

Cosa sono le radiazioni non ionizzanti, come si misurano, quali sono le fonti di rischio

Daniele Andreuccetti

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto di Fisica Applicata

"Nello Carrara" - Firenze

(Testo preparato inizialmente come sussidio per il corso di formazione per operatori delle Aziende USL della Regione Toscana tenutosi a Empoli (FI) dal 29 novembre al 1 dicembre 2001 su "Tutela della popolazione dalle radiazioni non ionizzanti")

1. Campi elettromagnetici: i concetti fondamentali

Il campo elettromagnetico è una forma di energia che può permeare lo spazio (anche vuoto) e può propagarsi in esso. Lo sviluppo tecnologico ha permesso di realizzare dispositivi in grado di generare campi elettromagnetici e di impiegarli in una grandissima varietà di applicazioni.

Le **onde elettromagnetiche** costituiscono una delle modalità più comuni ed importanti di propagazione del campo elettromagnetico. 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).

La **frequenza** condiziona la *struttura* del campo elettromagnetico nell'intorno della sorgente. In funzione della distanza da questa (rapportata alla lunghezza d'onda), tale struttura si modifica notevolmente passando, come vedremo, dalla zona dei *campi reattivi* a quella dei *campi radiativi*.

L'**intensità** della radiazione indica l'effettiva ampiezza del campo e quindi delle forze che esso può 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 - se si verifica - è normalmente tanto più evidente quanto più la radiazione è intensa.

2. Dualismo onda/corpuscolo - Radiazioni ionizzanti e non

A seconda dei fenomeni studiati, la radiazione elettromagnetica può essere convenientemente descritta in termini **ondulatori** oppure **corpuscolari**. Nella descrizione corpuscolare, la frequenza costituisce una misura dell'energia trasportata da ogni singolo corpuscolo (detto **fotone**), in base alla nota relazione secondo la quale l'energia di ogni fotone è pari al prodotto della frequenza per la *costante di Planck* (il cui valore è $6,63 \cdot 10^{-34}$ joule/Hz) mentre ovviamente l'intensità è legata anche al numero di fotoni che transitano per unità di tempo attraverso l'unità di superficie ortogonale alla direzione di propagazione.

Si definiscono radiazioni (elettromagnetiche) ionizzanti quelle radiazioni in grado di ionizzare direttamente la materia **qualunque sia la loro intensità**. La ionizzazione è un tipico fenomeno corpuscolare, poiché consiste nell'assorbimento di un fotone da parte di un

elettrone esterno di un atomo: l'elettrone acquisisce l'energia del fotone e, se questa è sufficiente (cioè se la frequenza della radiazione è abbastanza alta), abbandona l'atomo a cui appartiene, vincendone la forza elettrostatica che lo lega al nucleo. La ionizzazione, quando avviene (cioè se la frequenza è sufficiente), avviene **per qualunque intensità**: quello che cambia con l'intensità della radiazione è solo *il numero di atomi che subiranno il processo*, rapportato all'unità di tempo e di superficie esposta.

La distinzione tra radiazioni ionizzanti e non riveste una grande importanza anche per quel che riguarda gli effetti biologici, poiché il meccanismo di ionizzazione può provocare nei tessuti alterazioni genetiche e tumori. **Le radiazioni ionizzanti sono pertanto cancerogeni certi a qualunque livello di intensità, mentre niente del genere può affermarsi per le radiazioni non ionizzanti.**

Nella **Tabella 1** si riportano le energie di ionizzazione (e le corrispondenti frequenze) di alcuni elementi, tra cui i componenti tipici del materiale organico. Ci si potrà facilmente rendere conto che tutte le frequenze cadono nella regione dei raggi ultravioletti e sono **superiori di molti ordini di grandezza** ai valori di cui ci occupiamo in questa lezione.

	Energia di ionizzazione	Frequenza equivalente
Cesio	3,9 eV	943×10^6 MHz
Carbonio	11,3 eV	2725×10^6 MHz
Idrogeno	13,6 eV	3294×10^6 MHz
Ossigeno	13,6 eV	3294×10^6 MHz
Azoto	14,5 eV	3486×10^6 MHz
Elio	24,6 eV	5996×10^6 MHz

Tabella 1: energie di ionizzazione di alcuni elementi e frequenze corrispondenti

3. Campi elettrici, campi magnetici, campi elettromagnetici, onde elettromagnetiche

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 $\underline{E}$ (detto *vettore campo elettrico*, o semplicemente *campo elettrico*) 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 che venga 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 un po' complessa, ma in ogni caso riconducibile alla forza che in ogni punto della regione di spazio si manifesta su una corrente elementare che venga posta in quel punto. Una delle caratteristiche più importanti del campo magnetico **variabile nel tempo**, almeno dal punto di vista sia della misura sia dell'interazione

con organismi biologici, consiste nella sua capacità di provocare *correnti elettriche* all'interno dei materiali conduttori e quindi dei tessuti biologici.

