



Dipartimento Igiene del lavoro



ASSOCIAZIONE NAZIONALE
PROFESSIONALE
ESPERTI QUALIFICATI NELLA

National Professional Association of Italian
Qualified
Experts in Radiological Protection

Corso di Formazione

**“CAMPI ELETTROMAGNETICI: MISURE E
PROTEZIONE”**

Monte Porzio Catone, 15-18 aprile 2008

**ELEMENTI DI FISICA DEI CAMPI
ELETTROMAGNETICI**

**STRUMENTAZIONE E
PROCEDURE DI MISURA**

Dr.ssa Rosaria Falsaperla, Dr. Paolo Rossi

INDICE

1.	Concetti fondamentali di elettromagnetismo.....	3
1.1	La carica elettrica	3
1.2	Il campo elettrico	3
1.3	Il potenziale elettrico.....	5
1.4	Il campo magnetico	5
1.5	Onde elettromagnetiche.....	7
1.6	Campo vicino e campo lontano	9
2	Introduzione - Specificità delle esposizioni professionali	12
3	Significato dei limiti di esposizione per gli effetti acuti.....	13
4	Misure a banda larga	15
4.1	Caratteristiche degli strumenti in banda larga	16
4.2	Errori di misura	18
5	Misuratori di campo magnetico a frequenze estremamente basse (ELF).....	20
6	Misuratori di campo elettrico a frequenze estremamente basse (ELF)	21
7	Procedure di misura in banda larga	22
8	Misure di campi magnetici statici	25
9	Misure in banda stretta	25
9.1	Caratteristiche degli strumenti in banda stretta	26
9.2	Errori di misura.....	27
10	Procedure di misura in banda stretta	28
11	Considerazioni particolari su specifiche tipologie di sorgente.....	29
11.1	Campi magnetici a 50 Hz. Produzione e trasporto dell'energia elettrica.....	29
11.2	Misure di campi magnetici in bassa frequenza a bordo dei materiali rotabili.....	30
11.3	Impianti fissi per le telecomunicazioni.....	30
11.3.1	Sistemi radiotelevisivi	30
11.3.2	Radio AM (OL, OM, OC).....	31
11.3.3	Radio FM	31
11.3.4	Stazioni radio base per telefonia mobile	32
11.4	Apparecchiature industriali e sanitarie	33
	Bibliografia e norme tecniche di riferimento	35

1. Concetti fondamentali di elettromagnetismo

1.1 La carica elettrica

L'atomo più semplice è l'atomo di idrogeno, che è costituito da un protone e da un elettrone che vi orbita intorno. Protone ed elettrone sono particelle dotate di una particolare proprietà che consente loro di attrarsi e che vincola l'elettrone nell'orbita suddetta. A tale proprietà viene dato il nome di carica elettrica, ed in particolare al protone viene associata carica elettrica positiva, all'elettrone negativa.

Le particelle, e più in generale, i corpi contraddistinti da cariche uguali si respingono, viceversa particelle e corpi con cariche diverse si attraggono.

L'intensità della forza con cui due cariche si attraggono o respingono è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra le stesse, secondo la legge di Coulomb:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

dove:

- F è la forza in Newton (N),
- Q_1 e Q_2 sono le cariche elettriche espresse in Coulomb (C),
- r è la distanza fra esse espressa in metri
- ϵ è una costante che dipende dal mezzo; nel caso del vuoto si assume per ϵ il valore $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N}\cdot\text{m}^2$, valore che si può assumere anche per l'aria.

Nel caso di più particelle cariche, la forza totale agente su una di queste è la somma vettoriale delle forze esercitate singolarmente sulla stessa da ogni altra particella.

1.2 Il campo elettrico

Il concetto di campo viene utilizzato per rappresentare più semplicemente le forze che agiscono tra le cariche. E' possibile ragionare non in termini di forza fra due cariche ma di campo attorno ad una carica, assumendo che la stessa induca una modificazione nello spazio

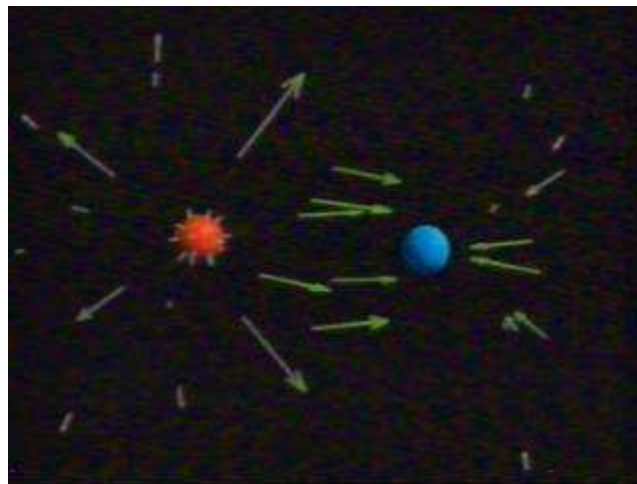
circostante tale che, se una seconda carica si pone in esso, la forza fra le due cariche sia pari a quella di Coulomb.

Il valore del campo elettrico generato da una carica Q nello spazio è quindi:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

Il campo elettrico viene in genere rappresentato tramite linee di campo. La tangente in dato punto alla linea di campo indica la direzione della forza che si eserciterebbe su una carica posta in quel punto; il verso della linea indica il verso della forza.

In figura sono rappresentate le linee di campo per una carica positiva (linee uscenti dalla carica) e per una carica negativa (linee entranti nella carica).



Quando il campo è generato da due o più cariche elettriche le linee di campo sono in generale linee curve.

1.3 Il potenziale elettrico

Per spostare una carica q all'interno di un campo elettrico, da un punto A ad un punto B, è necessario compiere un certo lavoro. Nella formulazione integrale il lavoro è definito come:

$$L_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Per ogni spostamento elementare il lavoro è dato dal prodotto dello spostamento per la proiezione della forza nella direzione dello spostamento. Il lavoro non dipende dal particolare percorso ma solo dagli estremi.

Il lavoro fra A e B per unità di carica viene chiamato differenza di potenziale (d.d.p.) (V_{AB}):

$$V_{AB} = \frac{L_{AB}}{q} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

L'unità di misura del potenziale è il Volt. Il concetto di potenziale elettrico non è niente altro se non un'ulteriore rappresentazione delle forze elettriche, che torna molto utile nella descrizione dei campi.

1.4 Il campo magnetico

La definizione di campo elettrico assume la stazionarietà delle cariche; il concetto di campo magnetico viene introdotto per descrivere le forze che si mettono in gioco laddove le cariche sono in movimento.

Quando gli elettroni si muovono, ad esempio attraverso un oggetto metallico, una certa quantità di carica viene trasportata da un'estremità all'altra. Si definisce *intensità di corrente* la quantità di carica che attraversa la sezione del conduttore nell'unità di tempo:

$$I = Q/t$$

dove:

- I è l'intensità di corrente espressa in Ampère (A) (1 A = 1 Coulomb/secondo);
- Q è la quantità di carica che nel tempo t attraversa la sezione del conduttore.

Considerando due fili rettilinei percorsi dalle correnti I_1 e I_2 , posizionati ad una distanza r molto piccola rispetto alla loro lunghezza, si riscontra la presenza di una forza attrattiva tra i due conduttori se le correnti fluiscono nello stesso verso, repulsiva se hanno verso opposto. L'intensità della forza agente su un tratto l del filo 2 è data da:

$$F = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 l}{r}$$

dove:

- μ è una costante detta permeabilità magnetica, che è caratteristica del mezzo: nel caso del vuoto μ vale $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$, valore rappresentativo anche per l'aria.

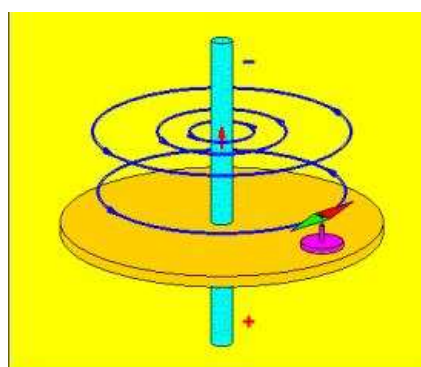
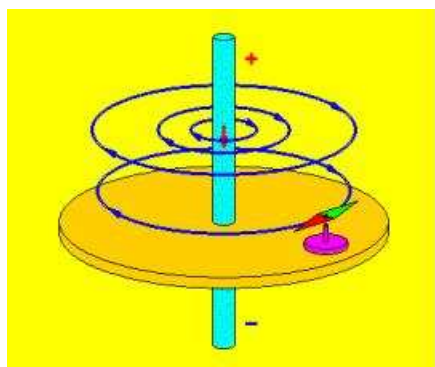
In analogia con i campi elettrici prodotti dalle cariche, è quindi possibile assumere che la corrente che percorre il filo 1 generi una modificazione dello spazio circostante (ovvero un campo) tale per cui il filo 2, a sua volta percorso da corrente, risenta di una forza magnetica.

