

*Ing Lucio Attolini*

Finito il 15/08/2009

# **LE ONDE RADIO E LA SALUTE**

**AUTORE:**

Attolini ing. Lucio

1. INTRODUZIONE .....	3
1.1. Nozioni di Fisica .....	3
1.2. Il campo elettrico, il campo magnetico e le onde elettromagnetiche .....	5
2. INTERAZIONE CON I TESSUTI.....	7
3. QUADRO NORMATIVO .....	8
3.1 I lavoratori .....	8
3.2 La popolazione .....	12
4. MISURAZIONI .....	15
5. PROTEZIONE .....	16
5.1 Le schermature .....	16
5.2 La schermatura nel campo lontano. ....	17
5.3 La schermatura nel campo vicino.....	22
6. BIBLIOGRAFIA.....	23

## 1. INTRODUZIONE

L'esposizione umana ai campi elettromagnetici è una problematica relativamente recente che assume notevole interesse con l'introduzione massiccia dei sistemi di telecomunicazione e dei sistemi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica. In realtà anche in assenza di tali sistemi siamo costantemente immersi nei campi elettromagnetici per tutti quei fenomeni naturali riconducibili alla natura elettromagnetica, primo su tutti l'irraggiamento solare. Allo scopo di approfondire il legame tra esposizione a campi elettromagnetici e salute umana sono stati avviati a partire dalla seconda metà degli anni 90 dello scorso secolo sia in Italia che all'estero studi epidemiologici specifici.

Col termine di radiazioni non ionizzanti (NIR, **N**on **I**onizing **R**adiations) ci si riferisce a quelle forme di radiazione elettromagnetica, onde radio, microonde, infrarosso, visibile ed ultravioletto, che interagendo con gli atomi della materia non producono la scissione dell'atomo d'idrogeno in ioni. Tali radiazioni possiedono un'energia minore di 10 eV (che corrisponde alla frequenza di  $2,4 \cdot 10^{15}$  Hz o a  $1,6 \cdot 10^{-18}$  J), che rappresenta, in effetti, la minima energia necessaria per la ionizzazione di un atomo di idrogeno.

### 1.1. Nozioni di Fisica

Ogni antenna emette onde elettromagnetiche nello spazio mediante una forma chiamata "Irraggiamento". L'irraggiamento avviene anche se non vi è presente alcun mezzo di trasporto perché l'energia viene trasportata da pacchetti di onde elettromagnetiche, detti fotoni, esattamente come accade con la luce di una lampadina.

L'energia elettromagnetica emessa da una sorgente, come nel caso di una lampada ad incandescenza, viene irradiata in tutte le direzioni dello spazio, rendendosi così disponibile in ogni punto dello spazio raggiunto. In realtà una sorgente irradia allo stesso modo in tutte le direzioni solo se è puntiforme di dimensione trascurabile rispetto la lunghezza d'onda. Nella maggior parte dei casi reali la sorgente irradia tramite un'antenna che deforma il modo perfetto d'irradiare in tutte le direzioni e lo rende più accentuato in alcune direzioni piuttosto che in altre. L'esempio tipico è quello del lobo di radiazione di un'antenna UDA-YAGI sotto illustrato, Fig.1.

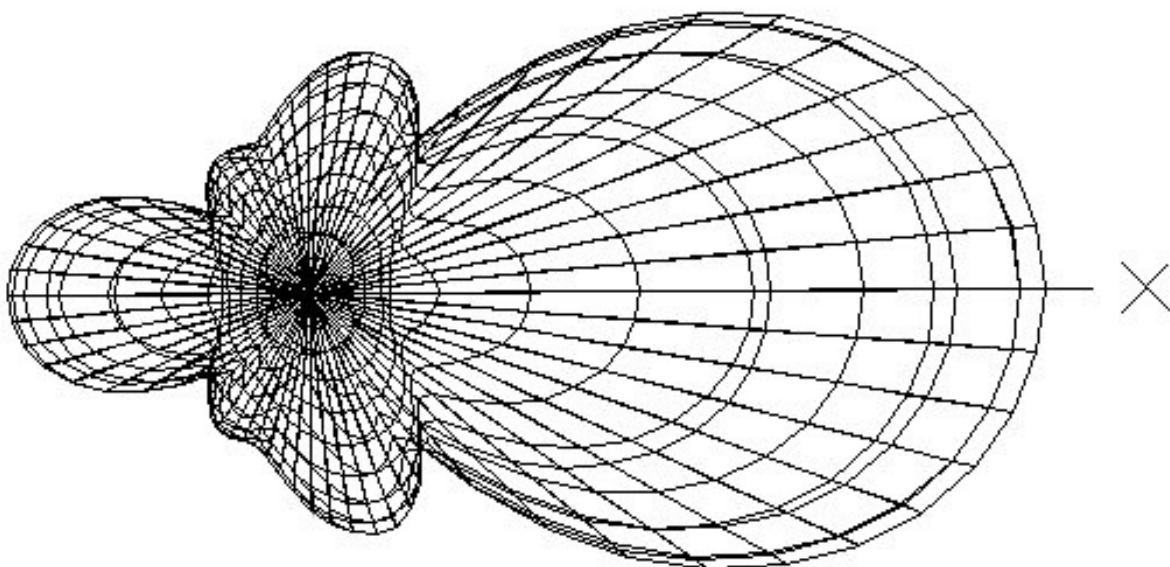


Diagramma di radiazione di un'antenna

Fig.1

La velocità di “crociera” dei fotoni nel vuoto è quella della luce, cioè 300.000 km/sec e la loro traiettoria, in un mezzo omogeneo, è rettilinea. Secondo la teoria ondulatoria di Huygens (1670) approfondita poi da Einstein (1879) l’energia del fotone è proporzionale alla sua frequenza (oscillazione) secondo la famosa legge:

$$E = h \cdot f \tag{1}$$

dove  $E$  è l’energia,  $h$  è la costante di Plank (1858)  $6,63 \cdot 10^{-34}$  [J s] ed  $f$  è la frequenza dell’onda elettromagnetica espressa in Hertz. Da ciò si desume che basta indicare la frequenza del fotone per individuare la sua energia. Spesso però la frequenza risulta essere un valore troppo grande e quindi si usa la lunghezza d’onda  $\lambda$  che altro non è che lo spazio percorso dall’onda elettromagnetica in un tempo pari ad un periodo, alla velocità di “crociera”.

$$\lambda = T \cdot c \tag{2}$$

Dove  $\lambda$  lambda è la lunghezza d’onda in metri,  $T=1/f$  espresso in secondi e  $c$  è la velocità della luce (Fig.2).