Carica elettrica e corrente elettrica sono dunque le **sorgenti materiali** rispettivamente del campo elettrico e del campo magnetico. Questa situazione è riassunta nella **Tabella 2**.

	Campo elettrico	Campo magnetico
Generato da	qualunque oggetto dotato di carica elettrica	qualunque conduttore percorso da corrente elettrica
È una regione di spazio nella quale si manifestano forze che agiscono su	altri oggetti dotati di carica elettrica	altri conduttori percorsi da corrente elettrica

Tabella 2: le definizioni di campo elettrico e di campo magnetico

Se tutto finisse qui, non esisterebbero né campo elettromagnetico né onde elettromagnetiche. Invece, risulta 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 (cioè la "causa") dell'altro*.

Grazie a questa interdipendenza, il campo elettrico ed il campo magnetico possono in quel caso essere considerati come due aspetti di un'unica grandezza fisica (il **campo elettromagnetico**) in grado di propagarsi a distanza indefinita dalla sorgente, un fenomeno indicato anche col termine **radiazione elettromagnetica**

Riassumendo:

Nelle **immediate vicinanze** di una sorgente (antenna, apparato industriale a radiofrequenza, 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 legati e determinati dalle rispettive "sorgenti fisiche" (cariche e correnti); essi perciò non possono essere ricavati uno dall'altro e **devono essere valutati separatamente**, per esempio utilizzando sensori specifici.

A **distanze superiori**, la struttura dei campi inizia a risentire del fenomeno della **radiazione** (ovvero la "mutua generazione" tra campo elettrico e campo magnetico), che resta l'unico significativo per distanze dalla sorgente superiori a circa una lunghezza d'onda.

Grazie a questa mutua generazione, 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. Tra le due grandezze esiste una semplice relazione matematica che permette di ricavarne uno dall'altro.

In molti casi importanti, risulta che l'ampiezza del campo elettromagnetico radiato varia in modo oscillatorio sinusoidale tanto nel tempo quanto nello spazio: si parla allora di **onda elettromagnetica**. Un'onda elettromagnetica trasporta energia; la *densità di potenza* (energia trasportata per unità di tempo e di superficie, espressa in watt al metro quadrato, W/m^2) risulta proporzionale al prodotto delle intensità del campo elettrico e del campo magnetico e costituisce un'altra grandezza accessibile di misura attraverso la quale caratterizzare l'intensità della radiazione.

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 . Questa relazione, che **permette di determinare tutte e tre le grandezze una volta che se ne sia valutata una**, semplifica notevolmente le procedure di misura. Essa risulta espressa matematicamente dalle seguenti equazioni.

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

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.

Nel caso di sorgenti di dimensioni D grandi rispetto alla lunghezza d'onda, è opportuno distinguere nella regione dei campi radiativi una zona di campi (radiativi) **vicini** (o *di Fresnel*) ed una zona di campi (radiativi) **lontani** (o *di Fraunhofer*). La distanza tipica che discrimina le due zone è dell'ordine di D^2/λ , dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione; si tratta ovviamente di una indicazione convenzionale, poiché nella realtà le due zone sfumano gradualmente una nell'altra, così come avviene nel passaggio tra regione dei campi reattivi e regione dei campi radiativi. La zona dei campi radiativi vicini è caratterizzata dalla presenza di intensi **fenomeni di interferenza** su distanze dell'ordine di un quarto della lunghezza d'onda, che complicano in alcuni casi la misura, soprattutto per quel che concerne le esigenze in termini di risoluzione spaziale della strumentazione impiegata, che deve ovviamente essere molto minore della lunghezza d'onda.

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

Le applicazioni dei campi elettromagnetici e le altre tecnologie che comunque portano a disperdere campi elettromagnetici nell'ambiente investono oggi numerosissimi settori della società, per cui l'elenco che segue sarà necessariamente sommario e forse incompleto.

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

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 su imaging a Risonanza Magnetica o di altro tipo.

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 dell'ordine di qualche chilowatt)	Intenzionale localizzata	Magnetico
		Varchi magnetici (sistemi antifurto e per la rilevazione dei transiti)		
		Emittenti radiofoniche a onde medie	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)
		Emittenti radiofoniche a modulazione di frequenza (88 ÷ 108 MHz)	Intenzionale a diffusione	Elettro-magnetico
		Emittenti televisive VHF e UHF (fino a circa 900 MHz)		
		Stazioni radiobase per la telefonia cellulare (900 MHz e 1800 MHz circa)		
		Ponti radio	Intenzionale focalizzata	
		Radioaiuti alla navigazione aerea (radar, radiofari)		

Tabella 3: classi di sorgenti di campi elettromagnetici a cui può trovarsi esposta la popolazione

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, videoterminali) 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.

