

PROTEZIONE DAI CAMPI ELETTROMAGNETICI DALLE BASSISSIME FREQUENZE ALLE MICROONDE ASPETTI GENERALI, CENNI STORICI, SORGENTI, NORMATIVE, PROBLEMATICHE DI MISURA

Daniele Andreuccetti, IFAC-CNR, Firenze

1. L'inquinamento elettromagnetico

Negli ultimi decenni si è assistito ad un grande sviluppo delle applicazioni dei campi elettromagnetici, non solo nelle telecomunicazioni (dove il fenomeno è eclatante), ma anche in altri settori, come nel controllo del traffico aereo, nei processi industriali ed in campo medico. Di conseguenza, ha avuto luogo una grande diffusione di nuove sorgenti che immettono campi elettromagnetici nell'ambiente e questo, a sua volta, ha suscitato interesse ed apprensione nei media e nell'opinione pubblica.

Per indicare la presenza indesiderata nell'ambiente di campi elettromagnetici di origine antropica, si è anche giunti a coniare neologismi come *inquinamento elettromagnetico* o *elettrosmog*. Si tratta di una terminologia per certi versi efficace, ma largamente impropria se confrontata col significato corrente del termine "inquinamento". A quest'ultimo sono infatti associati almeno tre elementi distintivi che risultano **del tutto assenti** nel caso dei campi elettromagnetici: la dispersione nell'ambiente di sostanze inquinanti *indipendenti dalla sorgente*, l'*imprevedibilità* delle modalità di diffusione degli inquinanti stessi (spesso influenzate anche da *fattori meteorologici*) ed infine l'esistenza di *meccanismi di accumulo* degli agenti indesiderati all'interno degli organismi biologici. Invece, il campo elettromagnetico intorno ad una sorgente sussiste soltanto finché la sorgente stessa è accesa, la distribuzione della sua intensità nello spazio è in molti casi prevedibile per via teorica con ragionevole accuratezza e, in ogni caso, non risente apprezzabilmente dei fenomeni meteorologici e non esiste, infine, alcun meccanismo noto di "accumulo di campi elettromagnetici" negli organismi biologici.

Ciò nonostante, la presenza di campi elettromagnetici nell'ambiente è un elemento indesiderato, per almeno tre ordini di motivi.

1. Innanzi tutto, l'esposizione di organismi biologici, anche per brevi periodi, a campi *molto* intensi può provocare conseguenze sanitarie negative. La popolazione ed i lavoratori professionalmente esposti sono tutelati da questa eventualità attraverso norme di sicurezza, che specificano i livelli massimi ammissibili nell'ambiente o nei luoghi di lavoro.
2. In secondo luogo, esiste la possibilità che campi elettromagnetici anche di modesta intensità possano disturbare il funzionamento di apparecchiature elettroniche, il cui disservizio può causare un danno, un rischio o un disagio. Anche in questo caso, specifiche normative mirano a scongiurare per quanto possibile il verificarsi di eventi del genere.
3. Infine, da alcune fonti viene sollevato il sospetto che esposizioni *assai prolungate* di individui a campi elettromagnetici, anche di livelli inferiori a quelli ammessi dalle normative, possano costituire un fattore di rischio per alcune gravi patologie. Il sospetto è un po' più radicato scientificamente nella regione delle frequenze industriali (50/60 Hz), dove un grande numero di studi epidemiologici (in parte controversi) sembra evidenziare l'esistenza di una debole associazione tra esposizione cronica al campo magnetico e insorgenza di leucemie infantili. I provvedimenti di tutela nei confronti di rischi ipotetici di questo tipo passano normalmente attraverso le cosiddette *politiche cautelative*.

2. Richiami dei concetti fisici fondamentali

Un **campo di forza** in Fisica è una regione di spazio, estesa intorno ad un oggetto dotato di una determinata proprietà fisica (detto *sorgente del campo*), nella quale si manifestano forze su altri oggetti dotati della stessa proprietà fisica della sorgente. Per esempio, un campo *gravitazionale* è una regione di spazio estesa attorno ad un corpo dotato di *massa*, nella quale si manifestano forze su altri corpi dotati di *massa* che vi vengano eventualmente introdotti.

Il **campo elettrico** è la grandezza fisica attraverso la quale descriviamo una regione di spazio le cui proprietà sono perturbate dalla presenza di una distribuzione di **carica elettrica**. Il modo più evidente con cui questa perturbazione si manifesta è attraverso la forza che viene sperimentata da una qualunque altra carica introdotta nel campo stesso. Il campo elettrico viene descritto mediante il vettore *campo elettrico* \underline{E} che in ogni punto della regione di spazio indica la direzione, l'intensità ed il verso della forza che agisce su una carica puntiforme unitaria positiva posta in quel punto; l'intensità del campo elettrico si misura in volt al metro (V/m). Grazie alla forza che esercita sulle cariche, il campo elettrico è in grado di provocare *correnti elettriche* nei materiali *conduttori* e quindi nei tessuti degli organismi biologici.