Nel caso di un filo rettilineo indefinito percorso dalla corrente I l'intensità del campo magnetico H nel vuoto è:

$$H = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{I}{r}$$

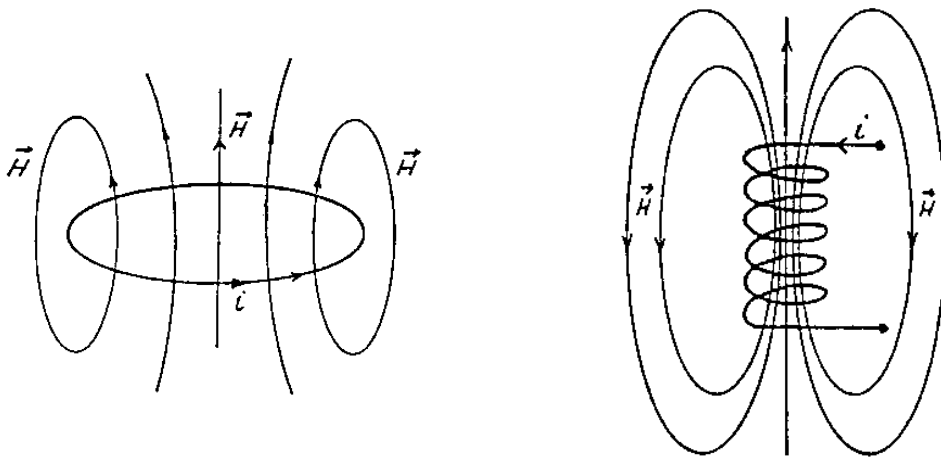
nota come legge di Biot e Savart. L'unità di misura del campo magnetico è l'Ampere su metro (A/m).

Come nel caso del campo elettrico, per descrivere il campo magnetico attorno ad un conduttore si utilizza la rappresentazione tramite linee di campo. Nel caso di un conduttore rettilineo tali linee sono rappresentabili come circonferenze concentriche attorno al conduttore medesimo.



Il campo magnetico in un dato punto è diretto come la tangente alla linea di campo nel punto medesimo. A differenza del caso del campo elettrico, ove direzione e verso della forza e del campo coincidono, la forza magnetica non è diretta come il campo, ma è ortogonale alle direzioni del campo e delle correnti.

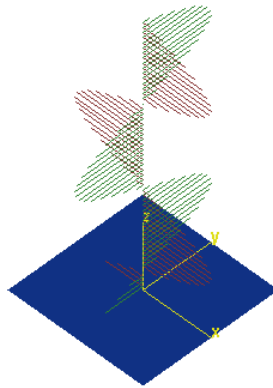
Un caso importante di campo magnetico è quello che si riferisce ad una corrente su un singolo o più percorsi circolari (bobina).



1.5 Onde elettromagnetiche

Le cariche elettriche ferme danno origine ai campi elettrici e le correnti elettriche (cariche in movimento) danno origine ai campi magnetici.

In realtà si osserva anche che una variazione del campo elettrico dà origine ad un campo magnetico, e che una variazione del campo magnetico produce sempre la comparsa di un campo elettrico e da tale proprietà dei campi Maxwell predisse l'esistenza delle onde elettromagnetiche. Queste sono costituite da una sorta di catena di campi elettrici e magnetici variabili nel tempo che si generano mutuamente, e sono in grado di propagarsi con velocità finita (nel vuoto la velocità della luce) nello spazio circostante.



Ad elevate distanze dalla sorgente le oscillazioni dei campi elettrici e magnetici che costituiscono un'onda elettromagnetica sono in fase fra loro e ortogonali alla direzione di propagazione dell'onda. Questa configurazione viene chiamata onda piana.

L'energia trasportata dall'onda elettromagnetica nell'unità di tempo attraverso una superficie unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione, è detta densità di potenza S ed è data da:

$$S = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_{eff}^2$$

Nel vuoto, o in aria, vale la relazione:

$$S = \frac{E_{eff}^2}{377}$$

dove E_{eff} è il valore efficace dell'intensità del campo elettrico E , che per un'onda sinusoidale è pari a:

$$E_{eff} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}$$

Caratteristiche generali di un'onda elettromagnetica sono la lunghezza d'onda (λ), la frequenza (ν) e la velocità di propagazione (c), legate dalla relazione:

$$c = \lambda \nu$$

Dato che la velocità di propagazione nel vuoto è una costante universale (pari circa a 300.000 km/s), le onde elettromagnetiche si differenziano in termini di lunghezza d'onda o frequenza.

Una classificazione dello spettro elettromagnetico alle frequenze non ionizzanti è riportato nella tabella che segue.

Frequenza	Nomenclatura	Lunghezza d'onda
1 Hz – 300 Hz	Frequenze estremamente basse (VLF-EMF)	
300 Hz – 300 kHz	Frequenze basse (LF-EMF)	
300 kHz – 300 MHz	Radiofrequenze (RF)	10 km – 1 m
300 MHz – 300 GHz	Microonde (MW)	1 m – 1 mm
300 GHz – 300 THz	Infrarosso (IR)	1 mm – 760 nm
375 THz – 750 THz	Luce visibile (LV)	760 nm – 400 nm
750 THz - 3×10^4 THz	Ultravioletto (UV)	400 nm – 100 nm

In generale, un'onda elettromagnetica si propaga a velocità:

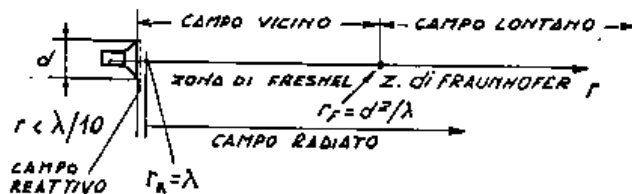
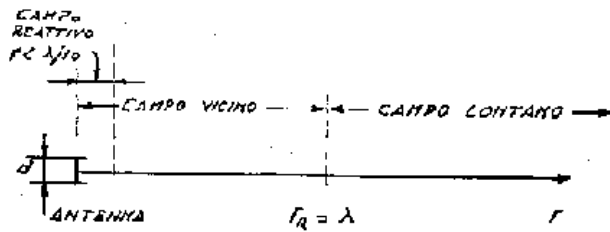
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

in cui ϵ e μ sono la costante dielettrica e la permeabilità magnetica caratteristici del mezzo.

Nel caso il mezzo sia il vuoto, devono essere utilizzati ϵ_0 e μ_0 , che forniscono per la velocità dell'onda elettromagnetica il valore di $2.998 \cdot 10^8$ m/s, vale a dire la velocità della luce (c).

1.6 Campo vicino e campo lontano

Allontanandosi dalla sorgente dell'onda, lo spazio viene convenzionalmente suddiviso in zona di campo vicino e zona di campo lontano, secondo quanto riportato nelle figure che seguono, relative rispettivamente a radiatori corti ($D \ll \lambda$) o estesi ($D \geq \lambda$).



Nel caso di radiatori corti, per i quali la dimensione massima D della sorgente è molto più piccola di λ , la separazione fra campo vicino e lontano occorre per distanze pari circa a λ . Per radiatori estesi, ove $D > \lambda$, la medesima separazione avviene a distanze di circa $2D^2/\lambda$.

La distinzione in tali zone assume significato operativo sulle procedure di misura. In condizione di campo vicino le misure devono, infatti, essere condotte in maniera indipendente per il campo elettrico e magnetico; in condizione di campo lontano si può invece procedere indifferentemente alla misura del campo elettrico, magnetico o della densità di potenza, in quanto da una sola di queste grandezze è possibile ricavare le altre, tramite le seguenti relazioni:

$$E = 377H \qquad H = \frac{E}{377} \qquad S = E \cdot H = \frac{E^2}{377} = 377 \cdot H^2$$

La zona di campo vicino può essere ulteriormente suddivisa in:

- zona di campo reattivo vicino, che si estende dalla superficie della sorgente fino a distanze di circa $\lambda/2\pi \div 3\lambda$ (in funzione della tipologia di sorgente);
- zona di campo radiativo vicino (zona di Fresnel), che si estende dal termine della precedente fino ad una distanza R_0 (distanza di Rayleigh), pari al maggiore fra i valori di λ e $2D^2/\lambda$, con D pari alla dimensione massima della sorgente.

Nella zona di campo vicino reattivo i campi elettrici e magnetici variano fortemente da punto a punto senza una correlazione definita. Nella zona di Fresnel, il campo presenta un andamento irregolare con rapide variazioni di intensità. Nella zona di campo lontano, infine, il campo

assume le caratteristiche di onda piana: E ed H oscillano in direzioni ortogonali, il rapporto E/H ha valore costante pari a 377, l'intensità dei campi varia con l'inverso della distanza. In zona di campo lontano a distanza R da un'antenna alimentata con la potenza P, la densità di potenza S nella direzione di massima irradiazione può essere scritta come:

$$S = \frac{PG_i}{4\pi R^2}$$

dove G_i rappresenta il guadagno dell'antenna rispetto alla sorgente isotropica ideale.

2 Introduzione - Specificità delle esposizioni professionali

La misura a scopo protezionistico dei campi elettrici, magnetici, ed elettromagnetici, non ionizzanti variabili nel tempo nell'intervallo delle frequenze non ottiche (0 - 300 GHz), presenta caratteri di complessità ai quali contribuiscono da un lato l'estensione dello spettro, che comporta una certa diversificazione nelle tecniche di acquisizione ed elaborazione dei dati, dall'altro il fatto che i limiti o livelli di protezione con cui confrontare le misure possono assumere significati del tutto differenti tra loro, in ragione del particolare standard o normativa che si sta considerando. Spesso si riscontra la tendenza a considerare gli strumenti (specie i più semplici) come "scatole nere", in grado di fornire il risultato voluto per ogni condizione operativa; una conoscenza adeguata dei principi di funzionamento e delle limitazioni di ogni tipo di strumentazione è invece indispensabile per giungere a valutazioni attendibili.