Le tabelle che riportiamo forniscono alcune informazioni generali sulle caratteristiche delle sorgenti impiegate nelle varie applicazioni dei campi elettromagnetici. La **Tabella 3** elenca le principali classi di sorgenti a cui può trovarsi esposta la popolazione, distinguendo tre bande di frequenza secondo una terminologia ("basse frequenze", "frequenze intermedie" e "alte frequenze") ormai entrata nel linguaggio comune e che ha anche avuto un certo riconoscimento nell'ambito del progetto europeo COST-244-bis ed in alcuni documenti reperibili sul sito Internet del *Progetto internazionale campi elettromagnetici* dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (<http://www.who.int/peh-emf/>). La **Tabella 4** si riferisce invece alle applicazioni industriali delle tecniche di riscaldamento mediante campi elettromagnetici.

Entrambe le tabelle riportano, per ciascuna sorgente, 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.

Frequenza tipica	Sorgente	Tipo di emissione	Campi emessi
da 50 Hz a 3 MHz	Riscaldamento ad induzione magnetica	Intenzionale localizzata	Magnetico
27 MHz	Riscaldamento a perdite dielettriche		Elettrico
915 e 2450 MHz	Riscaldamento a microonde		Elettromagnetico

Tabella 4: applicazioni industriali del riscaldamento mediante campi elettromagnetici

5. Impianti di telecomunicazione

Esaminiamo adesso con maggior dettaglio le sorgenti connesse con i principali servizi di telecomunicazione. La **Tabella 5** ne prende in considerazione le principali classi, 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).

Si è riportato in tabella anche il valore del parametro EIRP poiché esso consente una rapida valutazione dell'ordine di grandezza delle distanze dall'antenna trasmittente a cui si raggiungono i limiti massimi di esposizione prescritti dalla normativa italiana in vigore. A questo scopo, in **Figura 1** si riportano le distanze, misurate a partire dal centro elettrico dell'antenna trasmittente nella sua direzione di massimo irraggiamento, a cui si raggiungono i

limiti di 20 V/m (linea inferiore) oppure di 6 V/m (linea superiore), in funzione del valore di EIRP della sorgente.

Tipo	Frequenza	Potenza	Guadagno	EIRP
Emittenti radio AM	500 ÷ 1600 kHz	1 ÷ 500 kW	poche unità	1 ÷ 500 kW
Emittenti radio FM	88 ÷ 108 MHz	1 ÷ 12 kW	5 ÷ 50	10 ÷ 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	0.1 ÷ 1 kW	1 ÷ 100	5 ÷ 100 kW
Stazioni RB (downlink)	eTACS: 910 ÷ 950 MHz GSM: 925 ÷ 960 MHz DCS: 1805 ÷ 1880 MHz	30 ÷ 300 W	3 ÷ 30	fino a 2 kW

Tabella 5: classi di sorgenti di campi elettromagnetici impiegate nelle telecomunicazioni

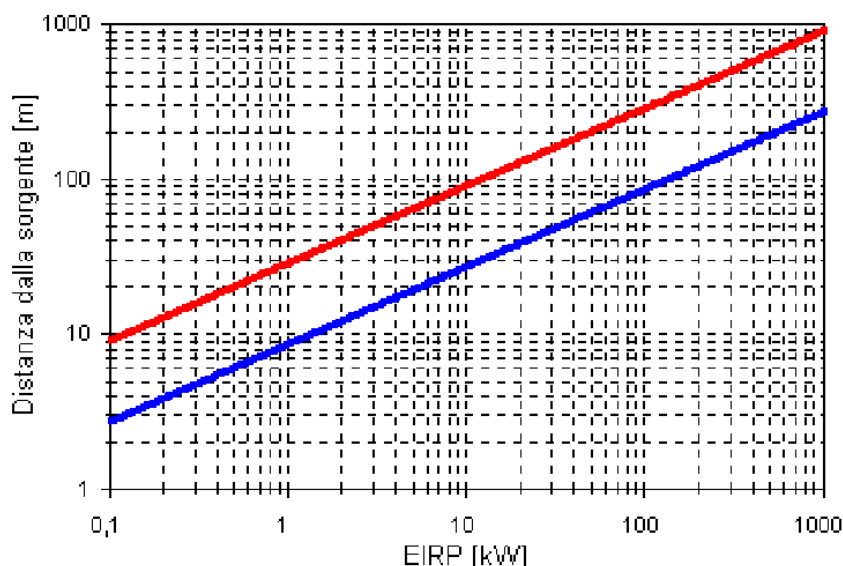


Figura 1: distanze limite per 6 V/m (linea superiore) e 20 V/m (linea inferiore) in funzione del valore di EIRP della sorgente