Analogamente, attraverso il concetto di **campo magnetico** descriviamo la perturbazione delle proprietà dello spazio determinata dalla presenza di una distribuzione di **corrente elettrica**, perturbazione che si manifesta con una forza che agisce su qualunque altra corrente elettrica introdotta nel campo. Il campo magnetico viene comunemente descritto o mediante il vettore *campo magnetico* \underline{H} , che si misura in ampere al metro (A/m), oppure attraverso il vettore \underline{B} detto *densità di flusso magnetico* o anche *induzione magnetica*, che si misura in tesla (T); entrambi i vettori sono definiti in maniera riconducibile alla forza che in ogni punto della regione di spazio si manifesta su una corrente elementare posta in quel punto. Una delle caratteristiche più importanti del campo magnetico **variabile nel tempo**, almeno dai punti di vista della misura e dell'interazione con organismi biologici, consiste nella sua capacità di provocare *correnti elettriche* all'interno dei materiali conduttori e quindi dei tessuti biologici.

Risulta poi che un campo elettrico può essere generato, oltre che da una distribuzione di carica elettrica, anche da un campo magnetico **variabile nel tempo**; analogamente, un campo magnetico può essere generato, oltre che da una distribuzione di corrente elettrica, anche da un campo elettrico **variabile nel tempo**. In altre parole, quando si è in regime variabile nel tempo, campo elettrico e campo magnetico *divengono uno la sorgente dell'altro*. Grazie a questa interdipendenza, il campo elettrico ed il campo magnetico possono in questo caso essere considerati come due aspetti di un'unica grandezza fisica (il **campo elettromagnetico**), in grado di propagarsi a distanza indefinita dalla sorgente. Questo fenomeno viene indicato col termine **radiazione elettromagnetica**.

Le **onde elettromagnetiche** costituiscono una delle modalità più comuni ed importanti di propagazione della radiazione elettromagnetica. Esse sono caratterizzate dalla **intensità** (legata all'ampiezza dell'onda), dalla **frequenza** (numero di cicli d'onda completi che si susseguono nell'unità di tempo) e dalla **lunghezza d'onda** (distanza nello spazio tra due successive creste d'onda, pari allo spazio percorso dall'onda in un tempo uguale all'*inverso* della frequenza).

L'**intensità** della radiazione indica l'effettiva ampiezza dei campi e quindi delle forze che essi possono esercitare. Essa è legata anche alla quantità di energia trasportata per unità di tempo e di superficie ortogonale alla direzione di propagazione. Qualunque fenomeno di interazione si studi, esso è normalmente tanto più evidente quanto più la radiazione è intensa.

La **frequenza** condiziona non solo tutti gli aspetti connessi con la generazione, l'immissione in ambiente e la propagazione del campo elettromagnetico, ma anche la tipologia di effetti biologici e sanitari che possono verificarsi. Essa determina poi la *struttura* del campo nell'intorno della sorgente. In funzione della distanza da questa (rapportata alla lunghezza d'onda), tale struttura si modifica notevolmente, passando dalla zona dei *campi reattivi* a quella dei *campi radiativi*.

Nelle immediate vicinanze di una sorgente (cioè presso una antenna, un apparato industriale a radiofrequenza, un elettrodomestico), e fino a circa un decimo di lunghezza d'onda di distanza da essa, il campo elettrico ed il campo magnetico sono del tutto **indipendenti uno dall'altro**, essendo determinati dalle rispettive "sorgenti fisiche" (cariche e correnti); essi perciò non possono essere ricavati uno dall'altro e *devono essere valutati separatamente*, utilizzando sensori specifici.

A distanze superiori, la struttura dei campi inizia a risentire del fenomeno della **radiazione**, che resta l'unico significativo per distanze dalla sorgente superiori a circa una lunghezza d'onda. Grazie ad esso, i campi si propagano a distanza indefinita dalla sorgente, assumendo una struttura detta di tipo

radiativo, nella quale il campo elettrico ed il campo magnetico sono perpendicolari tra di loro ed alla direzione di propagazione.

In definitiva, nella regione dei **campi radiativi** esiste una relazione precisa tra l'ampiezza E del campo elettrico, l'ampiezza H del campo magnetico e l'intensità della radiazione, espressa dalla densità di potenza S (che rappresenta l'energia trasportata per unità di tempo e di superficie, espressa in watt al metro quadrato, W/m^2). Questa relazione semplifica notevolmente le procedure di misura, poiché *permette di determinare tutte e tre le grandezze una volta che se ne sia valutata una*. Essa risulta espressa dalle seguenti equazioni.

$$\frac{E}{H} = \zeta_0 \qquad S = E \cdot H$$

dove ζ_0 è una costante che dipende dalle caratteristiche del mezzo dove l'onda si sta propagando, ha le dimensioni di una resistenza e prende il nome di **impedenza caratteristica** del mezzo; il suo valore nel vuoto, o in aria, è pari a circa 377Ω .

