuare nei luoghi di lavoro, sia della presenza – tra la popolazione generale – di persone ignare dell'esposizione subita e appartenenti a categorie ritenute particolarmente sensibili (bambini, anziani, individui non in buone condizioni di salute).

Come lavoratore professionalmente esposto si dovrebbe intendere chi è addetto ad una mansione che comporta necessariamente l'esposizione ai CEM, mentre tutti gli altri lavoratori dovrebbero essere trattati alla stregua della popolazione generale. In proposito, le vigenti procedure di valutazione e riduzione del rischio (vedere per esempio [9]) 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 e quindi l'accesso è consentito a chiunque senza limitazioni;
- non sono rispettati i valori limite per la popolazione generale, ma lo sono quelli per i lavoratori professionalmente esposti e pertanto l'accesso è consentito solo a questi ultimi; essi si suppongono essere:
 - in età lavorativa, buone condizioni di salute ed idonei ad operare in presenza di intensi campi elettromagnetici,
 - al corrente dell'esposizione subita e informati sulla presenza e sulla posizione delle sorgenti,
 - addestrati a limitare l'esposizione e a far fronte alle eventuali conseguenze di una sovraesposizione accidentale,
 - sottoposti a regolare sorveglianza sanitaria;
- non sono rispettati neppure i valori limite per la protezione dei lavoratori professionalmente esposti e quindi l'accesso dovrebbe, di regola, essere impedito a chiunque.

Per altro, anche in luoghi riservati ai soli addetti, i limiti per la popolazione dovrebbero essere presi come riferimento per la tutela dei lavoratori particolarmente sensibili, come ad esempio i portatori di dispositivi medici impiantati.

Queste considerazioni 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.

2.2 – Impostazione basata sugli effetti

Le normative di protezione dai CEM hanno l'obiettivo di scongiurare l'eventualità che individui umani siano esposti a livelli di campo tanto intensi da provocare effetti biologici o sanitari. 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. 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**), per i quali esistono evidenze scientifiche e conoscenze dettagliate sufficienti alla costruzione dei limiti di sicurezza. Per gli effetti acuti sono noti infatti: i meccanismi di azione, le grandezze fisiche coinvolte, le relative soglie in funzione della frequenza, le relazioni dose-risposta. Come vedremo, gli effetti acuti possono essere a loro volta suddivisi in tre tipologie: effetti di induzione di nausea o vertigini; effetti di stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili; effetti di riscaldamento (o termici).

2.2.1 – Effetti acuti

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 semplice, per ogni effetto la relativa norma identifica la grandezza fisica (detta **grandezza dosimetrica**) più idonea a descrivere l'interazione biofisica da cui esso viene generato, individua la soglia a cui l'effetto si manifesta (di solito variabile in funzione della frequenza), applica ad essa un conveniente margine di cautela e determina così il livello da non superare per scongiurare il manifestarsi dell'effetto stesso. In molti casi, la grandezza dosimetrica è una grandezza fisica indotta all'interno dell'organismo esposto.

La Tabella 1 riporta i principali effetti presi in considerazione dalle linee guida ICNIRP, indicando per ciascuno la grandezza dosimetrica di riferimento e l'intervallo di frequenza (in modo schematico e convenzionale) in cui l'effetto stesso si manifesta.

Tabella 1. Tipologie di effetti presi in considerazione dalle norme di sicurezza, grandezze dosimetriche di riferimento e intervalli di frequenza (convenzionali) in cui ciascun effetto si manifesta.

Effetto	Grandezza dosimetrica	Intervallo di frequenza
Induzione di nausea o vertigini	Induzione magnetica B esterna e sua variazione ΔB su 3 secondi	0 – 1 Hz
Stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili	Campo E interno	0 – 10 MHz
Riscaldamento	Rateo interno di assorbimento specifico (SAR)	100 kHz – 300 GHz

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 (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. I primi, via via che cresce la frequenza, tendono ad avere soglie più alte dei secondi; per gli effetti termici sono però 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, è quindi perfettamente possibile che finiscano per essere più restrittivi i limiti per gli effetti di stimolazione.