E' noto che gli effetti biologici accertati delle NIR non ottiche sono legati a due meccanismi fondamentali: induzione di correnti nei tessuti elettricamente stimolabili, e cessione di energia con rialzo termico. Il primo meccanismo è tipico delle frequenze più basse (ELF e LF), il secondo delle radiofrequenze e microonde. Quando determinate soglie di *densità di corrente* e di SAR (rateo di assorbimento specifico), note dalla sperimentazione "in vivo", vengono superate, si può avere un rischio di danno per la salute del soggetto esposto. Nella filosofia protezionistica ormai universalmente accreditata [1] i limiti di esposizione sono espressi in termini di tali grandezze "dosimetriche"; i livelli massimi dei campi ambientali misurabili sono chiamati "livelli di riferimento", intesi come strumenti operativi a garanzia del rispetto delle restrizioni fondamentali sulla densità di corrente indotta e sul SAR.

A seguito dell'emanazione della Raccomandazione del luglio 1999 [2], la standardizzazione europea sta procedendo in accordo a tale filosofia, e già sono vigenti norme di prodotto che hanno come scopo fondamentale la limitazione delle grandezze dosimetriche, come ad esempio nel caso dei telefoni cellulari. La normativa quadro del nostro paese (legge 36/2001 [3]) non prevede invece la necessità di porre restrizioni alle grandezze "di base", ed il sistema di protezione è fondato solo su restrizioni alle grandezze ambientali. Ciò da un lato facilita la definizione di politiche di cautela (i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità), dall'altro produce un certo grado di incompletezza nell'attuazione della protezione dagli effetti acuti. E' infatti noto che nel caso delle più comuni esposizioni ambientali o individuali della popolazione i tipici livelli dei campi non risultano sufficientemente elevati da comportare problematiche di protezione da effetti acuti, mentre nel caso delle esposizioni professionali la protezione dagli effetti acuti deve rappresentare invece un'esigenza realistica, in considerazione delle differenti condizioni di esposizione e tipologie di sorgente.

Nondimeno, nell'attuazione di qualsivoglia pratica di misura delle grandezze ambientali che abbia come fine la protezione dagli effetti acuti, la natura di "grandezze di riferimento" dei campi, ed il legame con le grandezze di base, dovrebbero essere debitamente tenuti in considerazione, anche al fine di ottimizzare la misura dal punto di vista dei costi e dei tempi. Differenti presupposti devono invece essere assunti se si è interessati a valutazioni su esposizioni relative al lungo periodo.

3 Significato dei limiti di esposizione per gli effetti acuti

Le modalità di interazione delle NIR non ottiche con la materia biologica si traducono sostanzialmente in due effetti tra loro complementari: induzione di corrente elettrica e produzione di calore con rialzo termico. Alle frequenze più basse e fino a circa 1 MHz, prevale l'induzione di correnti elettriche nei tessuti elettricamente stimolabili, come nervi e muscoli. Con l'aumentare della frequenza diventa sempre più significativa la cessione di energia nei tessuti attraverso il rapido movimento oscillatorio di ioni e molecole di acqua, con lo sviluppo di calore e riscaldamento. A frequenze superiori a circa 10 MHz, quest'ultimo effetto è l'unico a permanere, e al di sopra di 10 GHz, l'assorbimento è esclusivamente a carico della cute. Gli effetti biologici osservati con certezza nell'animale, (come ad esempio stimolazione dei tessuti eccitabili, alterazioni neurocomportamentali, endocrine, immunologiche, lesioni alle strutture oculari e alle gonadi), i pochi dati confermati nell'uomo e le prove su modelli artificiali sono riconducibili a uno di questi due meccanismi di base o a entrambi. Ai fini protezionistici, la filosofia seguita consiste nel definire in primo luogo le grandezze fisiche "dosimetriche" proprie dell'interazione tra i campi e i sistemi biologici, nei due differenti meccanismi di base.

Nel caso degli effetti termici, tale grandezza *di base* è costituita dall'entità dell'assorbimento di energia da parte dei tessuti per unità di massa e di tempo, ossia il *rateo di assorbimento specifico* (Specific Absorbtion Rate, SAR), espresso in W/kg.

Per quanto riguarda l'induzione di correnti, la grandezza *di base* è costituita dalla corrente che attraversa una qualsiasi sezione unitaria di tessuto, a seguito delle differenze di potenziale generate all'interno del sistema biologico dal campo esterno incidente, ossia la *densità di corrente*, espressa in A/m².

Altre grandezze d'interesse, per quanto meno importanti nella maggior parte dei contesti di esposizione, sono *l'assorbimento specifico* (Specific Absorbtion, SA), espresso in J/m² e significativo per esposizioni a campi pulsati, e la *corrente di contatto* espressa in mA, significativa nel caso di contatto accidentale con oggetti conduttori caricati per induzione da un campo esterno.

Le restrizioni per il SAR e per la densità di corrente, vengono definite attraverso l'applicazione di opportuni fattori di sicurezza ai valori in corrispondenza dei quali sono stati ottenuti e riprodotti in modo consistente alcuni effetti biologici dannosi sull'animale, in particolare primati. Per i lavoratori professionalmente esposti, che vengono considerati individui sani esposti continuativamente otto ore al giorno per tutta la vita lavorativa, viene correntemente adottato un fattore di sicurezza pari a 10. Per l'esposizione della popolazione, in considerazione della presenza di soggetti più deboli, come bambini, anziani, o malati, e la possibilità di esposizioni prolungate, viene normalmente adottato un fattore di sicurezza pari a 50. I corrispondenti limiti sono definiti *limiti di base* e, rappresentano i veri limiti di carattere sanitario che non debbono essere superati in alcun caso. Mentre il limite di base per il SAR risulta indipendente dalla frequenza, quello per la densità di corrente indotta varia con la frequenza corrispondentemente alle soglie di stimolazione.

Nella pratica le grandezze di base non sono però direttamente misurabili nei soggetti esposti. Per verificare il rispetto dei limiti di base è necessario considerare i valori delle grandezze fisiche misurabili nell'ambiente. Tali grandezze sono rappresentate dalle *intensità del campo elettrico e del campo magnetico*, espresse rispettivamente in V/m e in A/m, ma alle basse frequenze è più corretto esprimere il campo magnetico in termini di *induzione magnetica* (in μT). Alle frequenze significative per gli effetti termici (al di sopra di 10 MHz) può anche essere impiegata la *densità di potenza*, espressa in W/m^2 , che l'ICNIRP considera grandezza di base per le frequenze superiori a 10 GHz.

In base a modelli teorici di interazione bioelettromagnetica, validati da analisi sperimentali, vengono calcolati in condizioni di massimo accoppiamento tra i campi e il corpo esposto, i cosiddetti *livelli derivati di riferimento* per le grandezze misurabili, che garantiscano in tutte le circostanze di esposizione il rispetto dei limiti di base per il SAR e per la densità di corrente. In altre parole, i *livelli di riferimento* sono tali per cui l'esposizione della persona a tali valori può tradursi nel raggiungimento del limite della grandezza di base, qualora sussistano le condizioni di massimo accoppiamento tra i campi ed il soggetto esposto.

I livelli di riferimento per i campi ambientali devono intendersi come media spaziale sul volume occupato dal soggetto esposto. Essi garantiscono il rispetto del limite di base per il SAR mediato a corpo intero, ma non per il SAR locale. Per tale ragione l'ICNIRP ha stabilito nell'intervallo di frequenza 10 - 110 MHz ulteriori livelli di riferimento espressi in termini della corrente indotta in ogni arto, che per le esposizioni professionali è pari a 100 mA. Per tutte le frequenze fino a 110 MHz vengono inoltre stabiliti livelli di riferimento per la corrente di contatto a protezione da scosse e ustioni dovute al contatto accidentale con oggetti conduttori caricati dai campi.

I livelli di riferimento non sono rigidi come i limiti alle grandezze di base, ma possono essere interpretati con maggiore elasticità, tenuto conto che l'entità dell'interazione dipende anche dall'orientamento del corpo rispetto al campo, dalla sua polarizzazione, e dalla localizzazione dell'esposizione. Pertanto il superamento dei livelli di riferimento non implica automaticamente il superamento dei limiti di base. I valori di riferimento sono inoltre variabili in funzione della frequenza anche nel range di significatività del SAR, dato che l'organismo umano assorbe in modo disomogeneo al variare della stessa, risultando i valori massimi compresi nel cosiddetto *intervallo di risonanza* (30 - 300 MHz, massimo a 70 MHz per un uomo di taglia media).