6. La sorveglianza fisica dei campi elettromagnetici

Sebbene termini come “inquinamento elettromagnetico” ed “elettrosmog” siano, per vari motivi, del tutto impropri, tuttavia la presenza nell’ambiente di campi elettromagnetici di origine antropica è in molti casi un elemento indesiderato per almeno tre ordini di motivi. Innanzitutto, campi molto intensi (sufficientemente al di sopra degli standard di sicurezza) possono risultare sicuramente pericolosi per le persone esposte. In secondo luogo, campi di intensità anche limitata possono compromettere il funzionamento di apparati elettronici delicati, provocando disagi o possibili situazioni di rischio. Infine, vi sono sospetti non confermati che esposizioni prolungate a livelli molto inferiori ai limiti di sicurezza possano aumentare il rischio di contrarre alcune gravi forme patologiche. Quest’ultimo aspetto,

seppure assai meno fondato scientificamente dei primi due, rappresenta il principale motivo di allarme della popolazione nei confronti dell'esposizione ai campi elettromagnetici.

La situazione descritta è sufficiente a motivare lo sviluppo di metodologie per la cosiddetta **sorveglianza fisica**, ovvero la valutazione dei livelli dei campi elettromagnetici attorno alle sorgenti emittenti e negli ambienti frequentati dalla popolazione.

La sorveglianza fisica si può avvalere di metodi **analitici** semplificati, di metodi **numerici** più o meno raffinati ed infine di **misure** strumentali. Sebbene queste ultime costituiscano senza dubbio il più oneroso dei tre metodi, tuttavia vi sono situazioni oggettive dove il ricorso alla misure è indispensabile, poiché l'applicazione di metodi teorici non permette di caratterizzare l'esposizione con precisione sufficiente. Inoltre, il Decreto 381/1998 stabilisce che "Ai fini della verifica del rispetto dei limiti (...), le intensità dei campi elettromagnetici possono essere determinate mediante calcoli o mediante misure. Le misure sono comunque necessarie ogni volta che i calcoli facciano prevedere valori di campo elettrico o magnetico che superano 1/2 dei limiti suddetti."

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 il proprio esatto contributo al campo complessivo, come per esempio è necessario fare per applicare le procedure di riduzione a conformità. Oltre a ciò, occorre ricordare le prescrizioni in proposito contenute nelle Linee Guida Applicative del Decreto 381/1998: "Per quanto riguarda le misure vanno effettuate ordinariamente in banda larga e nel caso in cui venga superato il 50% del valore del limite o misura di cautela è consigliabile effettuare un' analisi in banda stretta dei segnali presenti, oltre il 75% dei suddetti limiti tale analisi diventa assolutamente necessaria."

La strumentazione da impiegare dipende, oltre che dalla frequenza dei campi e dalla modalità prescelta (banda larga o banda stretta), anche dalla regione dove avviene l'esposizione da caratterizzare.

Nella regione dei **campi reattivi**, è necessario misurare in modo indipendente il campo elettrico e il campo magnetico, utilizzando sensori specifici, di 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 un apparato di misura 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 un apparato 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* oppure a strumentazione ad *accoppiamento a radiofrequenza*.

Per quanto riguarda la procedura da seguire per i rilevamenti, esistono protocolli standardizzati, alcuni dei quali sono elencati nei riferimenti al termine di questo testo.

7. Sensori di campo elettrico

Alle frequenze più basse (orientativamente fino a qualche centinaio di chilohertz), la misura del campo elettrico si basa sull'uso di *sensori a condensatore ad armature piane e parallele* (**Figura 2**). Applicando il teorema di Gauss, si trova che, detta S la superficie di ciascuna armatura, la carica totale Q indotta su di essa quando è esposta ad un campo elettrico E è data (in prima approssimazione, poiché si trascura l'effetto del bordo) da:

$$Q = \varepsilon_0 E S$$

dove ε_0 è la costante dielettrica assoluta dello spazio vuoto; se tra le due armature viene collegato un dispositivo amperometrico a bassissima resistenza, dalla misura dell'ampiezza della corrente I indicata da tale strumento:

$$I = \left| \frac{dQ}{dt} \right| = 2\pi f \varepsilon_0 E S$$

(avendo supposto una dipendenza temporale di tipo sinusoidale a frequenza f) è possibile risalire all'intensità del campo elettrico; alternatively, tenendo conto dell'espressione della capacità di un condensatore ad armature piane e parallele poste a distanza “ d ” una dall'altra:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

si può determinare la differenza di potenziale presente a vuoto tra le due armature:

$$V = \frac{Q}{C} = E d$$

e quindi risalire al campo elettrico; questo secondo approccio presenta difficoltà tecniche molto maggiori del primo, ma è virtualmente applicabile anche alla misura di campi elettrici non variabili nel tempo (*campi elettrostatici*).