2.2.2 – Effetti indiretti dei campi elettromagnetici

Con effetti indiretti a breve termine si intendono le conseguenze dell'interazione dei CEM con protesi metalliche passive o dispositivi elettronici attivi impiantati nel corpo del soggetto esposto. Spesso, gli standard di prodotto di questi dispositivi indicano nei livelli di riferimento ICNIRP del 1998 [2] per la popolazione i valori limite al di sotto dei quali i dispositivi stessi sono in grado di funzionare correttamente. Dal canto loro, le normative di radioprotezione si limitano a mettere in guardia gli interessati e a 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 dispositivi impiantati 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.

2.2.3 – Effetti a lungo termine

Gli effetti a lungo termine sono connessi ad esposizioni assai prolungate ("croniche") a CEM di intensità inferiore alle soglie di insorgenza degli effetti acuti. Sebbene l'occorrenza di effetti di questo tipo non possa essere esclusa, tuttavia essa non è considerata accertata sul piano scientifico, poiché le evidenze disponibili, soprattutto di tipo epidemiologico, sono ritenute non conclusive. Essi pertanto non rientrano nel processo logico di definizione dei limiti di sicurezza.

2.3 – Articolazione su due piani di valutazione

Il rationale alla base delle linee guida ICNIRP prevede due "piani di valutazione" distinti per i limiti di sicurezza.

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 rappresentative degli effetti considerati (definite in Tabella 1). I limiti di questo tipo (che l'ICNIRP chiama **restrizioni di base**) si ottengono applicando degli opportuni fattori di sicurezza alle soglie degli effetti, cioè dei coefficienti di riduzione dell'ordine di 5 o 10 volte, introdotti per tener conto delle incertezze complessive e della variabilità individuale delle soglie stesse.

Nei casi in cui le grandezze dosimetriche sono interne all'organismo (e quindi non facilmente misurabili), le norme prevedono – ed è questo il secondo "piano di valutazione" – anche limitazioni in termini di grandezze radiometriche esterne all'individuo (e quindi 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**; essi vengono individuati a partire dalle restrizioni di base utilizzando appropriati modelli matematici, chiamati modelli dosimetrici e disponibili nella letteratura scientifica. I modelli dosimetrici simulano le condizioni di massimo accoppiamento del campo con l'organismo esposto e forniscono pertanto la massima protezione possibile. In altre parole, nel processo di definizione dei livelli di riferimento vengono introdotti degli ulteriori 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 potrebbero essere superati senza che lo siano anche le restrizioni di base.

Come conseguenza di questa impostazione, le linee guida ICNIRP prevedono un procedimento di verifica di conformità articolato 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, valutate con la metrica specificata dalla norma. Se questa condizione è verificata, l'esposizione è considerata sicura. In caso contrario, si può decidere di applicare immediatamente le opportune tecniche di riduzione dell'esposizione oppure di ricorrere al secondo passo; questo consiste nella verifica del rispetto delle restrizioni di base, da effettuarsi attraverso metodi di previsione teorica basati sull'uso di appropriati modelli di dosimetria numerica. Se le restrizioni di base sono rispettate, allora l'esposizione è considerata sicura non ostante che siano violati i livelli di riferimento. Il secondo passo non è obbligatorio, ma può eventualmente essere messo in atto se si verificano tre condizioni: (1) viene riscontrata una violazione dei livelli di riferimento, (2) la riduzione a conformità si presenta complessa o molto onerosa e (3) vi sono elementi che fanno supporre che possano essere rispettate le restrizioni di base. La questione deve essere ben valutata, perché è perfettamente possibile che il secondo passo rilevi a sua volta una violazione anche delle restrizioni di base, rendendo così inevitabile il ricorso agli interventi di mitigazione.

Tabella 2. Denominazioni (in italiano) dei limiti di sicurezza secondo le linee guida ICNIRP e secondo le disposizioni normative dell'Unione Europea.