4 Misure a banda larga

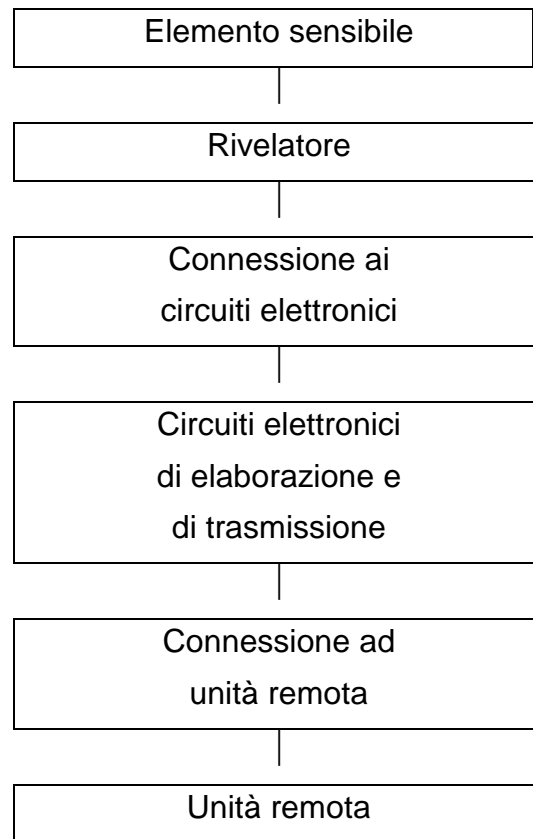
Le misure a banda larga sono effettuate mediante strumenti che forniscono informazioni sui campi oggetto di indagine, integrate su un dato intervallo di frequenza in funzione della particolare sonda impiegata; appartengono a questa categoria le misure più comunemente effettuate con strumenti di tipo portatile, soprattutto per le misure in radiofrequenza e microonde.

Informazioni approfondite sul funzionamento e l'utilizzo degli strumenti a banda larga sono contenute nelle recenti norme CEI [4] e [5].

4.1 Caratteristiche degli strumenti in banda larga

Il tipico schema funzionale di un misuratore a banda larga è il seguente:

Schema a blocchi misuratori a banda larga



Gli elementi sensibili possono essere costituiti dalle seguenti classi di dispositivi:

- dipoli elettrici, sensibili al campo E o alla sua derivata temporale dE/dt ;
- loop magnetici, sensibili al campo H o alla sua derivata temporale dH/dt ;
- termocoppie sensibili alla densità di potenza S;
- sensori di Hall sensibili al campo H (usati per le misure di campo magnetico statico).

I dipoli elettrici ed i loop magnetici sono gli elementi sensibili più comunemente utilizzati e di maggiore interesse. Per le misure in bassa frequenza, è importante menzionare il fatto che la risposta di tali sensori è proporzionale all'intensità dei campi incidenti solo nel caso di forme d'onda puramente sinusoidali, caso quasi realistico solo per le misure alla frequenza di rete. Quando il segnale contiene più armoniche della frequenza fondamentale, ognuna di queste verrà pesata all'uscita dell'elemento sensibile con il suo numero d'ordine. Da qui la necessità di

utilizzare elementi integratori (non sempre presenti) nei circuiti di rivelazione per ricostruire la forma d'onda originale, e fornire una misura attendibile.

Nel caso degli elementi sensibili utilizzati per le misure a radiofrequenza, la risposta in frequenza è inizialmente proporzionale alla derivata temporale del campo incidente, per divenire direttamente proporzionale al valore del campo al di sopra di una determinata frequenza di taglio. Operando a frequenze della zona “derivativa” possono sussistere anche in questo caso problemi di interpretazione del dato presentato dallo strumento, in caso di segnali non sinusoidali o con modulazioni.

Ormai tutti i sensori disponibili sono isotropici, vale a dire presentano risposta costante per tutte le direzioni di incidenza del campo, e si utilizzano tre elementi sensibili disposti a 90° , o più raramente a 54.7° . Tali classi di sensori presentano comunque difficoltà di ingegnerizzazione, poiché i supporti di un dipolo (o loop) tendono ad interferire con il campo misurato dagli altri due, riducendo l'isotropia, e introducendo un'ulteriore fonte di errore. A volte i tre elementi sensibili di un sensore isotropico non sono posti nello stesso punto geometrico, e di ciò si deve tenere conto nell'analisi della risoluzione spaziale delle misure.

La maggior parte degli strumenti per misure in bassa frequenza è equipaggiata con rivelatori rms (root mean square), e solo alcuni anche con rivelatori di picco. Tale ultimo tipo di rivelatore (da non confondersi con la funzionalità "max hold" che si riferisce al dato presentato sul display, indipendentemente dal tipo di rivelatore impiegato), è molto utile specialmente nella misura di campi con presenza di transienti.

Per gli strumenti che operano in radiofrequenza, i rivelatori hanno il compito di trasformare il segnale a radiofrequenza proveniente dall'elemento sensibile in un segnale di bassa frequenza più facilmente gestibile dalla circuiteria. In questo processo si perde anche l'informazione sulla fase del campo, e quindi il segnale complessivo sulle tre componenti è di tipo rss (root sum square), che in generale è sempre una sovrastima del corrispondente rms. I rivelatori devono presentare un appropriato valore di impedenza di carico al sensore, al fine di evitare il più possibile comportamenti derivativi di questo ultimo. Per sensori di tipo elettrico vengono utilizzati diodi rivelatori a bassa soglia di conduzione (schottky o diodi zero bias), fatti lavorare nella zona quadratica della caratteristica. Per sensori di tipo magnetico si utilizzano come rivelatori amplificatori a bassissima impedenza di ingresso. In ogni caso la risposta in ampiezza ed in frequenza è ben lontana dal presentarsi completamente uniforme.

4.2 Errori di misura

Le varie sonde utilizzate negli strumenti a larga banda sono tipicamente affette (come dichiarato dai costruttori) da un errore di taratura dell'ordine di ± 1 dB, dovuto all'incertezza del campo campione utilizzato nella procedura di calibrazione (in genere in camera anecoica o in cella TEM). In termini percentuali ciò significa che la sonda di per sé introduce nella misura un errore relativo pari a circa \pm il 10 %. Tale errore è intrinseco al sistema di misura e costituisce una fonte di imprecisione non eliminabile.

La presenza di numerose cifre decimali sui display delle unità di presentazione di molti degli strumenti commercialmente disponibili è pertanto del tutto fittizia e illusoria.

Più in dettaglio, i principali contributi intrinseci di errore sono i seguenti:

- Risposta in frequenza: circa da ± 0.5 a ± 0.8 dB sino a 300 MHz,
circa da ± 1 a ± 1.5 dB per frequenze superiori.
- Isotropia: circa da ± 0.8 a ± 1 dB per asse.
- Linearità (per CW): circa da ± 0.5 a ± 1 dB.
- Temperatura: circa 0.05 dB/°C.

Peraltro, le caratteristiche normalmente fornite a corredo degli strumenti sono ricavate con segnale monocromatico, mentre nella pratica d'uso questa condizione è raramente verificata. E' quindi sempre da tenere presente un degrado dell'accuratezza per segnali modulati, sia in ampiezza che in frequenza, o impulsivi.

L'incertezza espansa su tutti i contributi può tipicamente essere compresa tra circa ± 1.5 dB ($\pm 15\%$) e ± 3 dB ($\pm 40\%$). Peraltro, molte altre condizioni operative e costruttive possono portare ad errori di misura. Le seguenti sono tra le più rilevanti.

Accoppiamento dei cavi di collegamento al campo

A frequenze inferiori a circa 1 MHz, l'impedenza dei piccoli elementi dipolari delle sonde di campo elettrico aumenta notevolmente, fino a diventare confrontabile con la resistenza dei conduttori usati per il collegamento allo strumento indicatore. Tali conduttori possono allora diventare essi stessi elementi captanti e fornire un segnale al rilevatore o all'unità di lettura, causando una lettura più elevata del valore reale. Questo effetto può essere minimizzato orientando i cavi ortogonalmente al campo elettrico, ma la soluzione migliore (e più adottata) per collegare il sensore all'unità di lettura è la connessione di tipo ottico, utile anche per ridurre

la perturbazione del corpo dell'operatore sulla misura. Sono disponibili sul mercato sensori già dotati di connessione ottica.

Accoppiamento fra sonda e corpi conduttori

Quando si è troppo vicini a superfici metalliche ci può essere accoppiamento diretto, capacitivo o induttivo con gli elementi della sonda, malgrado le loro piccole dimensioni. Tale accoppiamento può provocare letture errate e inattendibili.

Effetto di campi statici o quasi statici

Il movimento delle sonde o dell'unità di lettura all'interno di campi statici o quasi statici può indurre una tensione, che può aumentare o diminuire la lettura dello strumento. Pertanto tali componenti devono essere disposte in modo stabile durante la misura.

Risposte fuori banda delle sonde e fattore di reiezione

Tale effetto costituisce una frequente causa di imprecisione nelle misure. Le sonde sono in generale sensibili anche ai campi di frequenza al di fuori della banda propria di funzionamento; il costruttore garantisce la taratura e l'uniformità all'interno di tale banda ma non l'assenza di risposta al di fuori di essa. Eventuali risposte fuori banda devono essere accuratamente valutate, soprattutto per le misure in ambiente esterno in presenza di sorgenti multiple. Tale effetto è maggiore per le sonde di campo magnetico, che possono a volte risuonare in presenza di campi elettrici di frequenza superiore a quella di funzionamento. Quando si effettuano misure di campo magnetico occorre sempre verificare il fattore di reiezione al campo elettrico della sonda, che può anche fornire il contributo maggiore al valore letto sullo strumento.