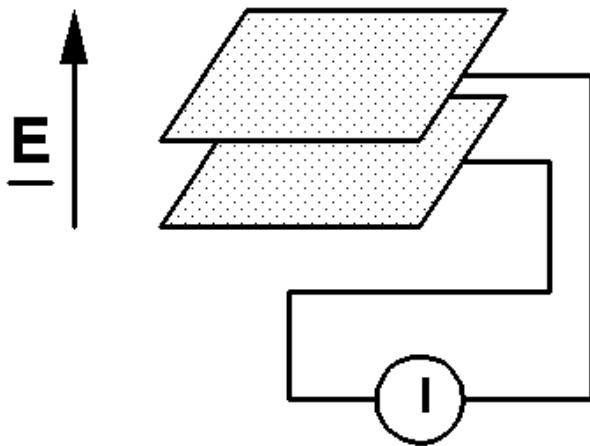


Figura 2: sensore di campo elettrico a condensatore

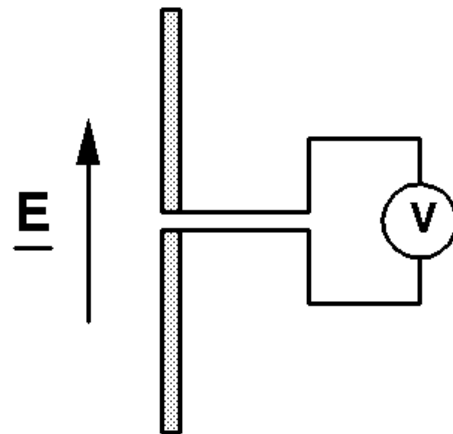


Figura 3: sensore di campo elettrico a dipolo

L'uso del sensore a condensatore non è indicato a frequenze più alte di quelle sopra citate, anche a causa della sua estensione spaziale e dell'elevato valore della sua capacità interna. In questo caso, per frequenze dalle centinaia di chilohertz fino alle centinaia di megahertz, si

preferisce far uso di *sensori a dipolo corto* (**Figura 3**). Si tratta di dispositivi che funzionano sostanzialmente in base allo stesso principio dei precedenti, con la differenza che le due armature piane sono ora sostituite da due conduttori filiformi (*bracci del dipolo*), allineati tra loro e col campo elettrico da misurare, aventi lunghezza complessiva “h” molto minore della lunghezza d'onda e spessore molto minore della lunghezza “h”. Ai morsetti di un dispositivo del genere si rende disponibile una differenza di potenziale V proporzionale all'intensità del campo elettrico secondo la relazione:

$$V = \frac{h}{2} E$$

Questo tipo di sensore presenta ancora una impedenza interna di tipo capacitivo, ma con un valore di capacità molto più piccolo del precedente.

8. Sensori di campo magnetico

Vi sono sostanzialmente due classi di sensori di campo magnetico: i sensori ad **effetto Hall** e i sensori a **induzione di Faraday**.

Il *sensore ad effetto Hall* funziona in base alla proprietà fondamentale del campo magnetico, cioè la sua capacità di esercitare una forza su una corrente elettrica, o più in generale sulle cariche elettriche in movimento. Un sensore di tale tipo impiega una lastrina di materiale semiconduttore percorsa da corrente elettrica e genera in uscita una differenza di potenziale proporzionale tanto all'intensità del campo quanto a quella della corrente impiegata nel dispositivo. Esistono strumenti commerciali che sfruttano sensori Hall e sono in grado di misurare i campi magnetostatici (cioè non variabili nel tempo) ed i campi magnetici a bassissima frequenza (ELF); la loro applicazione nel settore protezionistico è però limitata da alcuni aspetti negativi: interferenza del campo geomagnetico, fragilità, scarsa sensibilità.