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)

Le normative europee che si rifanno direttamente alle linee guida ICNIRP (ovvero la Raccomandazione 1999/519/CE [6] e la Direttiva 2013/35/UE [7]) ripropongono lo stesso approccio a due piani di valutazione, utilizzando però una nomenclatura diversa, che è opportuno precisare per non incorrere in interpretazioni erranee (cfr. Tabella 2).

3 – Effetti e limiti

In questo paragrafo si presentano gli aspetti generali delle linee guida ICNIRP e delle disposizioni comunitarie basate su di esse; in Appendice viene riportata una sintesi dei valori limite specificati da queste ultime.

3.1 – Protezione dagli effetti di induzione di nausea o vertigini

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

Fino alla pubblicazione delle linee guida ICNIRP del 2014 [5], la prevenzione di questi effetti si basava unicamente sulla limitazione dell'intensità del campo statico, attraverso linee guida specifiche per questo agente fisico [1,3]; lo stesso approccio è stato adottato anche nella Raccomandazione 1999/519/CE [6] – collegata alle linee guida ICNIRP del 1994 [1] – e nella Direttiva 2013/35/UE [7] – che si rifà invece alle più recenti linee guida del 2009 [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, specifica unicamente una restrizione di base consistente nella limitazione a 2 T della massima variazione ΔB dell'induzione magnetica sperimentata dal soggetto esposto nell'arco temporale di 3 secondi.

3.2 – Protezione dagli effetti di stimolazione dei tessuti eccitabili

3.2.1 – Aspetti generali

Le indicazioni dell'ICNIRP per la protezione dagli effetti di stimolazione dei tessuti elettricamente eccitabili sono state aggiornate, rispetto alle storiche linee guida del 1998 [2], con la pubblicazione delle linee guida del 2010 [4] (per frequenze da 1 Hz a 10 MHz) e successivamente delle linee guida del 2014 [5] (per frequenze fino ad 1 Hz). Queste ultime consistono in una 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/UE riprende, con proprie integrazioni, le indicazioni delle linee guida ICNIRP del 2010 ma non, fino ad oggi, quelle contenute nelle linee guida del 2014, alle quali pertanto per il momento non può essere attribuita, come si è già detto, alcuna valenza formale; la prevenzione degli effetti di

stimolazione originati dal movimento in un campo magnetostatico o dall'esposizione ad un campo magnetico variabile con frequenza inferiore ad 1 Hz è pertanto attualmente affidata, sul piano giuridico, al rispetto dei soli limiti previsti per il campo statico.

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. Nei corrispondenti livelli di riferimento, non viene adottata la distinzione tra tessuti del sistema nervoso centrale della testa e tessuti eccitabili della testa e del corpo.

3.2.2 – Nota sulle disposizioni comunitarie

La Raccomandazione 1999/519/CE [6] fa riferimento alle ormai superate linee guida ICNIRP del 1998 [2]; in esse la grandezza dosimetrica è la densità di corrente elettrica indotta nei tessuti. I suoi limiti di base sono formulati pertanto sulla base di questa grandezza, anziché del campo elettrico interno, e si applicano in modo indifferenziato ai tessuti del sistema nervoso centrale della testa e del tronco.

La Direttiva Europea 2013/35/UE [7] adotta, come si è visto (Tabella 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 in ambito 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 un corrispettivo diretto nelle linee guida ICNIRP.

3.2.3 – Metrica di valutazione

Un aspetto assai rilevante da tenere presente, è che i limiti relativi alla prevenzione degli effetti di stimolazione (tanto le restrizioni di base, quanto i livelli di riferimento) si riferiscono sempre ai valori istantanei delle grandezze coinvolte; un superamento è – almeno in linea di principio – inaccettabile a prescindere da quanto breve o occasionale esso risulti. Poiché questo assunto, se interpretato rigorosamente, può portare a situazioni paradossali, alcune norme tecniche applicative introducono elementi di buon senso, suggerendo per esempio di ignorare i fenomeni transitori con durata inferiore ad un certo valore.