Analisi estensive su strumentazione a banda larga per radiofrequenza [6], condotte applicando campi sinusoidali e non, anche a frequenze al di fuori di quelle dichiarate dai costruttori per l'operatività della strumentazione, hanno evidenziato che la semplice curva di taratura con segnale monocromatico relativa al solo intervallo di frequenze di operazione, è del tutto insufficiente a caratterizzare gli strumenti, e può ingenerare nella pratica imprevedibili errori. I costruttori andrebbero incoraggiati a fornire nei data-sheet curve di taratura relative a tutto l'insieme delle frequenze potenzialmente presenti nell'ambiente di misura, anche in relazione a campi non sinusoidali.

5 Misuratori di campo magnetico a frequenze estremamente basse (ELF)

La classe di strumenti più diffusamente adottata per le misure di campi magnetici nell'intervallo delle ELF (Extremely Low Frequency) è costituita da una spira di filo metallico elettricamente isolato, connesso ad un voltmetro. Da un punto di vista generale, la spira è l'elemento sensibile del misuratore mentre il voltmetro è l'elemento rivelatore. Il segnale del rivelatore è poi trasmesso ad un data-logger per una visualizzazione su display o per successive elaborazioni.

Tali strumenti sono in grado di misurare la componente del campo magnetico ortogonale alla superficie della spira. Utilizzando tre spire, non aventi necessariamente lo stesso centro geometrico, si può realizzare un misuratore isotropico, dotato di tre rivelatori. Il principio di funzionamento di un misuratore con una unica spira è stabilito dalla legge di Faraday:

$$V = - d\phi/dt$$

La tensione V alle estremità della spira è uguale al valore negativo della derivata temporale del flusso ϕ del campo magnetico attraverso la spira. Nell'ipotesi di un campo magnetico di forma puramente sinusoidale, ovvero $B = B_0 \cos(\omega t)$, dove ω è pari a $2\pi f$ (f è la frequenza del campo), l'espressione di V diventa più semplice e può essere riscritta nella forma:

$$V = - \omega B_0 A \cos(\omega t)$$

Per ogni altra componente $n\omega t$ della frequenza, indicando con n l'ennesima armonica della frequenza fondamentale del campo, esisterà un termine nell'espressione di cui sopra pesato direttamente col numero d'ordine n dell'armonica. Quindi, quando si misurano campi non sinusoidali, la tensione alle estremità della spira non è direttamente proporzionale al campo totale e il rivelatore deve essere equipaggiato con elementi integratori per poter ricostruire la forma d'onda originale del segnale. Tale processo può essere realizzato o attraverso l'uso di elementi elettronici attivi o passivi, o numericamente se il segnale è digitale.

La maggior parte degli strumenti disponibili utilizza spire sensibili in un intervallo di frequenza che va da pochi Hz fino a qualche kHz. A causa della capacità intrinseca della spira e della sua induttanza, la reale risposta in frequenza del misuratore non è così semplice da analizzare come quella della precedente espressione ma deve essere studiata attentamente in termini di calibrazione all'interno di un campo noto. Le correzioni dovute agli effetti della risposta in frequenza possono essere effettuate per mezzo del rivelatore o attraverso l'elettronica del data-logger. La maggior parte degli strumenti per misure in bassa frequenza è equipaggiata con

rivelatori rms (root mean square), e solo alcuni anche con rivelatori di picco. Tale ultimo tipo di rivelatore (da non confondersi con la funzionalità "max hold" che si riferisce al dato presentato sul display, indipendentemente dal tipo di rivelatore impiegato), è molto utile specialmente nella misura di campi con presenza di transienti.

Il rapido sviluppo dell'elettronica consente che oggi molti strumenti siano forniti di data-logger in grado di applicare filtri in frequenza sia per fornire informazione sul contributo delle fonti specifiche (per esempio 50/60 Hz e le armoniche) al campo totale, che per eliminare il contributo al di sopra o al di sotto di date frequenze. I misuratori di ultima generazione hanno spesso la possibilità di registrare in una memoria EPROM i dati acquisiti durante un periodo relativamente lungo di tempo (fino ad uno o due giorni) e hanno la possibilità di essere connessi al PC per analisi successive dei dati o per elaborazioni statistiche. Questo tipo di misuratori è particolarmente utile per valutazioni di esposizioni mediate a lungo termine, come in studi epidemiologici correlati ad esposizione residenziale. Negli ultimi anni è stata sviluppata una classe di strumenti molto piccoli (della grandezza di un telefono cellulare) chiamati "misuratori personali". Tali misuratori possono essere indossati dal soggetto durante la sua vita residenziale o durante il ciclo occupazionale, permettendo un'accurata registrazione dell'esposizione senza che ci siano interferenze con le comuni attività del soggetto.

Nonostante lo sviluppo dell'elettronica e le peculiarità sempre maggiori nell'elaborazione dei dati, il principio base di funzionamento dei misuratori di campi magnetici sopra descritti è ancora poco raffinato. Ciò genera nelle misure errori che possono essere molto grandi perfino in applicazioni appropriate, solo a causa delle caratteristiche intrinseche dello strumento. L'incertezza tipica delle misure è pari a circa $\pm 15\%$, e tende ad essere più elevata a valori più bassi del campo, sotto circa $1\ \mu\text{T}$. Si può facilmente vedere come la presentazione, sfortunatamente comune a molti misuratori, di due o tre cifre decimali dopo il punto sia completamente ingannevole.

6 Misuratori di campo elettrico a frequenze estremamente basse (ELF)

La classe di strumenti più largamente adottata per misure di campi elettrici nell'intervallo delle ELF (Extremely Low Frequency) è costituita da due elettrodi liberi separati da materiale dielettrico, in sostanza un condensatore, e da un rivelatore che misura la corrente indotta o la carica tra i due elettrodi [5, 6]. Nella disposizione degli elettrodi sono adottate diverse configurazioni. La più comune è quella composta da due emisferi o da due piastre parallele

(circolari o quadrate). Si può fare uso di tre coppie di elettrodi per realizzare un misuratore isotropo.

In qualsiasi configurazione adottata, la carica tra gli elettrodi è proporzionale all'induzione elettrica presente nel materiale dielettrico e la corrente è proporzionale alla derivata temporale del campo elettrico incidente. Quindi, quando si misurano campi elettrici non sinusoidali, la corrente tra gli elettrodi non è direttamente proporzionale al campo totale, ed il rivelatore deve essere equipaggiato con elementi integratori per ricostruire la forma d'onda originale del segnale, proprio come nel caso dei misuratori di campo magnetico.

La maggior parte di misuratori disponibili è sensibile nell'intervallo di frequenza che è compreso tra pochi Hz e qualche kHz. Come per il misuratore di campo magnetico, la reale risposta in frequenza dello strumento deve essere analizzata con attenzione in termini di calibrazione all'interno di un campo magnetico noto.

Per ridurre la perturbazione indotta dall'operatore stesso sul campo misurato, una buona caratteristica dello strumento è l'opportunità di connettere il sensore (elettrodi e rivelatore) al data-logger con fibra ottica, poiché un normale cavo conduttore potrebbe essere influenzato da indesiderati effetti di captazione del campo.

La maggior parte degli strumenti è equipaggiata con data-logger aventi le stesse caratteristiche dei misuratori di campo magnetico, come filtri in frequenza, memorizzazione di dati.

L'incertezza tipica delle misure di campi elettrici nelle ELF è dello stesso ordine di grandezza di quello del caso di misure di campo magnetico (circa $\pm 15\%$), con l'avvertimento supplementare che molti fattori ambientali possono clamorosamente influenzare il risultato.

7 Procedure di misura in banda larga

La prima regola di una buona procedura è quella di avere chiaro il motivo per il quale si compie la misura. Si possono distinguere due metodi fondamentali:

- la misura è indirizzata ad una valutazione di potenziale rischio in termini di induzioni di correnti o interferenza con dispositivi medici;
- la misura è indirizzata ad una valutazione di esposizione mediata a lungo termine a livelli di campo medio-bassi.

Il primo è tipico nelle esposizioni occupazionali, mentre il secondo è comune nelle valutazioni che riguardano il pubblico in generale (o addirittura l'occupazionale), con lo scopo di produrre una base di dati per studi epidemiologici, o per verificare il rispetto delle politiche di precauzione (come la prudent avoidance).

Altro fattore da prendere in considerazione è quello di sapere se siamo interessati o meno ad identificare i contributi di un singolo equipaggiamento o fonte, per esempio per verificare l'efficacia di misure tecniche per ridurre l'esposizione (come per le schermature).

Per misure di campi a radiofrequenza, nella regione di campo lontano può essere sufficiente una sola misura dell'intensità del campo elettrico o di quello magnetico, per risalire poi analiticamente a tutte le grandezze dell'onda elettromagnetica (E, H, ed S).