Nel caso di sorgenti di dimensioni D grandi rispetto alla lunghezza d'onda λ , è opportuno distinguere, nella regione dei campi radiativi, una zona di campi radiativi **vicini** ed una zona di campi radiativi **lontani**; la distanza che discrimina le due zone è dell'ordine di D^2/λ . La zona dei campi radiativi *vicini* è caratterizzata dalla presenza di intensi **fenomeni di interferenza**, che generano *hot spot* e “frange”, caratterizzate da dimensioni tipiche dell'ordine di un quarto della lunghezza d'onda. A causa di questi fenomeni, le misure di campo in questa zona richiedono cautele particolari.

3. Pericolosità dei campi elettromagnetici: cenni storici

È consuetudine far risalire la questione della possibile pericolosità dei campi elettromagnetici non ionizzanti agli anni del secondo dopoguerra, come conseguenza delle prime applicazioni di grande potenza in ambito militare, ai RADAR ed alle telecomunicazioni. Sul piano sanitario, i primi effetti dannosi imputabili all'esposizione ad intensi campi elettromagnetici erano di tipo indiscutibilmente *termico*, essendo provocati dal surriscaldamento di alcuni organi bersaglio particolarmente vulnerabili, come il *cristallino* (con conseguente rischio di cataratta) o le *gonadi maschili* (con rischio di sterilità temporanea). Le prime disposizioni di sicurezza furono pertanto adottate dalle autorità militari.

La diffusione delle applicazioni civili dei campi elettromagnetici fece ben presto sorgere l'esigenza di prevedere adeguate protezioni anche per la popolazione. La scuola di pensiero che si affermò nei Paesi occidentali, vedeva negli *effetti termici* l'unico meccanismo di azione dei campi a radiofrequenza e microonde e portava quindi a normative miranti a difendere gli esposti da eccessivo riscaldamento. Si stabilì di limitare l'esposizione umana a livelli di densità di potenza non superiori ai $100 W/m^2$, un valore in grado di prevenire con un buon margine di sicurezza il manifestarsi di effetti come la cataratta o la sterilità, le cui soglie (situate oltre $1000 W/m^2$) furono individuate mediante sperimentazione su animali.

Nei Paesi dell'est europeo, fu dato credito per qualche tempo all'esistenza di una multiforme casistica di *effetti non termici* o “di basso livello” delle radiofrequenze e delle microonde. Questi consistevano principalmente in disturbi soggettivi, che venivano ricondotti ad alterazioni del sistema nervoso ritenute conseguenti ad una esposizione prolungata a campi di intensità anche molto minore di quella necessaria a provocare effetti termici. Una tale impostazione conduceva a proporre soglie di sicurezza fino a 1000 volte più basse di quelle termiche, in termini di densità di potenza. Non essendo però stato possibile accertare e descrivere *quantitativamente* gli effetti di basso livello, questa impostazione è stata di fatto accantonata dalla comunità scientifica internazionale.

Accenniamo infine ad un'altra problematica che fa discutere da anni la comunità scientifica e che ha riscosso molto interesse anche da parte dei *media* e, quindi, dell'opinione pubblica. Si tratta della possibilità che le esposizioni croniche ai campi elettromagnetici, anche di basso livello, possano

favorire l'insorgere di alcune patologie tumorali. La più dibattuta, perché sostenuta da un grande numero di indagini epidemiologiche, è l'associazione tra esposizione al campo magnetico a frequenza industriale (generato per esempio da elettrodotti ed elettrodomestici) e l'incidenza di alcune forme di leucemia infantile. Sebbene l'ipotesi di cancerogenicità dei campi elettromagnetici sia stata sottoposta ad una indagine scientifica serrata, non sono stati finora evidenziati elementi di consistenza tale da suggerire una revisione dei limiti di sicurezza.