La gestione della variabilità spaziale è più complessa. Nella determinazione del campo elettrico interno, da confrontare con le restrizioni di base, si deve considerare il valore rappresentante il 99esimo percentile in ogni tessuto, ma è prevista anche la possibilità di effettuare medie su segmenti oppure su volumetti millimetrici. Per il confronto con i livelli di riferimento, i valori da considerare possono essere i massimi spaziali (scelta sicuramente cautelativa), oppure le medie lineari del campo elettrico o del campo magnetico esterni sul volume occupato dal soggetto esposto (ma in sua assenza); in questo secondo caso, in presenza di campi con forti gradienti spaziali ci si deve comunque accertare che siano rispettate le restrizioni di base nei distretti del corpo maggiormente esposti.

3.2.4 – Campi con forma d'onda complessa

Poiché i limiti di sicurezza specificati nelle linee guida sono variabili in funzione della frequenza, la loro applicazione è immediata solo con grandezze fisiche 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 una grandezza con due o 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 all'unità, siamo di fronte ad una violazione. L'indice può essere fornito direttamente dalla strumentazione, oppure può essere ricavato in laboratorio, elaborando i risultati delle misure di campo acquisite in modo appropriato.

I due principali indici utilizzati per campi con forma d'onda complessa in relazione agli effetti di stimolazione dei CEM, 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 [2] e ripreso successivamente anche da quelle del 2010 [4], va 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), $B_{\text{rms}}(f)$ è il valore efficace della componente spettrale del campo alla frequenza f e $B_L(f)$ è il rispettivo livello di riferimento ICNIRP. Questa impostazione 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 il principale punto debole di questo approccio.

Il metodo del picco ponderato, introdotto dall'ICNIRP in un documento del 2003 [10] e poi ripreso in modo più completo e formale nelle linee guida del 2010 [4], è un'alternativa pensata per superare questa difficoltà. 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:

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

Operativamente, una volta determinato lo spettro della forma d'onda, si rapportano anche in questo caso le ampiezze efficaci $B_{\text{rms}}(f)$ delle componenti spettrali con i livelli di riferimento $B_L(f)$ alle frequenze corrispondenti. Inoltre, si considerano anche le rispettive fasi $\theta(f)$, a ciascuna delle quali si deve aggiungere un ulteriore contributo $\phi(f)$ per il cui significato e valore 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.

3.3 – Protezione dagli effetti termici

3.3.1 – Aspetti generali e metrica di valutazione

Le prescrizioni normative proposte dall'ICNIRP per la protezione dagli effetti termici dei CEM sono ancora oggi quelle contenute nelle linee guida del 1998 [2], alle quali si rifanno sia la Raccomandazione Europea 1999/519/CE [6] per la protezione della popolazione generale, sia la Direttiva Europea 2013/35/UE [7] per la tutela dei lavoratori professionalmente esposti.

L'intervallo di frequenze in cui occorre preoccuparsi degli effetti termici parte convenzionalmente da 100 kHz (cfr. Tabella 1); oltre questa frequenza infatti, il meccanismo di interazione predominante ai fini della tutela della salute consiste nell'assorbimento di energia all'interno del corpo umano, con conseguente innalzamento della temperatura dei tessuti. Questo assorbimento 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 a 4 W/kg come media su 6 minuti e sull'intero organismo; applicando a questo valore degli opportuni margini di sicurezza, l'ICNIRP giunge a specificare le 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 (mediato su volumetti di 10 g di tessuto contiguo), in tutti i casi sempre come media su 6 minuti.

Sono stati poi individuati i livelli di riferimento in termini di campo elettrico e di campo magnetico esterni imperturbati che, se rispettati, garantiscono il rispetto di queste restrizioni di base. I livelli di riferimento vanno confrontati con le radici quadrate delle medie dei quadrati delle intensità dei campi, prese su un intervallo di 6 minuti e sul volume occupato dal corpo dell'individuo esposto (ma in sua assenza). In caso di distribuzioni fortemente disomogenee, deve comunque essere sempre accertato il rispetto delle restrizioni di base locali.

3.3.2 – 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 ai livelli di campo presenti nel sito considerato, oppure quando è coinvolta una sorgente con forma d'onda complessa.