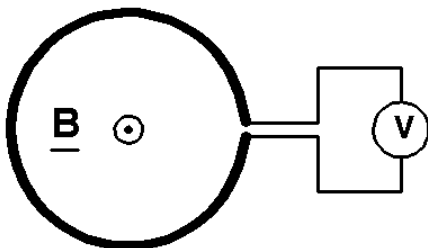


Figura 4: sensore di campo magnetico a bobina

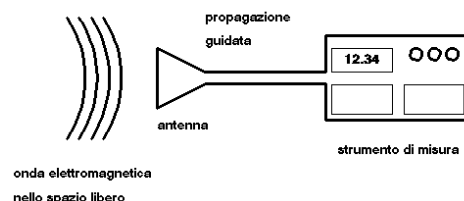


Figura 5: schema a blocchi di un apparato di misura ad accoppiamento a radiofrequenza

Per la misura dei campi magnetici **variabili nel tempo** in modo sinusoidale, la scelta più comune alle frequenze fino alle decine di megahertz consiste nell'impiego di sensori a *bobina* (**Figura 4**). Questi sensori funzionano in base al principio dell'*induzione di Faraday*: in presenza di un campo magnetico oscillante, diretto perpendicolarmente al piano della bobina, in essa viene indotta una differenza di potenziale misurabile agli estremi aperti della bobina stessa, la cui ampiezza V è proporzionale tanto all'intensità del flusso di induzione B quanto alla sua frequenza f, all'area S della bobina ed al numero N di spire che costituiscono il suo avvolgimento:

$$V = 2 \pi f B N S$$

9. Strumenti a rivelazione diretta

Gli strumenti di misura che impiegano sensori di campo elettrico o di campo magnetico del tipo di quelli descritti sopra necessitano di essere collegati ad apparati elettronici in grado di amplificare, filtrare, rivelare o comunque elaborare il segnale (di tensione o di corrente) prodotto dal sensore, per ricavarne una indicazione interpretabile dall'operatore. Tra questi apparati, una tipologia abbastanza comune è costituita dagli *strumenti a rivelazione diretta*. In essi, un dispositivo elettronico detto **rivelatore**, collegato in genere direttamente ai morsetti di uscita del sensore, provvede a convertire il segnale a radiofrequenza in una tensione continua, il cui valore è direttamente proporzionale al *valore quadratico medio* dell'ampiezza del campo cui il sensore risponde: si parla quindi di **rivelazione quadratica**.

I rivelatori quadratici più comunemente impiegati nella strumentazione per misure di campo elettromagnetico sono il **diodo a semiconduttore** e la **termocoppia**.

Nel **diodo semiconduttore**, la rivelazione quadratica è dovuta alla non linearità della caratteristica tensione-corrente che, per segnali piccoli rispetto al potenziale di barriera del diodo, può essere approssimata con una parabola. Applicando quindi al diodo un segnale di tensione a radiofrequenza a valor medio nullo, la corrente che ne risulta ha un valore medio non nullo che si può dimostrare essere proporzionale al quadrato del valore efficace della tensione di eccitazione. In un diodo, pertanto, la rivelazione segue la legge quadratica *solo per segnali di eccitazione sufficientemente piccoli*.

Nel rivelatore a **termocoppia** si fa in modo che la corrente a radiofrequenza generata dal sensore dissipi potenza per effetto Joule nel giunto caldo, innalzandone la temperatura rispetto a quella del giunto freddo. Si genera così una tensione continua dipendente dal valor medio della potenza e cioè al quadrato dell'ampiezza della corrente. Grazie al meccanismo termico, i rivelatori a termocoppia funzionano intrinsecamente in regime quadratico, ovvero forniscono in ogni caso una risposta dipendente solo dalla potenza del segnale. Essi risultano però meno stabili e un po' meno affidabili dei rivelatori a diodo.

10. Misura del campo elettromagnetico

Il campo elettromagnetico viene misurato per mezzo delle *antenne*, dispositivi di dimensioni paragonabili o grandi rispetto alla lunghezza d'onda che funzionano come elemento di transizione tra propagazione del campo nello spazio libero e propagazione in una *struttura guidante* (cavo coassiale o guida d'onda); la potenza che si propaga in tale struttura è proporzionale alla densità di potenza della radiazione che investe l'antenna (la costante di proporzionalità - che ha evidentemente le dimensioni di una superficie - prende il nome di *area equivalente* dell'antenna usata) e può essere misurata per mezzo di apposite apparecchiature elettroniche connesse all'altro estremo della struttura guidante stessa.

Sebbene le antenne possano in linea di principio essere impiegate anche in abbinamento ad apparati di misura a *rivelazione diretta* (e a tale scopo esistono appositi dispositivi rivelatori a diodo previsti per il collegamento ad un cavo coassiale), tuttavia l'applicazione tipica di questo tipo di sensore è in abbinamento con un apparato ad *accoppiamento a radiofrequenza*, secondo una configurazione mostrata schematicamente in **Figura 4**.

Le antenne ed i sensori di più comune impiego in campo protezionistico (stilo, loop, biconica, logaritmica periodica, spirale conica logaritmica, dipolo, tromba) e gli strumenti ad accoppiamento a radiofrequenza (radioricevitori, analizzatori di spettro) permettono di coprire una banda di frequenza estesa fino ai gigahertz ed oltre e di caratterizzare a fondo il segnale misurato, rilevandone non solo l'ampiezza ma anche la frequenza fondamentale, il contenuto spettrale, il tipo di modulazione.