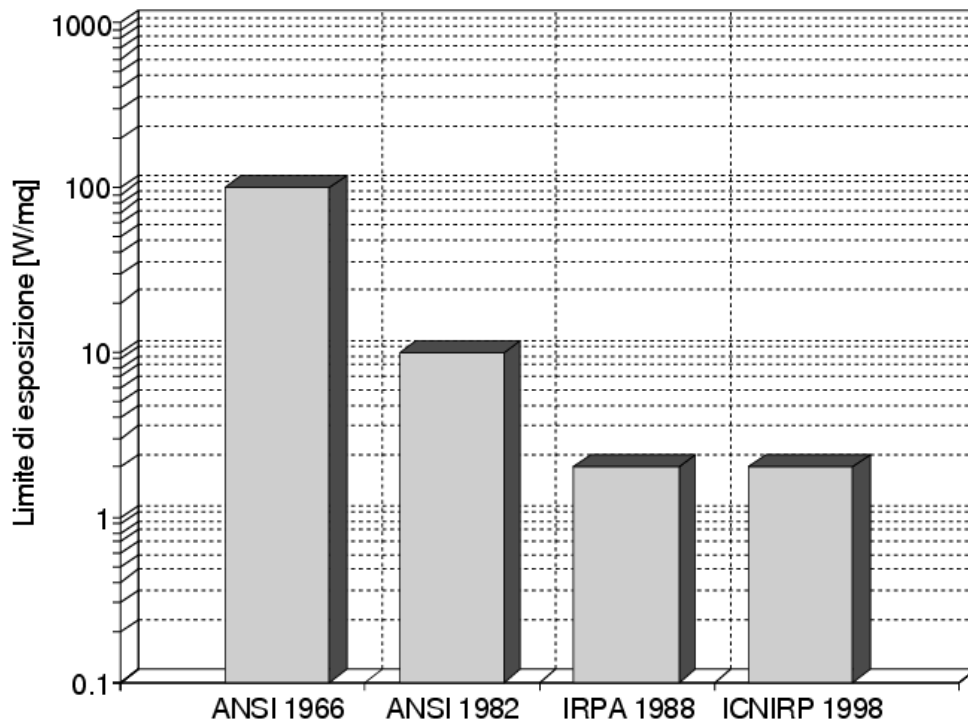


Figura 1 – Normative internazionali: evoluzione storica del limite di esposizione per la popolazione civile, espresso come densità di potenza e relativo agli effetti termici alla frequenza di 100 MHz.

In definitiva, le norme di sicurezza emanate negli ultimi decenni dalle più autorevoli istituzioni internazionali si riferiscono unicamente agli effetti *acuti* scientificamente accertati. La conoscenza su tali effetti si è alquanto approfondita e, di conseguenza, l'impostazione delle normative ha subito una notevole evoluzione. In una prima fase, grazie alla sperimentazione su volontari ed animali, è stata dimostrata l'esistenza di effetti comportamentali conseguenti ad un riscaldamento moderato, ma prolungato nel tempo ed in grado di interessare l'intero organismo. Questa scoperta ha portato ad una revisione verso il basso dei limiti, come viene mostrato in **Figura 1**, dove si confrontano i limiti di esposizione per la popolazione civile, relativi alla frequenza di 100 MHz, raccomandati dagli standard ANSI del 1966 e del 1982 [1], dalle linee guida IRPA del 1988 [2]) e ICNIRP del 1998 [3].

Nel frattempo, sono stati indagati anche gli effetti **acuti non termici** causati dalle esposizioni ad intensi campi elettrici e magnetici di frequenza inferiore a un centinaio di chilohertz circa. I risultati di questa ricerca hanno permesso di estendere verso il basso l'intervallo di frequenze coperto dalle normative.

4. Classificazione degli effetti biologici e sanitari

È da tempo in uso una classificazione sommaria degli effetti biologici e sanitari dei campi elettromagnetici, basata sulla distinzione tra *effetti acuti di alto livello*, *effetti cronici* ed *effetti di basso livello*.

Gli **effetti acuti**, *immediati* ed *oggettivi*, sono caratterizzati da un *valore di soglia*, cioè da un livello di intensità di campo superato il quale si manifestano. Essi vengono studiati e le loro soglie

determinate soprattutto mediante sperimentazione su volontari e su animali da laboratorio. Questi studi hanno portato ad acquisire anche una buona conoscenza dei sottostanti meccanismi d'azione. In particolare, gli effetti acuti sono imputabili:

- a *bassa frequenza* (fino a frequenze dell'ordine del centinaio di chilohertz), alla *densità di corrente* indotta dai campi esterni nei tessuti dell'organismo esposto, che provoca fenomeni di interferenza con la percezione sensoriale ed altri meccanismi elettrofisiologici;
- ad *alta frequenza*, alla *densità di potenza* assorbita dai tessuti (detta SAR, dall'inglese Specific Absorption Rate, misurata in W/kg), che causa i fenomeni di riscaldamento.

Gli **effetti sanitari di basso livello**, invece, non sono né immediati né oggettivi. Ciò rende assai difficile accertare il rapporto di causa-effetto nei confronti dell'esposizione ai campi, determinare il valore di eventuali soglie, stabilire se sia necessaria o meno un'esposizione prolungata per innescarne la comparsa. Sono caratterizzati da sintomi molto generici ed altamente soggettivi, quali affaticamento, irritabilità, difficoltà di concentrazione, diminuzione della libido, cefalee, insonnia, impotenza. Gli effetti di questo tipo sono studiati, nell'uomo, attraverso la sorveglianza sanitaria di coloro che ne sono afflitti.

Gli **effetti cronici** sono effetti sanitari, che alcuni ritengono essere associati ad esposizioni di basso livello estremamente prolungate nel tempo. Le patologie interessate sono varie, ma tutte piuttosto gravi: malattie degenerative come il morbo di Parkinson o di Alzheimer, tumori, leucemie. Gli effetti cronici vengono indagati con *metodi epidemiologici*, applicando la statistica all'analisi dei dati di incidenza delle patologie di interesse in campioni di popolazione selezionati secondo criteri opportuni. A questi studi si affiancano le ricerche di laboratorio *in vitro* (ovvero su cellule, colture cellulari, tessuti escissi) ed *in vivo* (cioè su animali da laboratorio), che mirano ad individuare i meccanismi biologici e biofisici alla base degli effetti stessi. Fino ad oggi questi studi, per quanto assai numerosi e diversificati, non hanno confermato scientificamente l'esistenza nell'uomo di effetti di basso livello o cronici, con la sola parziale eccezione della già citata associazione tra esposizione al campo magnetico a 50/60 Hz ed aumento del rischio di leucemia infantile.