Nel caso degli effetti termici, la valutazione del rispetto delle restrizioni di base in questa situazione non pone, di fatto, alcuna difficoltà concettuale, poiché i valori limite in termini di SAR non dipendono dalla frequenza: è quindi sufficiente valutare il SAR complessivo generato dall'esposizione e confrontarlo con il pertinente valore limite.

Per quanto riguarda i livelli di riferimento, le linee guida ICNIRP propongono un approccio basato sulla definizione di un apposito indice, mediante il quale tenere conto sia del contenuto spettrale del segnale considerato, sia della variazione con la frequenza dei valori limite 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 rapportando 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:

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

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

Appendice – Sintesi dei valori limite

Questa appendice raccoglie i valori limite delle due disposizioni comunitarie citate nel paragrafo 3 – la Raccomandazione 1999/519/CE [6] per la popolazione generale e la Direttiva 2013/35/UE [7] per i lavoratori – e delle linee guida ICNIRP su cui esse si basano. I limiti sono espressi come funzione della frequenza f , sempre in hertz; le unità di misura sono quelle adottate nelle tabelle delle norme (mA/m², µT, mT, V/m, W/m², W/kg, J/kg, mA).

Ogni valore vale nell'intervallo di frequenza indicato, estremi inclusi. Le condizioni con cui la grandezza va determinata prima del confronto – valore efficace, media su sei minuti per le grandezze legate agli effetti termici, percentile e criteri di mediazione spaziale – restano quelle stabilite nei documenti citati e non sono ripetute qui: questa sintesi riguarda il solo valore limite.

A.1 – Popolazione generale: Raccomandazione 1999/519/CE

I limiti della Raccomandazione coincidono, grandezza per grandezza, con quelli delle linee guida ICNIRP del 1998 [2] per la popolazione. La grandezza dosimetrica è la densità di corrente indotta, non il campo elettrico interno delle linee guida più recenti.

Tabella 3. Limiti di base della Raccomandazione 1999/519/CE per la popolazione generale.

Grandezza	Intervallo di frequenza	Limite di base
Densità di corrente indotta nella testa e nel tronco (mA/m ²)	0 – 1 Hz	8
	1 – 4 Hz	8 / f
	4 Hz – 1 kHz	2
	1 kHz – 10 MHz	$f / 500$
SAR medio sull'intero organismo (W/kg)	100 kHz – 10 GHz	0,08
SAR locale nella testa e nel tronco (W/kg)	100 kHz – 10 GHz	2
SAR locale negli arti (W/kg)	100 kHz – 10 GHz	4
Assorbimento specifico locale nella testa (J/kg)	300 MHz – 10 GHz	0,002
Densità di potenza (W/m ²)	10 – 300 GHz	10

Tabella 4. Livelli di riferimento della Raccomandazione 1999/519/CE per la popolazione generale. Fra 100 kHz e 10 MHz il campo elettrico e l'induzione magnetica sono soggetti a due limiti definiti in parallelo, uno per gli effetti di stimolazione e uno per quelli termici: vanno verificati entrambi.

Grandezza	Intervallo di frequenza	Livello di riferimento
Campo elettrico, effetti di stimolazione (V/m)	1 – 25 Hz	10 000
	25 Hz – 3 kHz	250 000 / f
	3 kHz – 10 MHz	87

Grandezza	Intervallo di frequenza	Livello di riferimento
Campo elettrico, effetti termici (V/m)	100 kHz – 10 MHz	$87\,000 / \sqrt{f}$
	10 – 400 MHz	28
	400 MHz – 2 GHz	$1,375 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$
	2 – 300 GHz	61
Induzione magnetica, effetti di stimolazione (μT)	0 – 1 Hz	$4,0 \cdot 10^4$ (40 mT)
	1 – 8 Hz	$4,0 \cdot 10^4 / f^2$
	8 – 800 Hz	$5\,000 / f$
	800 Hz – 10 MHz	6,25
Induzione magnetica, effetti termici (μT)	100 kHz – 10 MHz	$9,2 \cdot 10^5 / f$
	10 – 400 MHz	0,092
	400 MHz – 2 GHz	$4,6 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{f}$
	2 – 300 GHz	0,20
Densità di potenza, effetti termici (W/m ²)	10 – 400 MHz	2
	400 MHz – 2 GHz	$f / 2 \cdot 10^8$
	2 – 300 GHz	10
Corrente di contatto (mA)	0 – 2,5 kHz	0,5
	2,5 – 100 kHz	$0,2 \cdot 10^{-3} \cdot f$
	100 kHz – 110 MHz	20
Corrente indotta in ciascun arto (mA)	10 – 110 MHz	45
Campo magnetico statico (mT)	0 Hz	40