11. Riferimenti per approfondire

Testi nazionali

- Paolo Vecchia, Umberto Tirelli e Ugo Spezia
Campi elettromagnetici e salute: dai miti alla realtà.
21^{mo} Secolo, Roma, 2001.
http://www.21mosecolo.it/pagine/Cem_e_saluteint.pdf
- Autori vari, a cura dell'IFAC (ex IROE)-CNR
Protezione dai campi elettromagnetici non ionizzanti.
Terza edizione, IROE-CNR, Firenze, 2001.
<http://www.ifac.cnr.it/pcemni/libro1/>
- Autori vari, a cura di Paolo Bevitori
Inquinamento elettromagnetico ad alta frequenza. Aspetti tecnici, sanitari e normativi. Campi elettromagnetici generati da sistemi fissi di telecomunicazione e dispositivi elettronici.
Maggioli Editore, Rimini, 2000.
- Autori vari, a cura di Paolo Bevitori
Inquinamento elettromagnetico. Aspetti tecnici, sanitari e normativi. Campi elettrici e magnetici a frequenza industriale (50-60 Hz) generati da elettrodotti ed apparecchi elettrici.
Maggioli Editore, Rimini, 1998.
- Margherita Fronte
Campi elettromagnetici. Innocui o pericolosi?
Avverbi Edizioni, Roma, 1997.

Rapporti di istituzioni internazionali

- Rapport au Directeur Général de la Santé
Les téléphones mobiles, leurs stations de base et la santé. Etat des connaissances et recommandations.
Groupe de travail, Janvier 2001.
Rapporto del Gruppo Multidisciplinare di Esperti costituito nel giugno 2000 dalla Direzione Generale della Sanità francese, su richiesta del Ministro della Sanità, col compito di esaminare i dati scientifici disponibili in merito agli eventuali rischi connessi all'uso dei telefoni cellulari.
http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/telephon_mobil/index.htm
- IEGMP
Mobile Phones and Health
Independent Expert Group on Mobile Phones, May 2000.
Il noto "Rapporto Stewart", preparato da un gruppo indipendente organizzato dal National Radiological Protection Board del Regno Unito, su richiesta del Ministro della Sanità britannico.
<http://www.iegmp.org.uk/IEGMPtxt.htm>
- FDA
Consumer Update on Mobile Phones

- Food and Drug Administration, October 1999.
Un documento preparato dalla Food and Drug americana per rispondere alle domande sulla sicurezza dei telefoni mobili.
<http://www.fda.gov/cdrh/ocd/mobilphone.html>
- NIEHS
Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields
 National Institute of Environmental Health Sciences/ National Institutes of Health, June 1999.
È questo il rapporto ufficiale dell'Istituzione, mentre il documento del 1998 (vedi sotto) - di cui questo è per altro, almeno in parte, una sintesi - è solo il rapporto del gruppo di lavoro. Questo documento è stato preparato in risposta all'U.S. Energy Policy Act del 1992.
http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/html/EMF_DIR_RPT/Report_18f.htm
 - RSC Expert Panel
A Review of the Potential Health Risks of Radiofrequency Fields from Wireless Telecommunication Devices
 Expert Panel on the Potential Health Risks of Radiofrequency Fields from Wireless Telecommunication Devices, March 1999.
Un rapporto preparato da un gruppo di esperti su richiesta della Royal Society of Canada per conto del Ministero della Sanità canadese.
<http://www.rsc.ca/english/RFreport.pdf>
 - NIEHS Working Group
Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields.
 National Institute of Environmental Health Sciences/ National Institutes of Health, August 1998.
Un rapporto molto completo, anche dal punto di vista dei riferimenti bibliografici, preparato da un Gruppo di Studio costituito nell'ambito del progetto EMF RAPID (Electric and Magnetic Fields Research and Public Information Dissemination) del Governo degli Stati Uniti (vedi Risorse Internet).
<http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/html/WGReport/WorkingGroup.html>
 - U.S. National Research Council
Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields.
 National Academy Press, Washington, 1997.
Il punto delle conoscenze sull'argomento. Un'opera di una organizzazione assai prestigiosa.

Normative nazionali

Legge 22 febbraio 2001, n. 36
Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici.
 Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, serie generale, n.55, 7 marzo 2001.

Decreto del Ministero dell'Ambiente 10 settembre 1998, n. 381
Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana.
 Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, serie generale, n.257, 3 novembre 1998.

Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 28 settembre 1995
Norme tecniche procedurali di attuazione del decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 23 aprile 1992 relativamente agli elettrodotti.

Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, serie generale, N.232, 4 ottobre 1995.

Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 23 aprile 1992

Limiti massimi di esposizione alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno.

Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, serie generale, N.104, 6 maggio 1992.

Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 16 gennaio 1991

Aggiornamento delle norme tecniche per la disciplina della costruzione e dell'esercizio di linee elettriche aeree esterne.

Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, serie generale, N.40, 16 febbraio 1991.

Normative internazionali

Consiglio delle Comunità Europee

Raccomandazione del 12 luglio 1999 relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz (1999/519/CE)

Gazzetta ufficiale delle Comunità europee - L 199/59, 30 luglio 1999.

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.

http://www.wwilkins.com/health_physics/04.98/494.pdf

ICNIRP

Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields

Health Physics, Vol.66, N.1, January 1994.

IEEE Standards Coordinating Committee 28 on Non-Ionizing Radiation Hazards

Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz

(ANSI/IEEE C95.1-1991), The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1992.

Procedure standardizzate di misura

CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)

Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz – 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana.

Norma CEI 211-6, Milano, 2001.

CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)

Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz – 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana.

Norma CEI 211-7, Milano, 2001.

L.Anglesio – Gruppo di lavoro ANPA/ARPA

Guida tecnica per la misura dei campi elettromagnetici compresi nell'intervallo di frequenza 100 kHz – 3 GHz in riferimento all'esposizione della popolazione

ANPA – RTI CTN_AGF 1/2000

<http://www.sinanet.anpa.it/documentazione/CTNAGF/>

[/CDCCONFERENZA/RTI%20CTN_AGF%201_2000.pdf](http://www.sinanet.anpa.it/documentazione/CTNAGF/)

IEEE Standards Coordinating Committee 28 on Non-Ionizing Radiation Hazards
IEEE recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields - RF and microwave
(ANSI/IEEE C95.3-1991), The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1992.

ANSI/IEEE Std. 644-1987
Standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines.
In "Engineering in safety, maintenance and operation of lines".
IEEE Standards Collection, New York, 1993.
Una sorta di "guida ufficiale" per la realizzazione, l'impiego e la calibrazione della strumentazione per le misure a 50/60 Hz.

CEI-IEC
Measurement of power-frequency electric fields
IEC International Standard 833, 1987;
(in Italia: Norma CEI 42-7 fascicolo 1398).

FCC-OST Bulletin n.65, october 1985
Evaluating Compliance with FCC-Specified Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Radiation.

Risorse Internet

Su Internet è possibile reperire molto materiale sugli argomenti che abbiamo trattato in questo libro. Per tentare di organizzare (parzialmente) questo materiale, o per lo meno renderne più facile l'accesso agli interessati, presso l'IFAC-CNR viene curata una bibliografia brevemente commentata (in inglese) dei siti Internet che si occupano di Interazioni tra campi elettromagnetici e sistemi biologici; essa si trova all'indirizzo:

<http://niremf.ifac.cnr.it/emfref/>

e costituisce un buon punto di partenza per i navigatori.

Tra i siti internazionali elencati in questa bibliografia, si segnalano i seguenti per il loro carattere decisamente divulgativo.

Le "F.A.Q." (Frequently Asked Questions), documenti a domande e risposte curati da John Moulder del Medical College of Wisconsin; sono coperti tre temi distinti.

Ipotesi di cancerogenicità dei campi statici, all'indirizzo

<http://www.mcw.edu/gcrc/cop/static-fields-cancer-FAQ/toc.html>

Ipotesi di cancerogenicità dei campi a 50/60 Hz, all'indirizzo

<http://www.mcw.edu/gcrc/cop/powerlines-cancer-FAQ/toc.html>

Effetti sanitari delle stazioni radiobase della telefonia cellulare, all'indirizzo

<http://www.mcw.edu/gcrc/cop/cell-phone-health-FAQ/toc.html>

Le "Questions and Answers About EMF Electric and Magnetic Fields Associated with the Use of Electric Power" a cura del National Institute of Environmental Health Sciences, all'indirizzo

<http://www.niehs.nih.gov/oc/factsheets/emf/emf.htm>

Il sito del progetto Electric and Magnetic Fields (EMF) Research and Public Information Dissemination (RAPID) varato dal Governo degli Stati Uniti con compiti anche divulgativi. Da questo sito è possibile accedere alla versione elettronica (in formato HTML o PDF) del report "Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields" sopra citato, all' indirizzo

<http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/home.htm>

Il sito dei documenti divulgativi dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO), che ha redatto sull'argomento dei campi elettromagnetici un'ampia serie di "Fact Sheets" reperibili in italiano all'indirizzo

http://www.who.int/peh-emf/publications/facts_press/fact_italian.htm