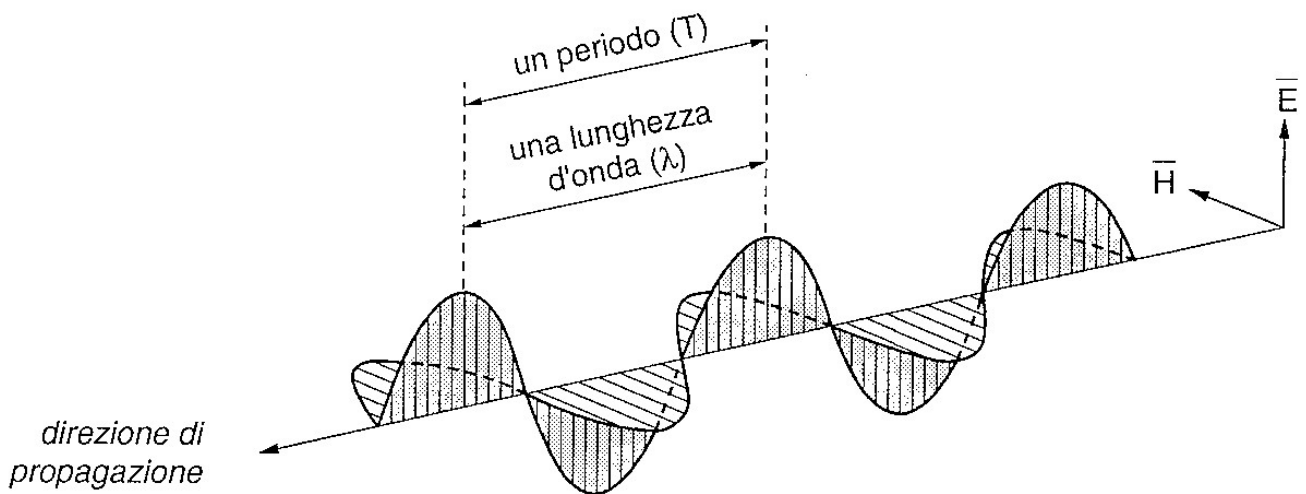


Fig.2

Essendo  $f$  molto grande  $\lambda$  risulta molto piccola così è necessario usare i sottomultipli del metro e cioè:

mm	Millimetri	1/1000 di metro	$10^{-3}$ m	0,001m
$\mu$ m	Micrometri	1/1000 di millimetro	$10^{-6}$ m	0,000001m
nm	Nanometri	1/1000 di micrometro	$10^{-9}$ m	0,000000001m
pm	Picometri	1/1000 di nanometro	$10^{-12}$ m	0,000000000001m

Anche la luce si comporta come le onde elettromagnetiche e si propaga alla velocità  $c$ , detta della luce appunto!

Le lunghezze d’onda tipiche dello spettro visibile dal nostro occhio vanno da 400nm (violetto – energia elevata) a 780nm (rosso – energia più bassa) e si esprimono con colori diversi a seconda della lunghezza d’onda (Fig.3).

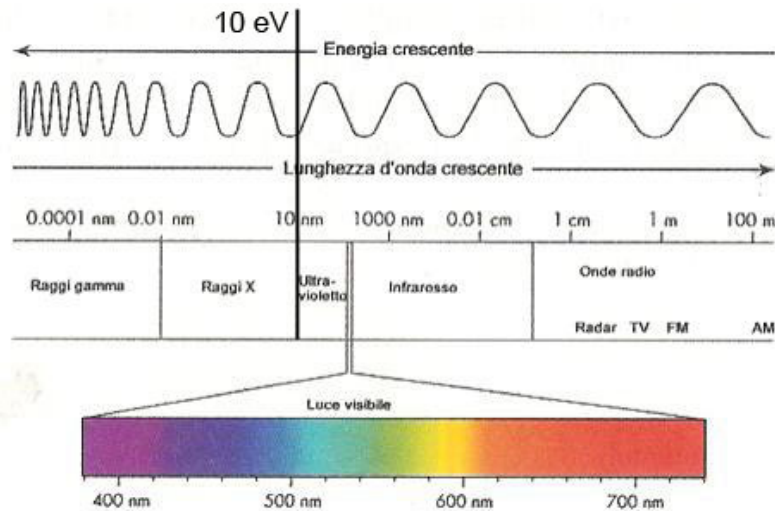


Fig.3

Ad energie più elevate, fra il violetto e le radiazioni ionizzanti vi sono i **raggi ultravioletti UV**.

### 1.2. Il campo elettrico, il campo magnetico e le onde elettromagnetiche

Col nome di campo, in fisica, s'intende una regione dello spazio ove il fenomeno fisico preso in considerazione (in questo caso l'elettrico) ha influenza sulle cose presenti. In altre parole se in una porzione di spazio siderale poniamo una carica elettrica (positiva o negativa che sia) questa eserciterà la sua influenza sulle altre presenti o in transito, in quella regione dello spazio, cioè genera un campo elettrico, così le altre cariche presenti non potranno restare indifferenti ma dovranno tenerne conto mediante regole ferree.

I campi di nostro interesse sono il campo elettrico, il cui vettore si esprime con la lettera **E**, ed il campo magnetico, il cui vettore si esprime con la lettera **H**.

Il **campo elettrico E** si misura in volt al metro [V/m] ed è sostanzialmente legato al numero di cariche elettriche presenti nello spazio considerato e dal mezzo (dielettrico) in cui sono immerse. L'azione del campo elettrico si esercita mediante forze sulle cariche elettriche regolate dalla legge di Coulomb (3)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Dove  $\epsilon$  è la costante dielettrica del mezzo in cui sono immerse le cariche,  $q$  sono le cariche espresse in Coulomb e  $d$  è la distanza in metri che c'è tra le due cariche.

Interessante notare che la forza dipende dal fattore  $\epsilon$  che è tipico dalla sostanza in cui sono immerse le cariche, infatti  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  ove per  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ [F m}^{-1}\text{]}$  s'intende la costante dielettrica del vuoto mentre con  $\epsilon_r$  s'intende la costante dielettrica relativa del materiale isolante (dielettrico) ove sono immerse le cariche.

Una forza esercitata su cariche inamovibili si manifesta mediante una tensione tra di esse, che si misura in volt, mentre se le cariche sono libere di muoversi la forza si tramuta in movimento di carica e quindi in corrente elettrica, misurata in ampère. Quindi alla presenza di un campo elettrico si possono manifestare correnti e/o tensioni elettriche.

Il **campo magnetico H** si misura in ampère al metro [A/m] ed è sostanzialmente legato al movimento di cariche elettriche o di dipoli magnetici naturali (come il pianeta terra o il minerale magnetite) presenti nello spazio considerato. Solitamente il campo magnetico si indica col vettore densità di flusso magnetico (o induzione magnetica) **B** (weber/m<sup>2</sup> o Tesla) a cui è legato secondo la legge (4)

$$H = B \cdot \mu \quad [\text{A/m}] \quad (4)$$

Anche in questo caso la natura del materiale in cui è immerso il campo magnetico è espressa col parametro  $\mu$  permeabilità magnetica. La permeabilità magnetica è composta da  $\mu = \mu_0 \mu_r$  ove per  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ [H m}^{-1}\text{]}$  s'intende la permeabilità magnetica del vuoto mentre con  $\mu_r$  s'intende la permeabilità magnetica relativa del materiale.