Nella zona di campo radiato vicino, il campo elettrico ed il campo magnetico sono correlati punto a punto ma con notevoli variazioni spaziali dell'intensità. In questo caso è necessario utilizzare sensori a risoluzione spaziale elevata rispetto alla lunghezza d'onda, mentre in campo lontano possono anche essere usate sensori estesi (paragonabili o grandi rispetto alla lunghezza d'onda). Misure in radiofrequenza e microonde nella regione di campo reattivo non sono praticabili, se non a fini esclusivamente qualitativi e non metrologici

Le misure nella banda ELF, tipicamente quelle effettuate alla frequenza di rete di 50 Hz, sono sempre relative a condizioni di completo disaccoppiamento tra i campi elettrico e magnetico, e quindi in questo caso non è corretto utilizzare il termine "campo elettromagnetico". Tali condizioni sono anche dette "quasi statiche" a causa dell'assenza di propagazione. Le misure in radiofrequenza e microonde effettuate su apparecchiature lavorative sono quasi sempre relative a condizioni di campo vicino radiativo.

La prima fase dell'attività di misura consiste sempre in una ricognizione sul luogo, durante la quale valutare le apparecchiature o impianti interessati. E' buona pratica, specialmente per la valutazione di rischi immediati, effettuare una prima ricognizione esplorativa nelle aree accessibili, al fine di individuare l'andamento di massima dei campi, per poi successivamente raffinare la misura in punti campione nei quali ci si aspetta i livelli più elevati, scelti anche in base ad eventuali considerazioni teoriche. Una volta identificate le sorgenti, è opportuno per ciascuna di esse acquisire le seguenti informazioni preliminari, se disponibili:

- potenza di uscita;
- frequenza del segnale emesso ed eventuali armoniche;
- modulazione;
- natura del segnale, continuo o pulsato;
- polarizzazione.

E' necessario valutare adeguatamente le modalità di esposizione dei lavoratori o del pubblico, in termini spaziali (esposizioni parziali o disomogenee) e temporali. E' circostanza comune, specie nelle esposizioni professionali, riscontrare esposizioni fortemente disomogenee nelle

varie parti del corpo. E' importante quindi riportare alcune precisazioni sul significato dei livelli di riferimento, così come definiti in [1]. Tali livelli sono sempre riferiti ad una media spaziale sul corpo intero del soggetto esposto. Nel caso delle basse frequenze, ad ogni modo, l'attenzione principale dovrà essere posta sull'esposizione nella testa e nel tronco (regione cardiaca), che rappresentano gli organi più critici per l'induzione di correnti. Nel caso delle radiofrequenze e microonde, i livelli di riferimento hanno significato esclusivamente in relazione al SAR medio sul corpo intero; non ne hanno alcuno a protezione da assorbimenti localizzati di energia, per i quali sono comunque poste le opportune restrizioni di base. La protezione dagli assorbimenti locali di energia, almeno nell'intervallo di frequenza tra 10 e 110 MHz e per gli arti inferiori, si concretizza operativamente attraverso la verifica della corrente che fluisce verso terra dai piedi del soggetto esposto. Tale misura è facilmente praticabile mediante strumenti commercialmente disponibili.

Nell'ambito professionale il tempo di esposizione può dipendere sia dalla presenza o assenza dell'operatore che dall'attivazione o meno dell'apparecchiatura sorgente in funzione del ciclo produttivo. Le misure dovrebbero essere effettuate nelle condizioni di massima potenza delle sorgenti, allo scopo di verificare la sicurezza nella peggiore situazione possibile di esposizione anche se, almeno nelle applicazioni lavorative, la normale potenza di funzionamento di un apparato è in genere inferiore alla sua potenza massima. Se la sorgente ha emissione variabile nel tempo, la misura dovrebbe essere effettuata preferibilmente in condizioni di emissione massima. Qualora in ambiente di lavoro siano presenti più apparecchiature sorgente, le misure dovrebbero essere effettuate anche in condizioni di contemporanea attivazione di ognuna di esse, poiché il campo risultante, a causa degli effetti di interferenza, può differire sensibilmente dalla semplice somma dei singoli contributi.

Per quel che riguarda l'effettuazione di misure in ambiente urbano o metropolitano, anch'esso significativo per talune categorie professionali, sussistono numerosi aspetti di problematicità. Indipendentemente dalle intrinseche imprecisioni annesse alla strumentazione, la numerosità e varietà di potenziali sorgenti operanti anche in modo temporalmente discontinuo, insieme con la complessità dell'orografia urbana che implica imprevedibili riflessioni e assorbimenti da parte degli edifici e strutture, o irradiazioni secondarie da parte di oggetti metallici, fanno sì che i campi siano in generale notevolmente variabili nel tempo e nello spazio, anche su scale inferiori al metro. Il rilievo puntuale estemporaneo, pur se condotto con il massimo rigore metrologico, può pertanto risultare non significativo ai fini della valutazione dell'esposizione dei soggetti interessati.

In generale, può essere utile effettuare una prima ricognizione in tutte le zone accessibili ai soggetti esposti, allo scopo di comprendere l'andamento di massima delle grandezze di interesse, per poi effettuare delle vere e proprie misure in alcuni punti campione scelti secondo un criterio conservativo, ad esempio di "worst case".

Se si dispone di una sonda anisotropa è necessario misurare il campo separatamente secondo tre direzioni ortogonali dello spazio, e comporre a tavolino la risultante globale, oppure orientare lo strumento nello spazio sino a trovare il massimo valore.

In funzione della variabilità spaziale dei campi, le misure dovrebbero adeguatamente considerare tutte le regioni dello spazio (in orizzontale ed in verticale) accessibili ad ogni parte del corpo dei soggetti potenzialmente esposti.

8 Misure di campi magnetici statici

Le misure di campi magnetici statici rivestono particolare interesse nel contesto di alcune applicazioni industriali (es. produzione dell'alluminio per elettrolisi), e nell'ambito delle installazioni di Risonanza Magnetica. Per le misure dei campi magnetici statici si ricorre a sensori monoassiali che sfruttano l'effetto Hall. Sono disponibili in commercio anche sensori isotropi, i cui tre elementi possono però presentare differenti caratteristiche di accuratezza della misura. A volte, per una misura accurata, è preferibile comporre a tavolino tre misurazioni ortogonali effettuate utilizzando il solo elemento più sensibile.

9 Misure in banda stretta

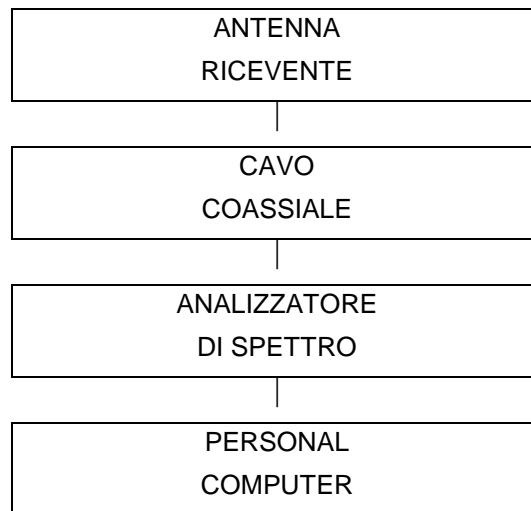
Le misure a banda stretta sono effettuate mediante strumenti che hanno la possibilità di essere sintonizzati su una frequenza o banda selezionata e forniscono eventualmente l'analisi armonica del segnale; appartengono a questa categoria le misure effettuate tramite i ricevitori selettivi e gli analizzatori di spettro.

Informazioni generali sul funzionamento e l'utilizzo degli strumenti a banda stretta sono contenute nella norma CEI [4].

9.1 Caratteristiche degli strumenti in banda stretta

Si ricorre a misure in banda stretta di tipo selettivo, con l'uso di un analizzatore di spettro, quando è necessario identificare i contributi delle singole sorgenti, o quando in generale non si hanno sufficienti informazioni preliminari sulle frequenze in gioco. La rivelazione delle singole componenti spettrali e delle relative ampiezze viene ottenuto per mezzo di una catena di misura costituita di massima secondo il seguente schema:

Schema a blocchi catena in banda stretta



L'elemento sensibile del sistema di misura è costituito da antenne che possono essere classificate in:

- antenne a dipolo accordato o con funzione di guadagno simile, a media direttività;
- antenne a bassa direttività come le biconiche;
- antenne a direttività più elevata.

Le tipiche antenne estese hanno intervalli di operazione in frequenza piuttosto limitati e la scelta della particolare antenna da usare dipende quindi dalla frequenza della sorgente in esame.

L'analizzatore di spettro può essere utilizzato per eseguire scansioni in frequenza allo scopo di individuare le componenti spettrali presenti nel segnale, o come ricevitore sintonizzabile per eseguire indagini sull'andamento temporale del segnale ad una data frequenza (modalità "zero span"). Gli analizzatori sono in grado di misurare segnali con un'ampia dinamica, tipicamente

da -130 dBm a +30 dBm. E' presente in ingresso un attenuatore variabile fino a qualche decina di dB, che permette di limitare il segnale in ingresso al mixer al fine di evitarne il funzionamento in condizioni di saturazione. La massima ampiezza accettata in ingresso (a rischio di seri danni permanenti) varia a seconda del modello di analizzatore ed è sempre chiaramente evidenziata in prossimità del connettore di ingresso.