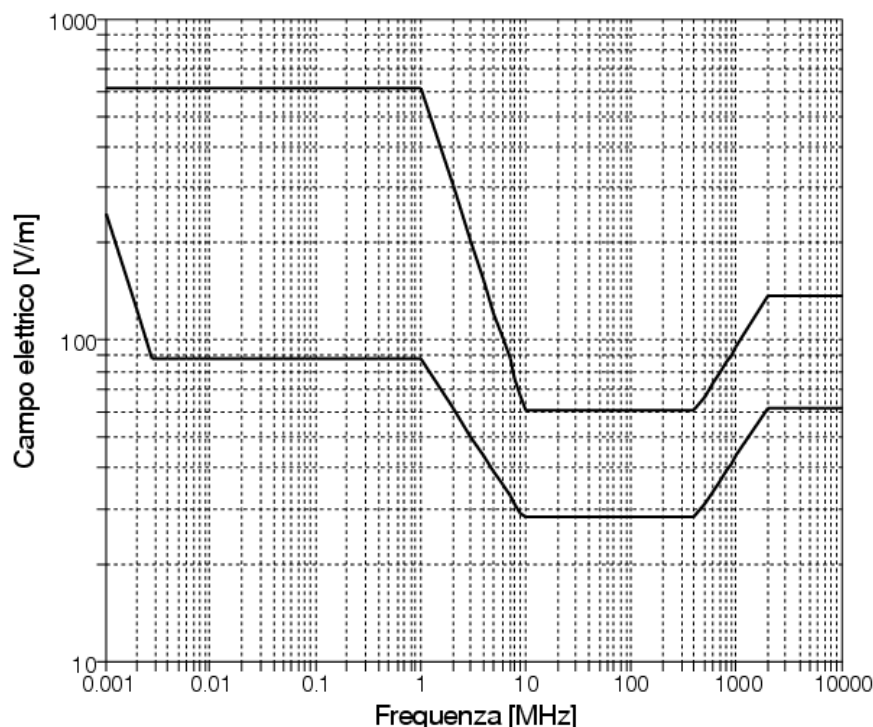


Figura 2 – Linee guida ICNIRP-1998: limite di riferimento per il campo elettrico nell'intervallo di frequenze da 1 kHz a 10 GHz per i lavoratori professionalmente esposti (linea superiore) e per la popolazione in genere (linea inferiore).

5. Come nasce una norma di sicurezza

Una norma di sicurezza è un complesso di prescrizioni, raccomandazioni e suggerimenti il cui scopo è impedire che un individuo subisca un danno a causa dell'esposizione ad un agente esterno, o almeno ridurne a valori socialmente accettabili la probabilità.

Le linee guida ICNIRP [3], attualmente il più autorevole riferimento internazionale per ciò che concerne l'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici non ionizzanti, partono dall'analisi della letteratura scientifica sugli effetti biologici, da cui risulta che solo nel caso degli effetti *acuti* vi sono informazioni sufficienti a sostenere il processo di definizione di limiti di esposizione.

I limiti raccomandati dall'ICNIRP sono, come vedremo, notevolmente articolati: vi sono limiti *di base* e limiti *di riferimento*, questi ultimi prevedono limiti per il *campo elettrico*, per il *campo magnetico* e per la *densità di potenza*, tutti variabili con la frequenza in modo complesso; inoltre, abbiamo valori limite diversi per i *lavoratori professionalmente esposti* e per la *popolazione in genere*. Cercheremo nei paragrafi che seguono di far luce sui fondamenti di questa situazione, ma non è possibile riportare tutti i dati al completo. Se ne presenta pertanto in **Figura 2** solo un estratto, relativo al campo elettrico nell'intervallo di frequenze da 1 kHz a 10 GHz, sia per i lavoratori professionalmente esposti sia per la popolazione.

5.1 *Soglie degli effetti, grandezze primarie e limiti di base*

Il primo passo per la costruzione di una norma di sicurezza consiste nella raccolta dei dati sugli effetti provocati dai campi elettromagnetici. A questo scopo, l'ICNIRP ha effettuato un'ampia revisione della letteratura scientifica pertinente. Il quadro che ne risulta può essere sintetizzato nei punti seguenti.

- Solo gli effetti acuti dei campi elettromagnetici possono essere considerati “accertati” secondo il metodo scientifico.
- Alle frequenze più basse (fino a qualche centinaio di chilohertz), questi effetti consistono in interferenze delle correnti indotte dai campi con i segnali elettrofisiologici dell'organismo, che si manifestano con percezioni sensoriali fittizie (di tipo visivo, dette *fosfeni*, e di tipo tattile, come formicolii o scosse) e, a livelli più elevati, con contrazioni muscolari involontarie. Nessun effetto si manifesta per correnti indotte inferiori a 10 mA/m^2 .
- Alle frequenze più alte, gli effetti accertati sono di tipo termico e possono essere ricondotti alla potenza assorbita per unità di massa (denominata, come si è già detto, SAR dall'inglese *Specific Absorption Rate*). Nessun effetto termico si manifesta per potenze assorbite inferiori a 4 W/kg , come media sull'intero organismo e per esposizione a corpo intero.