In natura si possono trovare situazioni in cui esiste solo il campo elettrico, come nell'elettrostatica o solo il campo magnetico come nel caso del magnetismo terrestre oppure si possono trovare entrambi i campi elettrico e magnetico assieme. Quando il campo elettrico ed il campo magnetico sono tra loro in quadratura ed anche perpendicolari alla direzione del movimento allora li chiameremo **campi elettromagnetici** (Fig.4).

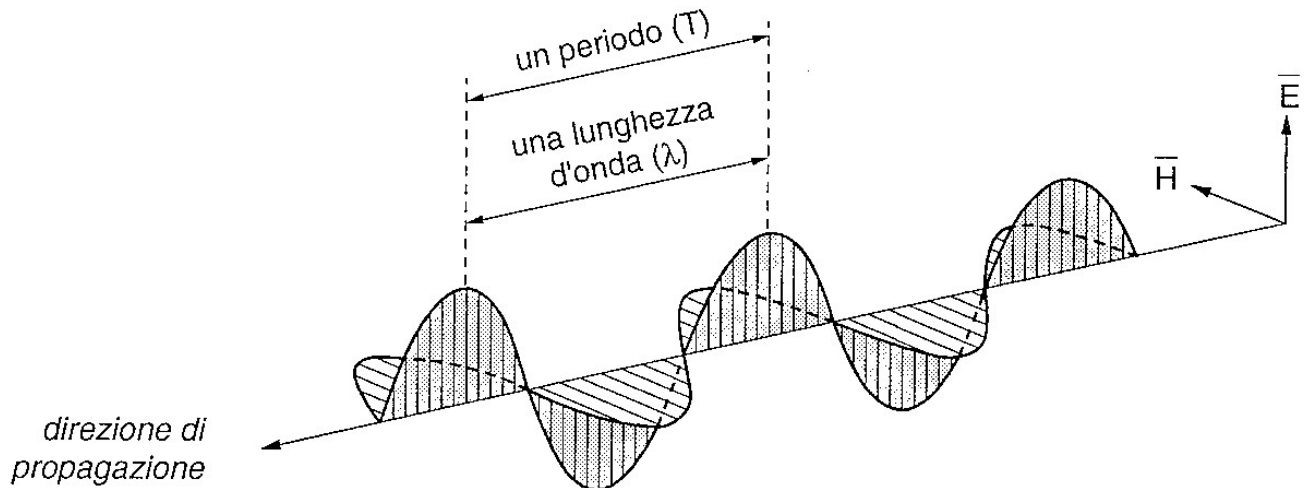


Fig.4

Il comportamento dei campi elettromagnetici è descritto bene dalle equazioni di Maxwell. Inoltre, se i campi elettrico e magnetico sono in grado di soddisfare il teorema di Poynting, cioè:

1. Il campo elettrico e magnetico devono essere in fase tra loro;
2. Il campo  $E$  ed  $H$  devono esistere nello stesso volume spaziale;
3. I due campi devono formare un angolo retto tra loro. Quindi il campo  $H$  deve circondare il campo  $E$ . Ovviamente il campo  $H$  deve essere un cerchio chiuso;
4. I due campi devono avere la stessa curvatura;

Allora l'onda elettromagnetica si propaga nello spazio alla velocità della luce nella direzione perpendicolare ad entrambi i campi ed il loro rapporto è costante.

Nel vuoto tale rapporto è detto impedenza dello spazio libero e vale:

$$\frac{E}{H} = 120\pi = 377 \text{ [Ohm]} \quad (5)$$

Tutto ciò che abbiamo detto sino ad ora vale per lo spazio libero lontano da qualsiasi perturbazione. Poichè non viviamo nello spazio siderale ma sulla terra vediamo cosa cambia rispetto alle condizioni ideali fin qui viste.

Nel mondo reale abbiamo l'aria al posto del vuoto e quindi i valori di  $\epsilon$  e di  $\mu$  sono leggermente diversi rispetto a quelli del vuoto ma sostanzialmente non variano molto perchè i valori relativi sono circa uno. Un'altra cosa che nel mondo reale si discosta dall'ideale è la vicinanza alla sorgente di radiazione elettromagnetica che solitamente non è puntiforme. Tale vicinanza si fa maggiormente sentire quanto più l'antenna è grande rispetto alla lunghezza d'onda propagata. Il passaggio però tra campo vicino e campo lontano non avviene bruscamente ma passa gradualmente da una zona, detta reattiva, ove i fronti d'onda sono molto curvi ed in cui il campo elettrico  $\vec{E}$  e quello magnetico  $\vec{H}$  cambiano il valore del loro rapporto (che è molto maggiore di  $377 \Omega$ ) a seconda della

distanza dalla sorgente, fino ad una distanza di circa  $\lambda/2\pi \div 3\lambda$ . Successivamente si passa in una zona, detta di Fresnel, ove i fronti d'onda sono meno curvi ma non sono piani ed in cui il campo elettrico **E** e quello magnetico **H** cambiano il valore del loro rapporto (che è ancora maggiore di 377  $\Omega$ ) a seconda della distanza rispetto alla sorgente, fino a circa  $2D^2/\lambda$ . Oltre quest'ultimo valore ci si considera nel campo lontano, detto zona di Fraunhofer, ove i fronti d'onda sono piani ed il rapporto tra il campo elettrico **E** e quello magnetico **H** è circa uguale a quello dello spazio libero, 377  $\Omega$ .

Per cui ci si considera nel campo lontano solo quando si è al di sopra del rapporto:

$$\frac{2D^2}{\lambda} \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Ove **D** indica il diametro in metri della sfera che racchiude fisicamente l'intera antenna e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda irradiata, entrambe espresse in metri.

## 2. INTERAZIONE CON I TESSUTI

L'interazione delle radiazioni non ionizzanti con la materia è dovuto essenzialmente alla polarizzazione delle molecole del mezzo ed al loro successivo rilassamento.

Nei tessuti biologici l'intensità **I** dell'onda incidente decresce con la distanza **x** dal punto di generazione dell'onda secondo la relazione esponenziale seguente:

$$I = I_0 e^{-ax} \quad [\text{A}] \quad (7)$$

dove **I<sub>0</sub>** è l'intensità iniziale ed **a** è il coefficiente di assorbimento che dipende dai differenti tessuti incontrati dall'onda lungo il suo percorso.

L'interazione con la radiazione comporta **fenomeni termici** dovuti all'assorbimento dell'onda, che possono portare ad un innalzamento della temperatura dei tessuti, e **fenomeni "non termici"** che portano alla formazione di radicali liberi.

Il campo elettrico dell'onda incidente può ad esempio interagire con la membrana cellulare, alterando il potenziale di membrana e la sua funzione nella conduzione degli impulsi nervosi.

Inoltre, l'esposizione ai campi elettromagnetici variabili nel tempo dà luogo a correnti elettriche all'interno del corpo e all'assorbimento dell'energia nei tessuti; entrambi gli effetti dipendono dai meccanismi di accoppiamento e dalla frequenza in gioco. Il campo elettrico interno e la corrispondente densità di corrente sono legati dalla legge di Ohm

$$J = \sigma E \quad [\text{A/m}^2] \quad (8)$$

Dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica del mezzo, **J** la densità di corrente ed **E** il valore del campo elettrico.