9.2 Errori di misura

L'analizzatore di spettro rivela una tensione all'ingresso del connettore d'antenna, dal quale poi si risale al campo tramite un coefficiente di taratura che tiene conto del fattore d'antenna in funzione della frequenza. Tale fattore, come tipicamente fornito nei data-sheet, si riferisce a prove presso laboratori accreditati effettuate in condizioni di onda piana e perde quindi significato se nei luoghi oggetto di misura sussistono diverse sorgenti in regione di campo vicino, ognuna con la relativa portante e polarizzazione.

Alcuni analizzatori consentono di introdurre e memorizzare le curve del fattore d'antenna in funzione della frequenza, in modo da presentare direttamente la misura dell'ampiezza della componente spettrale. Tale funzione può anche essere gestita da un PC integrando le varie componenti rilevate, e la procedura può essere automatizzata anche per comporre tre distinte misure sui tre assi cartesiani. Sono già in fase di pubblicizzazione prototipi di strumenti "integrati" di peso e dimensioni contenute e di utilizzo semplificato.

In ogni caso, il campo elettrico per singola componente viene calcolato mediante la formula :

$$E = 10^{(dB\mu + AF + IA + CA)/20} \cdot 10^{-6} \quad [V/m]$$

dove: dB μ è l'ampiezza del segnale letto sull'analizzatore;

AF(dB) è il fattore d'antenna;

IA (dB) è l'eventuale attenuazione esterna all'ingresso dell'analizzatore;

CA (dB) è l'attenuazione del cavo.

L'espansione delle incertezze associate ad ogni singolo fattore della formula, produce una incertezza totale dello stesso ordine di grandezza (al più di poco inferiore) di quella precedentemente considerata per la strumentazione a banda larga.

10 Procedure di misura in banda stretta

I parametri che caratterizzano l'acquisizione dello spettro (Resolution Bandwidth RBW, View Bandwidth VBW, Sweep Time, intervallo di SPAN in frequenza), devono essere impostati in modo tale da risolvere al meglio i vari segnali. Impostazioni improprie dei suddetti parametri possono condurre ad elevati errori di misura. La norma CEI [4] presenta una tabella con dei valori suggeriti per diverse tipologie di sorgente da valutare.

Per effettuare misure affidabili, è opportuno conoscere l'immunità radiata dell'apparato che si utilizza. La maggior parte degli analizzatori di spettro o ricevitori ha una immunità radiata nell'intervallo 80 MHz - 1 GHz di 3 V/m. Qualora la risposta possa essere influenzata dal campo elettromagnetico ambientale lo strumento deve essere posizionato in un'area con livelli di campo compatibili, o all'interno di un furgone schermato.

L'antenna deve essere montata su un supporto non metallico. Nel caso di antenne di dimensioni contenute ($D < 50$ cm), si può posizionare il centro elettrico alla sola altezza da terra di 1.5 m, se la differenza tra le misure effettuate in banda larga alle altezze di 1.1 e 1.9 m non supera il 25%. In caso contrario devono essere esplorate tutte le tre altezze. Nel caso di utilizzo di antenne estese ($D > 50$ cm), quali ad esempio la biconica tradizionale o il dipolo (a frequenze inferiori a circa 300 MHz), si può sempre posizionare il centro elettrico dell'antenna ad un'altezza di 1.5 m, poiché le dimensioni dell'antenna consentono di ottenere un valore rappresentativo della media sulla sezione verticale del corpo umano. La metodologia di misura sarà differente per le diverse tipologie di antenna.

Antenne a dipolo accordato

Devono essere acquisiti tre spettri corrispondenti a tre posizioni mutuamente perpendicolari, con il centro elettrico nella medesima posizione. Lo spettro complessivo risultante è ottenuto sommando quadraticamente i valori di campo elettrico rilevati per ogni frequenza nelle tre posizioni. Tale procedura è naturalmente applicabile solo nel caso di segnali persistenti nel tempo. Sono disponibili sul mercato antenne di dimensioni molto contenute operanti tipicamente nel range 80 MHz – 2 GHz, con supporto orientabile, dall'utilizzo molto pratico.

Antenne a bassa direttività

Vale la stessa metodologia precedente, ma l'accuratezza di misura è generalmente inferiore. Può essere una procedura utile per valutazioni qualitative.

Antenne ad elevata direttività

Se è nota la direzione di provenienza della radiazione (es. antenna radar in vista), si deve acquisire lo spettro orientando l'antenna verso la sorgente, secondo due direzioni di polarizzazione ortogonali alla direzione di provenienza del segnale. Il campo risultante complessivo è ottenuto come somma quadratica dei valori lungo le due direzioni di polarizzazione. Quando la radiazione proviene da più sorgenti secondo direzioni differenti, devono essere effettuate più misure orientando l'antenna verso le diverse sorgenti. Le comuni antenne log-periodiche assicurano una buona uniformità del guadagno in un settore angolare di circa $\pm 15^\circ$ dall'asse dell'antenna.

A costi molto più elevati rispetto alle classiche antenne passive, sono disponibili sensori mono o triassiali con uscita ottica, da connettere a un ricevitore remoto per la trasduzione ottico-elettrica e la connessione all'analizzatore di spettro. Tali sensori consentono una notevole accuratezza nella misura ed eliminano tutti le fonti di imprecisione attribuibili ai cavi.

11 Considerazioni particolari su specifiche tipologie di sorgente

11.1 Campi magnetici a 50 Hz. Produzione e trasporto dell'energia elettrica

In questo caso si è in genere interessati a valutazioni cumulative sul lungo periodo. Da questo punto di vista, il carico generato da un impianto o trasportato da una linea elettrica non è mai costante, ma tende ad oscillazioni più o meno ampie e repentine nel corso delle 24 ore e dell'anno, in funzione del consumo elettrico e del verificarsi di eventi (manutenzione, incidenti, avarie) che determinano il trasferimento di carico elettrico da linee temporaneamente fuori servizio ad altre. Poiché il campo magnetico dipende dalla corrente trasportata, le variazioni di carico si traducono in oscillazioni corrispondenti dei valori del campo stesso. Rilievi istantanei ed estemporanei dei valori del campo magnetico nelle postazioni di lavoro, come anche all'interno delle abitazioni o al di sotto delle linee, risultano del tutto inadeguati alla valutazione dell'esposizione di lungo periodo, se non accompagnati dai corrispondenti dati di carico, e dai dati relativi all'andamento temporale del carico stesso su tempi almeno dell'ordine dell'anno.

Sono molto utili in questi casi i "misuratori individuali" che, indossati dal soggetto, acquisiscono e memorizzano i valori del campo magnetico fino a tempi dell'ordine delle 48 ore, consentendo tutte le successive elaborazioni.

Nelle misure di campi elettrici a 50 Hz la presenza dell'operatore nelle vicinanze del sensore può fortemente alterare la misura. Per questo motivo si utilizza sempre una connessione remota (tipicamente ottica) per leggere il dato ad una distanza di almeno qualche metro. Bisogna infine segnalare la forte influenza sulla misura dovuta a edifici, alberi, o vegetazione e al contenuto di acqua nel suolo.

11.2 Misure di campi magnetici in bassa frequenza a bordo dei materiali rotabili

E' stata recentemente messa a punto una specifica procedura di misura per valutare l'esposizione a campi magnetici in bassa frequenza a bordo dei materiali rotabili [9, 10], in particolare i locomotori. Tale procedura è estendibile a tutte quelle situazioni di esposizione in cui lo spettro di frequenza del campo ambientale varia repentinamente istante per istante, e si basa su una raffinazione del calcolo dell'indice ICNIRP, definito in [1], per esposizioni a campi in multifrequenze.

11.3 Impianti fissi per le telecomunicazioni

Gli impianti fissi per le telecomunicazioni possono anche interessare soggetti professionalmente esposti. Si forniscono pertanto alcune informazioni di base.

11.3.1 Sistemi radiotelevisivi

Le frequenze normalmente utilizzate per il broadcasting radiotelevisivo sono:

- servizio radiofonico:

- | | |
|----------------------------------|-------------------|
| - Onda Lunga (OL): | 155 - 285 kHz; |
| - Onda Media (OM): | 525 - 1605 kHz; |
| - Onda Corta (OC): | 3950 - 26100 kHz; |
| - Modulazione di frequenza (FM): | 87.5 - 108 MHz; |

- servizio televisivo:

- banda I e III: 47 - 230 MHz (VHF);
- banda IV e V: 470 - 862 MHz (UHF).

Nel caso degli impianti radiofonici in Onda Media, Lunga e Corta, le potenze degli apparati variano da qualche centinaio di Watt per i piccoli impianti sino al centinaio di kWatt per gli impianti di rilevanza nazionale.

Per gli impianti FM – TV i ripetitori di carattere locale hanno potenze in genere contenute entro il centinaio di Watt, mentre per gli impianti più grandi le potenze in gioco possono variare da qualche kWatt a centinaia di kWatt, anche in ragione delle concentrazione di più impianti presso lo stesso sito.

11.3.2 Radio AM (OL, OM, OC)

Misure in banda larga

Alle frequenze in gioco, l'impedenza dei conduttori ad alta resistività che tipicamente trasferiscono il segnale dal diodo rivelatore allo strumento o al ripetitore ottico, è paragonabile a quella dei dipoli costituenti gli elementi sensibili, con la possibilità di effetto captazione e presentazione di risultati di campo non veritieri. L'effetto è minimizzato ponendo l'asta del sensore in modo reiettivo rispetto alla polarizzazione dell'onda incidente. Modelli di sensore progettati più recentemente, che utilizzano collegamenti in carbonio o fibra ottica, non presentano questo inconveniente.