A.2 – Lavoratori: Direttiva 2013/35/UE

La Direttiva chiama valori limite di esposizione (VLE) le restrizioni di base e valori di azione (VA) i livelli di riferimento (cfr. Tabella 2). Per gli effetti di stimolazione riprende le linee guida ICNIRP del 2010 [4], per gli effetti termici quelle del 1998 [2].

Tabella 5. Valori limite di esposizione della Direttiva 2013/35/UE.

Grandezza	Intervallo di frequenza	Valore limite di esposizione
Campo elettrico interno nei tessuti del SNC della testa – effetti sensoriali (V/m)	1 – 10 Hz	0,5 / f
	10 – 25 Hz	0,05
	25 – 400 Hz	0,002 · f
Campo elettrico interno in tutti i tessuti della testa e del corpo – effetti sanitari (V/m)	1 Hz – 3 kHz	0,8
	3 kHz – 10 MHz	$2,667 \cdot 10^{-4} \cdot f$
SAR medio sull'intero organismo (W/kg)	100 kHz – 10 GHz	0,4
SAR locale nella testa e nel tronco (W/kg)	100 kHz – 10 GHz	10
SAR locale negli arti (W/kg)	100 kHz – 10 GHz	20
Assorbimento specifico locale nella testa (J/kg)	300 MHz – 10 GHz	0,01
Densità di potenza (W/m ²)	6 – 300 GHz	50
Campo magnetico statico, effetti sensoriali (T)	0 Hz	2 (8 per l'esposizione localizzata degli arti)
Campo magnetico statico, effetti sanitari (T)	0 Hz	8 (condizioni di lavoro controllate)

Tabella 6. Valori di azione della Direttiva 2013/35/UE per gli effetti di stimolazione. I VA inferiori corrispondono ai livelli di riferimento ICNIRP 2010 e sono collegati agli effetti sensoriali; i VA superiori, collegati agli effetti sanitari, e i VA per gli arti non hanno un corrispettivo diretto nelle linee guida ICNIRP.

Grandezza	Intervallo di frequenza	Valore di azione
Campo elettrico – VA inferiori (V/m)	1 – 25 Hz	20 000
	25 Hz – 3 kHz	$5,0 \cdot 10^5 / f$
	3 kHz – 10 MHz	170
Campo elettrico – VA superiori (V/m)	1 – 50 Hz	20 000
	50 – 1 640 Hz	$1,0 \cdot 10^6 / f$
	1 640 Hz – 10 MHz	610
Induzione magnetica – VA inferiori (μT)	1 – 8 Hz	$2,0 \cdot 10^5 / f^2$
	8 – 25 Hz	$2,5 \cdot 10^4 / f$
	25 – 300 Hz	1 000
	300 Hz – 3 kHz	$3,0 \cdot 10^5 / f$
	3 kHz – 10 MHz	100

Grandezza	Intervallo di frequenza	Valore di azione
Induzione magnetica – VA superiori (μT)	1 Hz – 3 kHz	$3,0 \cdot 10^5 / f$
	3 kHz – 10 MHz	100
Induzione magnetica – VA per l'esposizione localizzata degli arti (μT)	1 Hz – 3 kHz	$9,0 \cdot 10^5 / f$
	3 kHz – 10 MHz	300
Campo magnetico statico – VA (mT)	0 Hz	0,5 (interferenza con dispositivi impiantati attivi); 3 (attrazione e propulsione nel campo periferico di sorgenti oltre 100 mT)

Tabella 7. Valori di azione della Direttiva 2013/35/UE per gli effetti termici. La Direttiva fissa inoltre valori di azione per la corrente di contatto e per la corrente indotta in ciascun arto, riportati nei suoi allegati.