I parametri importanti che incidono sul rischio d'esposizione umana alle radiazioni non ionizzanti sono:

- L'**intensità**, cioè la quantità d'energia emessa nell'unità di tempo che determina la potenza assorbita dai tessuti.
- La **distanza** dalla sorgente in relazione alla conformazione del lobo di radiazione dell'antenna.
- La **frequenza**, determina la penetrazione nei tessuti. I tessuti biologici hanno un elevato contenuto in acqua quindi l'assorbimento delle onde elettromagnetiche (EM) da parte di questa cresce con la frequenza. Il massimo assorbimento si ha nel vicino infrarosso.

- La **coerenza**, aumenta l'efficacia di una radiazione monocromatica (più fotoni possono interagire simultaneamente con una molecola). Ciò costituisce il grande vantaggio e l'estrema pericolosità del laser.

### 3. QUADRO NORMATIVO

Il quadro normativo si articola in Leggi Europee, Leggi Nazionali Leggi Regionali e Norme tecniche che regolamentano i limiti di esposizione, la valutazione del rischio e le modalità di misura dei campi.

Il ginepraio è abbastanza intricato ma vediamo di fare un pò di chiarezza. Iniziamo con alcune definizioni. La legislazione (Legge Quadro n°36 del 22/02/2001 "sull'elettrosmog") distingue tra due tipologie di persone esposte "i lavoratori" e "la popolazione". Anche se non è ben chiaro come collocare un soggetto nell'una o nell'altra categoria. Il buon senso e poi la giurisprudenza hanno portato alle seguenti classificazioni:

Per "**lavoratore**" s'intende il soggetto (o i soggetti) che sono consapevoli di essere esposti alle radiazioni non ionizzanti, sono informati dal datore di lavoro circa il rischio che corrono e sono formati sul modo di ridurlo (con dispositivi di protezione individuali o procedure comportamentali) e sono in grado di controllare la sorgente (o le sorgenti). Tipicamente un "lavoratore" è potenzialmente esposto al rischio per un tempo inferiore alle 24 ore al giorno perchè di solito svolge un turno di lavoro (8 – 10 ore anche non consecutive) al giorno.

Per "**popolazione**" s'intende il soggetto (o i soggetti) che non sono consapevoli (o non sono tenuti ad esserlo) di essere esposti alle radiazioni non ionizzanti ma comunque non sono in grado di controllare la sorgente (o le sorgenti). Tipicamente la "popolazione" è potenzialmente esposta al rischio 24 ore al giorno.

Quindi, il lavoratore è una persona che è in grado governare la sorgente e di poter disporre delle misure protettive nei confronti di se stesso, degli altri lavoratori e della popolazione. La popolazione, invece, sono tutti gli altri che sono potenzialmente esposti ma che non ci possono fare nulla e talvolta neppure sanno di esserlo.

Per fare un esempio possiamo dire: se abbiamo due officine tra loro adiacenti come capannone, una che usa una sorgente a radiofrequenza ed una no. Allora possiamo dire che la prima officina ha dei lavoratori esposti mentre la seconda officina ha anche essa dei lavoratori ma sono assimilabili alla popolazione. Questo può avvenire anche all'interno della stessa azienda.

Se vogliamo estendere le definizioni sopra ai Radioamatori possiamo dire che l'operatore (o gli operatori) che determinano il tipo, la posizione delle antenne e gestiscono (anche in tempi diversi) la manopola della potenza sono considerati "lavoratore" mentre tutti gli altri (famigliari compresi) sono considerati "popolazione".

#### 3.1 I lavoratori

Per i lavoratori la legislazione vigente è abbastanza completa. Infatti la Direttiva Europea 2004/40, recepita dalla stato Italiano (che ha aggiunto solo le sanzioni) con D.Leg. n°257 del 19/11/2007, fissa le prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici).

La suddetta direttiva Europea distingue tra valori limite di esposizione e valori d'azione. I **valori limite di esposizione** sono quei valori che non devono mai essere superati in presenza di lavoratori nemmeno per un attimo.



I **valori d'azione** sono quei valori che se superati in presenza di lavoratori obbligano il datore di lavoro ad intraprendere delle misure preventive per farli rientrare.

Qui di seguito riportiamo un estratto della direttiva 2004/40 che riporta le tabelle con i valori.

Direttiva 2004/40 Omissis.....

### **Valori limite d'esposizione**

Per specificare i valori limite d'esposizione relativi ai campi elettromagnetici, a seconda della frequenza, sono utilizzate le seguenti grandezze fisiche:

- sono definiti valori limite di esposizione per la densità di corrente relativamente ai campi variabili nel tempo fino a 1 Hz, al fine di prevenire effetti sul sistema cardiovascolare e sul sistema nervoso centrale;
- fra 1 Hz e 10 MHz sono definiti valori limite di esposizione per la densità di corrente, in modo da prevenire effetti sulle funzioni del sistema nervoso;
- fra 100 kHz e 10 GHz sono definiti valori limite di esposizione per il SAR (dall'inglese Specific Absorption Rate), in modo da prevenire stress termico sul corpo intero ed eccessivo riscaldamento localizzato dei tessuti.
- Nell'intervallo di frequenza compreso fra 100 kHz e 10 MHz, i valori limite d'esposizione previsti si riferiscono sia alla densità di corrente che al SAR;
- fra 10 GHz e 300 GHz sono definiti valori limite di esposizione per la densità di potenza al fine di prevenire l'eccessivo riscaldamento dei tessuti della superficie del corpo o in prossimità della stessa.

Tabella 1 - **Valori limite d'esposizione** (articolo 3, paragrafo 1). Tutte le condizioni devono essere rispettate.

Intervallo di frequenza	Densità di corrente per capo e tronco J (mA/m <sup>2</sup> ) (rms)	SAR mediato sul corpo intero (W/kg)	SAR localizzato (capo e tronco) (W/kg)	SAR localizzato (arti) (W/kg)	Densità di potenza (W/m <sup>2</sup> )
fino a 1 Hz	40	-	-	-	-
1 - 4 Hz	40/f	-	-	-	-
4 - 1 000 Hz	10	-	-	-	-
1 000 Hz-100 kHz	f/100	-	-	-	-
100 kHz - 10 MHz	f/100	0,4	10	20	-
10 MHz - 10 GHz	-	0,4	10	20	-
10 - 300 GHz	-	-	-	-	50

Note:

1. f è la frequenza in Hertz.
2. I valori limite di esposizione per la densità di corrente si prefiggono di proteggere dagli effetti acuti, risultanti dall'esposizione, sui tessuti del sistema nervoso centrale

nella testa e nel torace. I valori limite di esposizione nell'intervallo di frequenza compreso fra 1 Hz e 10 MHz sono basati sugli effetti nocivi accertati sul sistema nervoso centrale. Tali effetti acuti sono essenzialmente istantanei e non v'è alcuna giustificazione scientifica per modificare i valori limite di esposizione nel caso di esposizioni di breve durata. Tuttavia, poiché i valori limite di esposizione si riferiscono agli effetti nocivi sul sistema nervoso centrale, essi possono permettere densità di corrente più elevate in tessuti corporei diversi dal sistema nervoso centrale a parità di condizioni di esposizione.