Poiché gli effetti biologici (acuti) dei campi elettromagnetici non sono provocati direttamente del campo elettrico o dal campo magnetico esterni, quanto piuttosto dalle grandezze fisiche (densità di corrente e SAR) indotte nei tessuti interni dell'organismo, queste ultime grandezze prendono il nome di **grandezze primarie**. Per giungere ai limiti di esposizione, viene applicato un opportuno margine di sicurezza alle soglie degli effetti *espresse in termini di grandezze primarie*. I limiti di esposizione così definiti sono chiamati **limiti primari o di base**.

5.2 *Limiti di riferimento*

A chi si occupa di sorveglianza fisica, l'utilizzo dei limiti di base appare problematico, poiché le grandezze primarie, essendo interne all'organismo esposto, non sono accessibili alla misura. Per questo motivo, le norme di sicurezza indicano anche i limiti di riferimento, espressi in termini del campo elettrico, del campo magnetico e della densità di potenza del campo esterno imperturbato. Per individuare i limiti di riferimento, si prendono in considerazione alcune situazioni di esposizione standardizzate e si valuta, attraverso l'applicazione dei cosiddetti *modelli dosimetrici*, quale intensità del campo esterno sia necessaria per dare origine, nei tessuti, ad un valore della densità corrente indotta o del SAR pari al limite di base.

5.3 Popolazione e lavoratori professionalmente esposti

Le linee guida ICNIRP incorporano il principio normativo per cui la popolazione debba essere maggiormente tutelata dei lavoratori professionalmente esposti. Per questo motivo, i limiti di esposizione dedotti sulla base delle considerazioni esposte sopra vengono considerati applicabili solo a questi ultimi, mentre per la popolazione viene introdotto un ulteriore margine di sicurezza, motivato con le considerazioni seguenti.

- Nella popolazione possono essere *presenti* categorie di individui considerate meritevoli di particolare tutela, come anziani, bambini, ammalati.
- Il periodo di esposizione *giornaliera* è al massimo di 8 ore circa per i lavoratori, mentre può arrivare fino a 24 ore per la popolazione.
- I lavoratori sono di regola sottoposti a sorveglianza sanitaria, con controlli specifici anche per le possibili conseguenze dell'esposizione a campi elettromagnetici.
- A differenza della *popolazione*, i lavoratori sono normalmente al corrente dell'esposizione subita e seguono procedure o hanno in dotazione dispositivi volti a prevenire i rischi o a limitarne le conseguenze.

5.4 Politiche cautelative

I limiti di esposizione costruiti a partire dalle soglie degli effetti acuti non offrono tutela nei confronti dei presunti effetti cronici o di basso livello e, in particolare, dell'eventuale cancerogenicità dei campi elettromagnetici. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) osserva che, sebbene i risultati degli studi epidemiologici non siano sufficientemente consolidati da poter costituire il fondamento per rivedere i limiti di esposizione, tuttavia suonano come un campanello di allarme che non deve essere ignorato. L'indicazione di valori limite non è l'unica strada per tutelarsi contro gli eventuali rischi di questo tipo: al contrario, una forma di tutela forse più adatta a gestire le situazioni di incertezza può essere ottenuta attraverso l'applicazione delle cosiddette **politiche cautelative**.

L'OMS, per altro, dichiara esplicitamente [4] che le politiche cautelative devono essere "adottate solo a condizione che le valutazioni del rischio ed i limiti di esposizione fondati su basi scientifiche non siano minati dall'adozione di approcci cautelativi arbitrari" come avverrebbe, per esempio, "se i valori limite venissero abbassati fino a livelli tali da non avere alcuna relazione con i rischi accertati, o se fossero modificati in modo improprio ed arbitrario per tener conto delle incertezze scientifiche". Nel caso dei campi elettromagnetici, l'OMS considera per esempio giustificata l'adozione di misure cautelative sensate, come la cosiddetta *prudent avoidance*, secondo la quale caso per caso – in particolare in occasione dell'attivazione di nuove sorgenti – è opportuno adottare tutti quei provvedimenti che permettano di ridurre le esposizioni, laddove ciò comporti costi ragionevoli.

6. Sorgenti di campi elettromagnetici negli ambienti di vita e di lavoro

Le tecnologie che portano a disperdere campi elettromagnetici nell'ambiente investono oggi numerosissimi settori della società, per cui l'elenco che segue sarà necessariamente sommario.