Grandezza	Intervallo di frequenza	Valore di azione
Campo elettrico (V/m)	100 kHz – 1 MHz	610
	1 – 10 MHz	$6,1 \cdot 10^8 / f$
	10 – 400 MHz	61
	400 MHz – 2 GHz	$3,09 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$
	2 – 300 GHz	140
Induzione magnetica (μT)	100 kHz – 10 MHz	$2,0 \cdot 10^6 / f$
	10 – 400 MHz	0,20
	400 MHz – 2 GHz	$1,0 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{f}$
	2 – 300 GHz	0,45
Densità di potenza (W/m^2)	6 – 300 GHz	50
Densità di potenza, valore di picco (W/m^2)	6 – 300 GHz	50 000

A.3 – Linee guida ICNIRP: esposizione professionale

Per completezza si riportano i limiti ICNIRP per l'esposizione professionale, ai quali la Direttiva si rifà. Quelli del 1998 [2] usano come grandezza dosimetrica la densità di corrente indotta; quelli del 2010 [4] il campo elettrico interno, già riportato nella Tabella 5.

Tabella 8. Limiti ICNIRP 1998 per l'esposizione professionale. I limiti in termini di SAR, assorbimento specifico e densità di potenza coincidono con i VLE della Direttiva (Tabella 5).

Grandezza	Intervallo di frequenza	Limite
Densità di corrente indotta, restrizione di base 1998 (mA/m^2)	0 – 1 Hz	40

Grandezza	Intervallo di frequenza	Limite
	1 – 4 Hz	40 / f
	4 Hz – 1 kHz	10
	1 kHz – 10 MHz	f / 100
Campo elettrico, livello di riferimento 1998 – stimolazione (V/m)	1 – 25 Hz	20 000
	25 – 820 Hz	500 000 / f
	820 Hz – 10 MHz	610
Campo elettrico, livello di riferimento 1998 – effetti termici (V/m)	100 kHz – 10 MHz	$6,1 \cdot 10^8 / f$
	10 – 400 MHz	61
	400 MHz – 2 GHz	$3,0 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$
Induzione magnetica, livello di riferimento 1998 – stimolazione (μT)	2 – 300 GHz	137
	0 – 1 Hz	$2,0 \cdot 10^5$ (200 mT)
	1 – 8 Hz	$2,0 \cdot 10^5 / f^2$
	8 – 820 Hz	$2,5 \cdot 10^4 / f$
Induzione magnetica, livello di riferimento 1998 – effetti termici (μT)	820 Hz – 10 MHz	30,7
	100 kHz – 10 MHz	$2,0 \cdot 10^6 / f$
	10 – 400 MHz	0,20
	400 MHz – 2 GHz	$1,0 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{f}$
Densità di potenza, effetti termici (W/m ²)	2 – 300 GHz	0,4472
	10 – 400 MHz	10
	400 MHz – 2 GHz	$f / 4 \cdot 10^7$
Corrente di contatto (mA)	2 – 300 GHz	50
	0 – 2,5 kHz	1
	2,5 – 100 kHz	$0,4 \cdot 10^{-3} \cdot f$
Corrente indotta in ciascun arto (mA)	100 kHz – 110 MHz	40
	10 – 110 MHz	100

Bibliografia

- [1] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. Health Physics, Vol. 66, N. 1, January 1994, pp. 100–106.
- [2] 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.

- [3] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics*, Vol. 96, N. 4, April 2009, pp. 504–514.
- [4] 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.
- [5] 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, March 2014, pp. 418–425.
- [6] 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 199/59-70, 30.7.1999.
- [7] 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 179/1-21, 29.6.2013.
- [8] CEI EN 50413 (2010). Norma di base sulle procedure di misura e di calcolo per l'esposizione umana ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (0 Hz - 300 GHz).
- [9] CEI EN 50499 (2009). Procedura per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici.
- [10] 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.