3. Data la non omogeneità elettrica del corpo, le densità di corrente dovrebbero essere calcolate come medie su una sezione di  $1 \text{ cm}^2$  perpendicolare alla direzione della corrente.
4. Per le frequenze fino a 100 kHz, i valori di picco della densità di corrente possono essere ottenuti moltiplicando il valore efficace rms per  $2^{1/2}$ .
5. Per le frequenze fino a 100 kHz e per i campi magnetici pulsati, la massima densità di corrente associata agli impulsi può essere calcolata in base ai tempi di salita/discesa e al tasso massimo di variazione dell'induzione magnetica. La densità di corrente indotta può essere confrontata con il corrispondente valore limite di esposizione. Per gli impulsi di durata  $t_p$  la frequenza equivalente per l'applicazione dei limiti di esposizione va calcolata come  $f = 1/(2t_p)$ .
6. Tutti i valori di SAR devono essere ottenuti come media su un qualsiasi periodo di 6 minuti.
7. La massa adottata per mediare il SAR localizzato è pari a ogni 10g di tessuto contiguo. Il SAR massimo ottenuto in tal modo costituisce il valore impiegato per la stima dell'esposizione. Si intende che i suddetti 10g di tessuto devono essere una massa di tessuto contiguo con proprietà elettriche quasi omogenee. Nello specificare una massa contigua di tessuto, si riconosce che tale concetto può essere utilizzato nella dosimetria numerica ma che può presentare difficoltà per le misurazioni fisiche dirette sul corpo umano. Può essere utilizzata una geometria semplice quale una massa cubica di tessuto, purché le grandezze dosimetriche calcolate assumano valori conservativi rispetto alle linee guida in materia di esposizione.
8. Per esposizioni pulsate nella gamma di frequenza compresa fra 0,3 e 10 GHz e per esposizioni localizzate del capo, allo scopo di limitare ed evitare effetti uditivi causati da espansione termoelastica, si raccomanda un ulteriore valore limite di esposizione. Tale limite è rappresentato dall'assorbimento specifico (SA) che non dovrebbe superare 10 mJ/kg calcolato come media su 10g di tessuto.
9. Le densità di potenza sono ottenute come media su una qualsiasi superficie esposta di  $20 \text{ cm}^2$  e su un qualsiasi periodo di  $68/f^{1,05}$  minuti (f in GHz) per compensare la graduale diminuzione della profondità di penetrazione con l'aumento della frequenza. Le massime densità di potenza nello spazio, mediate su una superficie di  $1 \text{ cm}^2$ , non dovrebbero superare 20 volte il valore di  $50 \text{ W/m}^2$ .
10. Per quanto riguarda i campi elettromagnetici pulsati o transitori o in generale per quanto riguarda l'esposizione simultanea a campi di frequenza diversa, è necessario adottare metodi appropriati di valutazione, misurazione e/o calcolo in grado di analizzare le caratteristiche delle forme d'onda e la natura delle interazioni

biologiche, tenendo conto delle norme armonizzate europee elaborate dal CENELEC (Vedi EN 50499).

### **Valori di Azione**

I valori di azione di cui alla tabella 2 sono ottenuti a partire dai valori limite di esposizione secondo le basi razionali utilizzate dalla Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP) nelle sue linee guida sulla limitazione dell'esposizione alle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP 7/99).

Tabella 2 - **Valori di azione** (articolo 3, paragrafo 2) [valori efficaci (rms) imperturbati]

Intervallo di frequenza	Intensità di campo elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Induzione magnetica B (μT)	Densità di potenza di onda piana equivalente $S_{eq}$ (W/m <sup>2</sup> )	Corrente di contatto, IC (mA)	Corrente indotta attraverso gli arti, $I_L$ (mA)
0 - 1Hz	-	$1,63 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	-	1,0	-
1 - 8 Hz	20 000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	-	1,0	-
8 - 25 Hz	20 000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$	-	1,0	-
0,025 - 0,82kHz	500/f	20/f	25/f	-	1,0	-
0,82 - 2,5 kHz	610	24,4	30,7	-	1,0	-
2,5 - 65 kHz	610	24,4	30,7	-	0,4 f	-
65 - 100 kHz	610	1 600/f	2 000/f	-	0,4 f	-
0,1 - 1 MHz	610	1,6/f	2/f	-	40	-
1 - 10 MHz	610/f	1,6/f	2/f	-	40	-
10 - 110 MHz	61	0,16	0,2	10	40	100
110 - 400 MHz	61	0,16	0,2	10	-	-
400 - 2 000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$0,01f^{1/2}$	f/40	-	-
2 - 300 GHz	137	0,36	0,45	50	-	-

Note:

1. f è la frequenza espressa nelle unità indicate nella colonna relativa all'intervallo di frequenza.
2. Per le frequenze comprese fra 100 kHz e 10 GHz,  $S_{eq}$ , E, H, B e  $I_L$  devono essere calcolati come medie su un qualsiasi periodo di 6 minuti.
3. Per le frequenze che superano 10 GHz,  $S_{eq}$ , E, H e B devono essere calcolati come medie su un qualsiasi periodo di  $68/f^{1,05}$  minuti (f in GHz).
4. Per le frequenze fino a 100 kHz, i valori di azione di picco per le intensità di campo possono essere ottenuti moltiplicando il valore efficace rms per  $2^{1/2}$ . Per gli impulsi di durata  $t_p$  la frequenza equivalente da applicare per i valori di azione va calcolata

come  $f = 1/(2t_p)$ . Per le frequenze comprese tra 100 kHz e 10 MHz, i valori di azione di picco per le intensità di campo sono calcolati moltiplicando i pertinenti valori efficaci (rms) per 10, dove  $a = (0,665 \log (f/10) + 0,176)$ ,  $f$  in Hz. Per le frequenze comprese tra 10 MHz e 300 GHz, i valori di azione di picco sono calcolati moltiplicando i valori efficaci (rms) corrispondenti per 32 nel caso delle intensità di campo e per 1000 nel caso della densità di potenza di onda piana equivalente.

5. Per quanto riguarda i campi elettromagnetici pulsati o transitori o in generale l'esposizione simultanea a campi di frequenza diversa, è necessario adottare metodi appropriati di valutazione, misurazione e/o calcolo in grado di analizzare le caratteristiche delle forme d'onda e la natura delle interazioni biologiche, tenendo conto delle norme armonizzate europee elaborate dal CENELEC (Vedi EN 50499).
6. Per i valori di picco di campi elettromagnetici pulsati modulati si propone inoltre che, per le frequenze portanti che superano 10 MHz,  $S_{eq}$  valutato come media sulla durata dell'impulso non superi di 1000 volte i valori di azione per  $S_{eq}$ , o che l'intensità di campo non superi di 32 volte i valori di azione dell'intensità di campo alla frequenza portante.

Omissis.....