In ambito industriale, numerosi processi produttivi si avvalgono del riscaldamento, rapido ed efficiente, indotto mediante campi elettromagnetici. Vi sono tre tecnologie fondamentali: il riscaldamento ad **induzione magnetica a bassa frequenza** (impiegato per la tempra ed altre lavorazioni sui metalli), il riscaldamento a **perdite dielettriche ad onde corte** (che trova applicazioni nella saldatura di materiali plastici e nell'incollaggio del legno) ed infine il riscaldamento a **microonde** (utilizzato per esempio per la disinfezione di prodotti alimentari o di manufatti artistici, per la cottura di alimenti ed per l'essiccazione di materiale ceramico). Esistono anche applicazioni industriali non basate sul riscaldamento, tra cui ricordiamo:

- i varchi magnetici utilizzati nei rivelatori di presenza o di transito, nel controllo degli accessi e in alcuni sistemi antitaccheggio;
- i dispositivi di identificazione a radiofrequenza (RFID);

- l'impiego di tecniche radar in alcuni tipi di prospezioni;
- i sistemi di radiolocalizzazione;
- le indagini non distruttive su alcuni materiali.

| Banda di frequenza | | Sorgente | Tipo di emissione | Campi emessi |
|----------------------|------------------|--|---------------------------|--|
| Basse frequenze | fino a 3 kHz | Produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica (centrali, stazioni, cabine, elettrodotti aerei ed interrati) | Accidentale | Elettrico e magnetico |
| | | Utilizzo dell'energia elettrica (impianti elettrici ed apparecchi utilizzatori) | | Magnetico |
| | | Varchi magnetici (sistemi antifurto e per la rilevazione dei transiti) | Intenzionale localizzata | |
| Frequenze intermedie | da 3 kHz a 3 MHz | Sistemi domestici per la cottura ad induzione magnetica (frequenze tipiche 25 ÷ 50 kHz, potenze di qualche chilowatt) | Intenzionale localizzata | Magnetico |
| | | Varchi magnetici (sistemi antifurto e per la rilevazione dei transiti), RFID (125 kHz) | | |
| | | Emittenti radiofoniche a onde medie (AM: modul. di ampiezza) | Intenzionale a diffusione | Elettrico e magnetico |
| Alte frequenze | oltre 3 MHz | Varchi magnetici (sistemi antifurto e per la rilevazione dei transiti – fino a 10 MHz) | Intenzionale localizzata | Magnetico (ed elettrico) |
| | | RFID (13.56 MHz, 850-900 MHz, 2.45 GHz) | Intenzionale localizzata | Elettrico e magnetico e/o elettromagnetico |
| | | Emittenti radiofoniche a modul. di frequenza (FM: 88 - 108 MHz) | Intenzionale a diffusione | Elettromagnetico |
| | | Emittenti televisive VHF e UHF (fino a circa 900 MHz) | | |
| | | Stazioni radio base per la telefonia cellulare (900 MHz e 1800 MHz circa) | | |
| | | Ponti radio | Intenzionale focalizzata | |
| | | Radio-aiuti alla navigazione aerea (radar, radiofari) | | |

Tabella 1 - Sorgenti di campi elettromagnetici di interesse per la popolazione

In ambito sanitario, la marconiterapia e la radarterapia sono note applicazioni terapeutiche basate sul riscaldamento indotto dai campi elettromagnetici, rispettivamente alla frequenza delle onde corte ed alle microonde. Tra le applicazioni non termiche, ricordiamo le tecniche diagnostiche basate sulla *Risonanza Magnetica*.

Negli ambienti domestici e di ufficio, sono assai diffuse le sorgenti di campi elettrici e magnetici a frequenza industriale (impianto elettrico, elettrodomestici, macchine da ufficio, videotermini) e non mancano alcune tipologie di sorgenti a radiofrequenza (telefoni cordless, sistemi antifurto).

Nell'ambiente esterno, infine, troviamo numerosissime classi di sorgenti: elettrodotti e stazioni elettriche, stazioni radio base per la telefonia cellulare, impianti per la diffusione radiofonica e televisiva, apparati per supporto e controllo del traffico aereo, ponti radio e reti di telecomunicazione specializzate.

La **Tabella 1** elenca le principali classi di sorgenti a cui può trovarsi esposta la popolazione, distinguendo tre grandi bande di frequenza secondo una terminologia (frequenze “basse”, “intermedie” e “alte”) ormai entrata nel linguaggio comune. Per ciascuna sorgente si riportano le informazioni seguenti.

Tipo di emissione. Si distinguono le sorgenti la cui emissione elettromagnetica è **accidentale**, cioè non direttamente collegata all'espletamento del servizio svolto dalla sorgente, da quelle **intenzionali**, per le quali l'emissione è funzionale allo svolgimento del servizio. Per queste ultime, si distingue ancora tra emissione **localizzata**, quando i campi raggiungono intensità di interesse sanitario solo in stretta prossimità della sorgente; **a diffusione**, quando la sorgente irradia in tutte le direzioni campi che possono restare di intensità significativa anche ad una distanza relativamente elevata ed infine **focalizzata**, quando l'emissione della sorgente è concentrata in un fascio molto stretto attorno alla direzione di massima radiazione.

Campi emessi. Viene precisato quale tipo di campo (**elettrico, magnetico, elettrico e magnetico, elettromagnetico**) è presente, prevalentemente, nella zona di maggior interesse protezionistico.