11.3.3 Radio FM

Normalmente, la potenza d'uscita dei trasmettitori FM è costante al variare della modulazione. La banda necessaria per una trasmissione stereo è di 256 kHz, ma la condizione di occupazione dello spettro in Italia non è ottimale, e non è raro trovare stazioni che trasmettono con separazione in frequenza anche di soli 100 kHz.

Le misure a banda larga non presentano particolari difficoltà, mentre per misure selettive il ricevitore deve disporre di un filtro IF tale da contenere le bande laterali principali, e di rivelatore di valore efficace. Effettuando la misura con analizzatore di spettro, al fine di distinguere segnali adiacenti che tipicamente possono differire in frequenza non meno di 150 kHz, è necessario utilizzare una risoluzione di banda (RBW) inferiore a 100 kHz.

11.3.4 Stazioni radio base per telefonia mobile

Tali impianti operano in bande di frequenza nell'intorno di 900 MHz e 1800 MHz (2200 MHz per l'UMTS), con potenze limitate a qualche decina di Watt. La massima potenza dell'impianto dipende dal tipo di standard implementato (in ordine di potenza decrescente TACS, GSM, GSM-DCS, UMTS), dal numero di celle dell'impianto e dal numero dei canali attivabili per cella. Nella maggior parte delle tipologie di impianto i livelli emessi istantaneamente sono proporzionali al numero dei canali attivati ed alla distanza dei terminali collegati.

Una caratteristica delle antenne impiegate è un fascio di emissione molto stretto nel piano verticale (pochi gradi), e di circa 30° di apertura nel piano orizzontale.

Informazioni più dettagliate sulle procedure di misura per sistemi di telecomunicazione sono contenute nella norma CEI [4], mentre la norma CEI [11] si riferisce specificamente alle stazioni radio base. E' da notare che il CEI ha molto recentemente pubblicato tre norme armonizzate, EN 50383, EN 50384, EN 50385, rispettivamente norma di base, norma di prodotto per i lavoratori, e norma di prodotto per la popolazione, relative all'immissione sul mercato delle stazioni radio base per la telefonia cellulare.

11.4 Apparecchiature industriali e sanitarie

Apparecchi per riscaldamento a perdite dielettriche

Tali apparecchiature sono in grado di produrre calore direttamente all'interno del materiale trattato, e vengono impiegate nell'industria del legno (incollaggio e piegatura), per la saldatura e stampaggio di manufatti in plastica (PVC) e nell'industria tessile (essiccamento delle fibre). I due strati di materiale da trattare vengono pressati tra due elettrodi a piastra alimentati con la radiofrequenza. Le potenze in gioco variano dal kWatt fino a diverse decine di kWatt, e le frequenze d'uso vanno tipicamente da qualche MHz sino al centinaio di MHz, anche in ragione delle dimensioni degli applicatori e del materiale da trattare.

L'esposizione degli operatori avviene in zona di campo vicino, ma la sola misura del campo elettrico è in genere conservativa dato il principio di funzionamento dell'applicatore, che è in pratica un condensatore a facce piane e parallele in grado di generare intensi campi elettrici al suo interno (decine di kV/m).

Apparecchi per riscaldamento a induzione

Queste apparecchiature sfruttano intensi campi magnetici per produrre calore all'interno di metalli e semiconduttori. Il campo di applicazione è prevalentemente nel trattamento dei materiali metallici (saldatura, indurimento, tempera, fusione, etc.), e nell'industria elettronica. Il materiale da trattare viene posto all'interno di un applicatore a forma di solenoide o a spirale, alimentato con la radiofrequenza, cede energia al materiale attraverso l'induzione nel materiale stesso di elevate correnti da parte del campo magnetico. Le potenze impiegate possono variare tra le centinaia di kW e le migliaia di kW, e la frequenza d'uso può variare da qualche decina di kHz sino a poche decine di MHz.

Come per i riscaldatori a perdite dielettriche, l'esposizione degli operatori avviene in zona di campo vicino, ed è in generale opportuno misurare separatamente i campi elettrico e magnetico, anche se la componente magnetica ha spesso carattere conservativo.

Dispositivi antitaccheggio e sistemi di prossimità

Si rimanda alle procedure contenute nelle due norme CEI specifiche [12] e [13]. La norma CEI [14] si riferisce invece agli apparati di bassa potenza in grado di produrre esposizioni a radiofrequenze e microonde.

Apparati per diatermia

Le apparecchiature di marconiterapia operano con onde continue alla frequenza ISM di 27.12 MHz. Raramente possono trovarsi in uso apparecchiature operanti alla frequenza ISM di 40.68

MHz. Le potenze massime vanno tipicamente dai 300 ai 500 Watt, ma in genere vengono applicate al paziente potenze comprese tra 100 e 200 Watt. Gli applicatori possono essere sia di tipo capacitivo (a doppio elettrodo) che induttivo (a bobina), in funzione della parte del corpo da trattare e del tipo di applicazione. L'entità e la geometria dei campi dispersi dipende criticamente dalla configurazione degli applicatori, oltre che dalla potenza impostata.

Gli apparati di radarterapia lavorano invece alla frequenza ISM di 2.45 GHz. Raramente possono trovarsi in uso apparecchiature operanti alla frequenza ISM di 433.92 MHz. Le potenze massime sono dell'ordine dei 300 Watt, e in genere vengono applicate al paziente potenze comprese tra 50 e 100 Watt. Gli applicatori sono delle antenne di forme e dimensioni variabili, caratterizzate da fasci di radiazione relativamente stretti, di circa 30° di apertura.

Per entrambe le tecniche di diatermia, significative esposizioni indebite possono interessare gli operatori ed il pubblico, generalmente in zona di campo vicino. La componente del campo elettrico si dimostra comunque conservativa nei confronti della valutazione dell'esposizione globale (anche per gli applicatori a bobina), e non sono peraltro disponibili sensori di campo magnetico alla frequenza di 2.45 GHz (radarterapia).

Bibliografia e norme tecniche di riferimento

- [1]. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz). Health Physics 74, N. 4. (1998). www.icnirp.org
- [2]. Raccomandazione del Consiglio dell'Unione Europea del 12/7/99 relativa alla limitazione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz. Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee L199/59 del 30/7/1999.
http://europa.eu.int/comm/health/ph/programmes/pollution/ph_fields_cr_it.pdf
- [3]. Legge 22 febbraio 2001 n. 36. Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. G.U. 7 marzo 2001 n. 55.
- [4]. Norma CEI 211-6. 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. Prima edizione, fascicolo 5908. Gennaio 2001.
- [5]. Norma CEI 211-7. Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz – 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana. Prima edizione, fascicolo 5909. Gennaio 2001.
- [6]. P. Rossi, L. Mancini, V. Brugaletta, R. Falsaperla: "Extensive characterization of wide band RF field meters in frequency and dynamic range". Atti del 5° International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 2002), Volume 2. Sorrento 9-13 settembre 2002.
- [7]. Decreto 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 del 3 novembre 1998, Serie generale n. 257.
- [8]. Ministero dell'Ambiente, Ministero delle Comunicazioni, Ministero della Sanità; Decreto 10 settembre 1998 n° 381 "Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana" – Linee Guida Applicative a cura del Gruppo di Lavoro (Decreto Ministero Ambiente 2 giugno 1997). Roma, luglio 1999.
- [9]. Caratterizzazione del livello di esposizione a campi magnetici a bordo di rotabili ferroviari". Specifica tecnica TI.UTMR.CEM001.0. Trenitalia, Firenze, aprile 2002.
- [10]. D. Bellan, S. Pignari, P. Betti, D. Carillo, A. Gaggelli, M. D'Amore, F. Maradei, M. D'Arco, C. De Capua, M. Grandolfo, A. Mariscotti, P. Pozzobon, P. Rossi: "Measurement and Analysis of Low-Frequency Magnetic Field Emission in Rolling Stock". Atti del 5° International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC 2002), Volume 1. Sorrento 9-13 settembre 2002.
- [11]. Norma CEI 211-10. Guida alla realizzazione di una Stazione Radio Base per rispettare i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici in alta frequenza. Prima edizione, fascicolo 6456. 2002.

[12]. Norma CEI 106-1 (CEI EN 50357). Valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici prodotti dai dispositivi utilizzati nei sistemi elettronici antitaccheggio (EAS), nei sistemi di identificazione a radiofrequenza e in applicazioni similari. Prima edizione, fascicolo 6656 E. Ottobre 2002.

[13]. Norma CEI 106-2 (CEI EN 50364). Limitazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici prodotti dai dispositivi operanti nella gamma di frequenza 0 Hz - 10 GHz, utilizzati nei sistemi elettronici antitaccheggio (EAS), nei sistemi di identificazione a radiofrequenza e in applicazioni similari. Prima edizione, fascicolo 6657 E. Ottobre 2002.

[14]. Norma CEI 106-3 (CEI EN 50371). Esposizione umana ai campi elettromagnetici (10 MHz - 300 GHz) - Norma generica per dimostrare la conformità di apparecchi elettronici ed elettrici di bassa potenza ai limiti di base fissati per la popolazione. Prima edizione, fascicolo 6680. Ottobre 2002.