Poichè si tratta di lavoratori anche il D.Lgs n° 81 del 09/04/08 (ex 626) al Titolo VIII Capo IV tratta dell'argomento e negli allegati XXXVI lettera A e lettera B riporta (con qualche errore di battitura) le stesse tabelle della direttiva 2004/40 ed aggiunge l'obbligo per il datore di lavoro di mappare il rischio.

### 3.2 La popolazione

Per la popolazione la legislazione è caotica perchè, pur essendoci la legge quadro che è la L. n° 36 del 22/02/2001 col suo Decreto collegato D.P.C.M. del 08/07/2003 che fissa i limiti di esposizione, è stato lasciato ampio spazio alle regioni di modificare i limiti suggeriti dallo Stato. Pertanto c'è un discreto numero di leggi regionali che modificano al ribasso i limiti, in modo più o meno emotivo e senza riferimenti scientifici adeguati. Tali leggi vanno sotto il nome di leggi contro l'"Elettrosmog".

L'unico riferimento serio basato su studi scientifici è la guida ICNIRP [1] a cui faremo riferimento nel seguente testo.

Come accennato in precedenza, il pubblico generico comprende individui di tutte le età e con diverso stato di salute, e può includere gruppi di persone particolarmente sensibili. In molti casi, i membri del pubblico, non sono consapevoli della loro esposizione ai campi elettromagnetici. Inoltre, non ci si può ragionevolmente attendere che i singoli individui della popolazione adottino misure per minimizzare o per evitare l'esposizione perchè non governano la sorgente.

Sono queste le considerazioni alla base dell'adozione di limitazioni più restrittive per l'esposizione del pubblico rispetto a quella dovuta a motivi professionali.

Le restrizioni sull'esposizione sono basate su effetti sanitari accertati e vengono chiamate **restrizioni di base**, equiparabili ai valori limite di esposizione della 2004/40. A seconda della frequenza, le grandezze fisiche usate per specificare le restrizioni di base per l'esposizione a campi elettromagnetici sono: la densità di corrente, il rateo di assorbimento specifico SAR e la densità di potenza.

Per la protezione da effetti nocivi per la salute della popolazione, non si devono superare le restrizioni di base indicate in tabella 3.

Tabella 3. **Restrizioni di base** per campi elettrici e magnetici variabili nel tempo, con frequenze fino a 10 GHz

Caratteristiche dell'esposizione	Intervallo di frequenza	Densità di corrente per la testa ed il tronco (mA/m <sup>2</sup> )(rms)	SAR mediato sul corpo intero (W/kg)	SAR localizzato (testa e tronco)	SAR localizzato (arti)
Esposizione del pubblico	fino a 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz-1 kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/500	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz	-	0,08	2	4

Se i valori sopra sono riferiti ai valori che non devono mai essere superati, quelli espressi in tabella 4, invece, sono assimilabili ai valori di azione che causano azioni coercitive da parte degli organi di vigilanza (ARPA).

I livelli di riferimento di tabella 4 vengono forniti ai fini di un confronto pratico con i valori misurati di determinate grandezze fisiche. Il rispetto dei livelli di riferimento assicura il anche il rispetto delle restrizioni di base in tabella 3.

Se i valori misurati sono superiori ai livelli di riferimento, non necessariamente ne consegue che siano superate le restrizioni di base, ma è necessaria un'analisi più dettagliata per verificare il rispetto di queste ultime.

Tabella 4. **Livelli di riferimento** per l'esposizione del pubblico a campi elettrici e magnetici (valori efficaci imperturbati)

Intervallo di frequenza	Intensità del campo elettrico (V/m)	Intensità del campo magnetico (A/m)	Induzione magnetica (T)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente $S_{eq}^2$ (W/m <sup>2</sup> )
fino a 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	-
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	-
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3-150 kHz	87	5	6,25	-
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1-10 MHz	$87f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

La Legge quadro n° 36 del 22/02/2001 detta inoltre alcuni principi per favorire la regolamentazione della materia. Innanzitutto prescrive che sia indetto un **censimento delle sorgenti** d'inquinamento elettromagnetico nel campo 0 – 300GHZ, senza escludere nessuno, radioamatori compresi. Inoltre, introduce i concetti: di **limite d'esposizione** (corrispondenti ai valori limite di esposizione della direttiva 2004/40) che non possono mai essere superati, di **valore di attenzione** (corrispondente ai valori di azione della direttiva 2004/40) da non superare nei luoghi dove è prevista una permanenza di persone per più

di 4 ore e, per la prima volta, di **obiettivi di qualità** a cui corrispondono valori più restrittivi ai quali obbligatoriamente si deve fare riferimento per il risanamento e per le nuove installazioni.

Successivamente col D.P.C.M. del 08/07/2003 sono stati modificati i valori precedentemente fissati. I nuovi limiti per le sorgenti di radiofrequenza fisse da 100kHz a 300GHz sono i seguenti:

**Tabella 5**

<b>Limite d'esposizione</b>	<b>Intensità di campo elettrico E (V/m)</b>	<b>Intensità di campo Magnetico H (A/m)</b>	<b>Densità di Potenza D (W/m<sup>2</sup>)</b>
0,1 < f ≤ 3 MHz	60	0,2	-
3 < f ≤ 3000 MHz	20	0,05	1
3 < f ≤ 300 GHz	40	0,01	4

**Tabella 6**

<b>Valori di Attenzione</b>	<b>Intensità di campo elettrico E (V/m)</b>	<b>Intensità di campo Magnetico H (A/m)</b>	<b>Densità di Potenza D (W/m<sup>2</sup>)</b>
0,1 MHz < f < 300 GHz	6	0,016	0,10 (3 MHz - 300 GHz)

**Tabella 7**

<b>Obiettivi di Qualità</b>	<b>Intensità di campo elettrico E (V/m)</b>	<b>Intensità di campo Magnetico H (A/m)</b>	<b>Densità di Potenza D (W/m<sup>2</sup>)</b>
0,1 MHz < f < 300 GHz	6	0,016	0,10 (3 MHz - 300 GHz)

Alcune regioni, però, hanno modificato a loro volta alcuni valori rendendoli ancor più restrittivi.

La Regione Lombardia con la Legge Regionale n° 11 dell'11/05/2001 fissa le norme sulla protezione ambientale dall'esposizione a campi elettromagnetici indotti da impianti fissi per le telecomunicazioni e per la radiotelevisione, nella quale per la prima volta si parla di Radioamatore e nell'art. 3 comma 4 viene esplicitamente detto che il titolare della concessione può effettuare le valutazioni di ordine tecnico. Di fatto in Lombardia il Radioamatore può autocertificare la rispondenza alla legislazione vigente (DPCM 08/07/2003). Inoltre chi possiede un impianto con potenza al connettore d'antenna non superiore a 5W non è soggetto alla Legge Regionale e chi non supera i 7W di potenza al connettore d'antenna non è nemmeno tenuto a comunicare il possesso di una stazione ricetrasmittente.

#### 4. MISURAZIONI

Le misurazioni dovrebbero misurare direttamente il SAR (tasso di assorbimento specifico) con misurazioni di tipo dosimetrico ma queste misure sono molto difficili da fare e quindi si preferiscono le misurazioni d'esposizione e poi dedurre il SAR (i limiti consigliati dall'ICNIRP sono  $< 0,4\text{W/kg}$  per i lavoratori e  $< 0,08\text{W/kg}$  per la popolazione).