In **Tabella 2** vengono esaminate, con maggior dettaglio, le applicazioni connesse con i principali servizi di telecomunicazione, che costituiscono senza dubbio le più diffuse e discusse sorgenti ambientali di campi elettromagnetici ad alta frequenza. La tabella ne prende in considerazione le principali tipologie, per ciascuna delle quali si riportano i valori tipici di frequenza (per le stazioni radio base si riporta la frequenza di *downlink*, ovvero del collegamento dalla stazione verso il telefonino cellulare), di potenza in antenna, di guadagno e di EIRP (*Equivalent Isotropic Radiated Power*, data dal prodotto tra potenza in antenna e relativo guadagno).

| Tipo | Frequenza | Potenza | Guadagno | EIRP |
|--------------------------------|--|---------------|-------------|---------------|
| Emittenti radio AM | 500 ÷ 1600 kHz | fino a 500 kW | poche unità | fino a 500 kW |
| Emittenti radio FM | 88 ÷ 108 MHz | fino a 12 kW | 5 ÷ 50 | fino a 500 kW |
| Emittenti TV | VHF I-II: 52.5 ÷ 88 MHz VHF III: 174 ÷ 223 MHz UHF IV: 470 ÷ 590 MHz UHF V: 614 ÷ 838 MHz | fino a 1 kW | 1 ÷ 100 | fino a 100 kW |
| Stazioni Radio Base (downlink) | GSM: 925 ÷ 960 MHz DCS: 1805 ÷ 1880 MHz UMTS: 2110 ÷ 2170 MHz | fino a 300 W | 3 ÷ 30 | fino a 2 kW |

Tabella 2 - Sorgenti di campi elettromagnetici impiegate nelle telecomunicazioni pubbliche

7. Principi di sorveglianza fisica dei campi elettromagnetici

Nella maggior parte dei Paesi industrializzati, la preoccupazione nei confronti delle esposizioni ai campi elettromagnetici ha portato all'attivazione di istituzioni espressamente incaricate di tenere sotto controllo questo agente fisico. Si indica con *sorveglianza fisica* l'insieme delle tecniche che permettono agli operatori specializzati di valutare i livelli di campo presenti in un determinato ambiente o intorno ad una data sorgente, avvalendosi di misure o di metodologie di previsione teorica. Sebbene le misure costituiscano senza dubbio l'approccio più oneroso, tuttavia vi sono situazioni oggettive dove esse risultano insostituibili, poiché l'applicazione di metodi teorici non permette di caratterizzare l'esposizione con sufficiente accuratezza.

Le misure di campo elettromagnetico possono essere eseguite a **banda larga** oppure a **banda stretta**. La differenza è particolarmente significativa quando nel sito di misura giungono i contributi di più sorgenti indipendenti. Nel primo caso (*banda larga*), viene rilevata solo l'intensità complessiva risultante dalla sovrapposizione dei contributi di tutte le sorgenti. Nel secondo caso (*banda stretta*), ciascun contributo verrà valutato individualmente. Sebbene la misura a banda larga sia preferibile perché è più semplice, più rapida, richiede strumentazione meno complessa e meno costosa e fornisce un dato immediatamente confrontabile con le normative, tuttavia vi sono situazioni in cui è necessario ricorrere alle misure a banda stretta. Ciò avviene se si è in presenza di sorgenti che ricadono in bande normative differenti, oppure quando si vuole avere un quadro completo della situazione, anche allo scopo di attribuire a ciascuna sorgente l'esatto contributo al campo complessivo, come per esempio è necessario fare per applicare le procedure di riduzione a conformità.

La strumentazione da impiegare dipende anche dalla frequenza del campo e dalla regione dove avviene l'esposizione.

Nella regione dei **campi reattivi**, è necessario misurare in modo indipendente il campo elettrico ed il campo magnetico, utilizzando sensori specifici, che devono avere dimensioni molto piccole rispetto alla lunghezza d'onda. Questi, in genere, sono previsti per funzionare in abbinamento con dispositivi di misura a *rivelazione diretta*, dando così origine ad apparati in grado di eseguire unicamente rilevazioni a *banda larga*; esistono però anche sensori di solo campo elettrico o di solo campo magnetico adatti ad essere collegati a strumentazione ad *accoppiamento a radiofrequenza* (per esempio ad un analizzatore di spettro), realizzando così apparati di misura a *banda stretta*.

Nella regione dei **campi radiativi vicini**, vi possono essere esigenze di risoluzione spaziale (determinate dalla presenza dei fenomeni di interferenza) che impongono l'uso di sensori di piccole dimensioni, ricadendo nuovamente nella situazione precedente.

Nella regione dei **campi radiativi lontani**, infine, vi è completa libertà nell'uso di sensori di piccole dimensioni oppure di antenne estese, collegate a strumentazione a *rivelazione diretta* (per misure a banda larga, se l'antenna lo consente) oppure a strumentazione ad *accoppiamento a radiofrequenza* (per misure a banda stretta).

8. Riferimenti bibliografici

1. American National Standards Institute (ANSI): "Safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 300 kHz to 100 GHz", ANSI C95.1, 1982.
2. International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (IRPA-INIRC): "Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz", Health Physics, Vol.54, N.1 (January 1988), pp.115-123.
3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (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.
4. WHO Backgrounder: "Campi elettromagnetici e salute pubblica - politiche cautelative", Promemoria Marzo 2000, documento Internet all'indirizzo:
http://www.who.int/docstore/peh-emf/publications/facts_press/ifact/cautionary-FS-italian.htm