Le misurazioni di esposizione, invece, sono relativamente semplici perchè sono sostanzialmente delle misure di campo elettrico, di campo magnetico e di densità di potenza.

Tutte le misurazioni devono essere precedute dall'individuazione delle sorgenti (Legge quadro n° 36 del 22/02/2001), dall'analisi del rischio connesso alle persone e dalla caratterizzazione delle stesse (per i lavoratori D.Lgs n° 81 del 09/04/08).

La Norma CENELEC **EN 50499** (in armonia con la direttiva 2004/40) costituisce un valido aiuto alla mappatura del rischio connesso alla presenza delle sorgenti non ionizzanti ed alla loro caratterizzazione. Inoltre la Norma EN 50499 al punto 5, Tabella 1 elenca molti casi comuni sicuramente conformi ai livelli di riferimento per la popolazione, senza dover eseguire la misurazione.

L'annesso G, invece, suddivide le aree lavorative in tre zone a seconda dei valori misurati:

**ZONA 0:** posto di lavoro in accordo con i limiti nazionali imposti per la popolazione;

**ZONA 1:** posto di lavoro che non rispetta i limiti nazionali imposti per la popolazione ma è in accordo con i limiti nazionali imposti per i lavoratori;

**ZONA 2:** posto di lavoro che non rispetta i limiti nazionali imposti per i lavoratori ove occorre eseguire interventi per ridurre le emissioni o restringere l'accesso.

La strumentazione che il mercato ci mette a disposizione è sostanzialmente di due tipi: per misure a banda stretta o per misure a banda larga.

La strumentazione **a banda stretta** è sostanzialmente costituita da un'antenna, un sistema di cavi ed un analizzatore di spettro. I tre componenti del sistema di misura devono avere delle caratteristiche note, tarate, certificate e l'analizzatore di spettro deve avere il rivelatore d'involuppo.

Le antenne da utilizzare per una misurazione a banda stretta sono tipicamente: le biconiche e le log periodiche.

Con tale strumentazione le misurazioni sono di tipo direttivo, sono in grado di misurare il contributo della singola frequenza ma sono lente, complesse e sono soggette al rischio di saturazione dello strumento. In altre parole la misura è abbastanza precisa ma la misurazione è critica.

Tipicamente si usano quando il segnale varia rapidamente in ampiezza, quando si vogliono conoscere i vari contributi delle singole frequenze oppure attorno alle frequenze dove cambia il limite di esposizione. Le tabelle ITU326 aiutano ad impostare correttamente la strumentazione nei vari casi.

La strumentazione **a banda larga** è sostanzialmente costituita da una sonda in grado di misurare l'intensità del campo in un determinato punto dello spazio (misurano solo il modulo del vettore), senza considerare la (o le) frequenze che lo generano, ma sono sensibili all'orientamento. Le sonde sono solitamente collegate ad un millivoltmetro tarato sulla grandezza che si sta misurando.

Per rendere le sonde insensibili all'orientamento si utilizzano sonde isotropiche che sono costituite da tre antenne poste ortogonalmente il cui segnale viene sommato vettorialmente per dare origine ad un unico valore che costituisce il modulo del vettore campo che si sta misurando.

Le sonde che misurano il campo elettrico sono costituite da tre dipoli ortogonali tra loro, quelle che misurano il campo magnetico sono costituite da tre spire ortogonali tra loro e

quelle che misurano entrambi hanno all'interno sia le spire che i dipoli posti ortogonalmente. Solitamente le sonde ottengono il valore di campo raddrizzando con un diodo i segnali captati dalle singole antenne (è il metodo più diffuso) corretto poi via SW per valori di campo molto piccoli. Tali strumenti risultano essere molto precisi, con ottima dinamica ed alta sensibilità ma sono soggetti a saturazione e a rottura del diodo con valori di campo troppo elevato.

L'altro sistema è quello che utilizza una termocoppia (bolometro) che è in grado di generare direttamente una tensione continua. Questi tipi di sonda sono molto precisi ma hanno poca dinamica e sono molto sensibili alle condizioni ambientali.

Una volta individuata (ma soprattutto caratterizzata) la sorgente si sceglie lo strumento più adatto (banda stretta o banda larga) si eseguono le misurazioni, mediate su 6 minuti d'esposizione. Le misure a banda stretta tipicamente sono di emissione dalla sorgente mentre quelle a banda larga, quando relative ad un posto di lavoro, devono interessare almeno 3 punti della persona (gambe, addome/torace e testa).

Le misurazioni devono tenere conto della distanza dalla sorgente, distanza relativa alla lunghezza d'onda considerata (vedi paragrafo 1.1). Infatti nel campo vicino bisogna misurare sia il campo E che il campo H. Nella zona di Fresnel potrebbe bastare la misura del campo E ma è meglio misurare anche il campo H mentre nel campo lontano basta misurare il campo E perchè il campo H si ottiene dalla relazione (5) del paragrafo 1.1.

Per esempio un'antenna di 1m che lavora a 10GHz ( $\lambda = 3\text{cm}$ ) il campo lontano inizia a 66,6m.

$$\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot 1}{0,03} = 66,6 \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Al di sotto di tale distanza è meglio misurare sia il campo elettrico E sia il campo magnetico H, oltre tale distanza il campo elettrico ed il campo magnetico si possono ricavare uno dall'altro mediante la relazione:

$$\frac{E}{H} = 120\pi = 377 \quad [\text{Ohm}] \quad (5)$$

## 5. PROTEZIONE

Le protezioni si devono eventualmente adottare solo dopo aver eseguito le misurazioni ed aver constatato che le misure superano i valori consentiti.

Le protezioni si possono suddividere in comportamentali, attive e passive.

Le **protezioni comportamentali** dipendono dalle procedure adottate nello svolgimento dell'attività di lavoro e consistono principalmente nell'interdire l'area ove i valori sono oltre i limiti consentiti.

Le **protezioni attive** agiscono attivamente sulla sorgente e tra queste la più efficace è quella di ridurre la potenza erogata fino anche allo spegnimento. Altre misure attive sono il riorientamento della sorgente o il suo spostamento in altra sede.

Le **protezioni passive** invece non agiscono nè sulla sorgente nè sul comportamento ma servono per diminuire localmente il campo. Tra le principali misure passive vi sono le schermature.

### 5.1 Le schermature

Le schermature sono costituite principalmente da schermi di materiale conduttore posti in modo da ostacolare la trasmissione dei campi elettrici e magnetici. I principi di funzionamento degli schermi sono principalmente due:

- Riflessione del campo sulle superfici di contatto tra metallo e mezzo circostante;



- Dissipazione dell'energia all'interno del metallo.

Da ciò si desume che le variabili che incidono sull'efficacia della schermatura sono il tipo di materiale, il suo spessore, la distanza dalla sorgente ed il tipo di campo che si vuole schermare (elettrico o magnetico).

Volendo schermare il campo elettrico si può dimostrare che la situazione risulta inalterata sia che ci si trovi nel campo vicino sia che ci si trovi nel campo lontano (onda piana) perchè la schermatura avviene principalmente per riflessione sulle superfici esterne ed interne. La schermatura del campo magnetico invece è sensibile alla vicinanza alla sorgente, infatti il meccanismo predominante è costituito dall'assorbimento che diventa più incisivo mano a mano che ci si allontana dalla sorgente.

## 5.2 La schermatura nel campo lontano.

Nel campo lontano dalla sorgente siamo in condizioni di onda piana, la schermatura avviene per interposizione di una lastra piana di materiale conduttore che tipicamente ha una conducibilità elettrica  $\sigma$ , una costante dielettrica  $\epsilon$  ed una permeabilità magnetica  $\mu$ .

Detto ciò potremo affermare che l'attenuazione che una lastra piana di materiale conduttore presenta nei confronti di un'onda elettromagnetica è data dalla relazione seguente:

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB} \quad (9)$$

Dove **R** rappresenta le perdite per riflessione, **A** quelle per assorbimento ed **M** quelle per riflessione multipla all'interno delle due facce della lastra piana. Le attenuazioni espresse in decibel si sommano. Le perdite per riflessione e quelle per assorbimento sono senza dubbio maggiori rispetto a quelle per riflessione multipla all'interno del materiale e quindi il termine M lo possiamo trascurare. Posto  $\mu = \mu_0 \mu_r$  ove per  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ [H m}^{-1}\text{]}$ ,  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  ove per  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ [F m}^{-1}\text{]}$ ,  $f$  la frequenza di lavoro e  $t$  lo spessore della lastra, potremo dire che:

$$R_{dB} = 168 + 10 \text{Log}_{10} \left( \frac{\sigma}{\mu_r \cdot f} \right) \quad (10)$$

$$A_{dB} = 20 \text{Log}_{10} e^{\frac{t}{\delta}} \approx 131,4 \cdot t \cdot \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma} \quad (11)$$

$\delta$  rappresenta la profondità di penetrazione per effetto pelle ove si raggiunge un'attenuazione pari a circa 1/e, cioè -8,7dB. Per cui avremo:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (12)$$

Dalle formule sopra si vede che entrambi i valori **R** ed **A** dipendono dalla frequenza **f**. Inoltre alle basse frequenze predomina il fenomeno della riflessione mentre alle alte frequenze predomina il fenomeno dell'assorbimento.

Da cui si possono ricavare interessanti considerazioni in merito ai materiali.

Infatti, si può osservare che la perdita per riflessione dipende dal rapporto  $\frac{\sigma}{\mu_r}$  mentre la

perdita per assorbimento dipende dal prodotto  $\sigma \cdot \mu_r$ . Quindi la perdita per riflessione è maggiore per metalli con elevata conduttività e bassa permeabilità magnetica (come l'argento, il rame, l'oro, l'alluminio) mentre la perdita per assorbimento predilige i materiali ad alta permeabilità magnetica (come il supermalloy, il mumetal, il ferro dolce).

Materiale	$\sigma$	$\mu_r$	$\sigma\mu_r$	$\sigma/\mu_r$
Argento	1,05	1	1,05	1,05
Rame	1	1	1	1
Oro	0,7	1	0,7	0,7
Alluminio	0,61	1	0,61	0,61
Ottone	0,26	1	0,26	0,26
Bronzo	0,18	1	0,18	0,18
Stagno	0,15	1	0,15	0,15
Piombo	0,08	1	0,08	0,08
Nichel	0,2	100	20	$2 \times 10^{-3}$
Acc.Inox	0,02	500	10	$4 \times 10^{-5}$
Acc. SAE 1045	0,1	1000	100	$1 \times 10^{-4}$
Mumetal (1 KHz)	0,03	20000	600	$1,5 \times 10^{-6}$
Supermalloy	0,03	100000	3000	$3 \times 10^{-7}$

Anche il modo di permeare lo spazio da parte del campo elettrico e del campo magnetico influisce sull'effetto schermante, infatti il campo elettrico si trasmette principalmente tramite la seconda superficie, cioè la prima superficie della lastra incontra il campo elettromagnetico, nello spessore del materiale il campo elettrico si riflette e dalla seconda faccia (superficie) della lastra esce per proseguire il suo viaggio dopo l'attenuazione. Per cui ciò che riesce a penetrare la prima superficie subisce un'attenuazione dovuta all'assorbimento ma bene o male prosegue. Il campo magnetico invece si trasmette subito dopo la prima interfaccia con la lastra e quindi tolta la quota che si è riflessa il resto attraversa tutto il materiale senza riflessioni interne ed esce dall'altra parte dopo aver subito l'assorbimento (Fig.5).

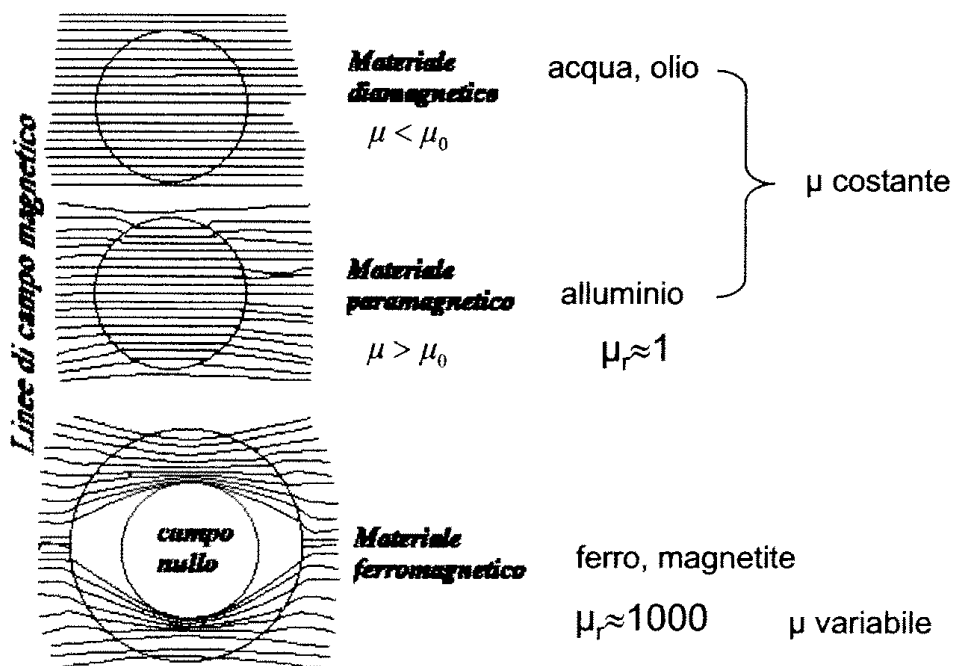


Fig.5

Da ciò si desume che è abbastanza facile schermare il campo elettrico mentre per schermare il campo magnetico occorrono lastre di adeguato spessore. Per la schermatura del campo elettrico risulta importante anche l'egualizzazione del potenziale della lastra piana. A tale proposito è bene tenere presente la figura 6.

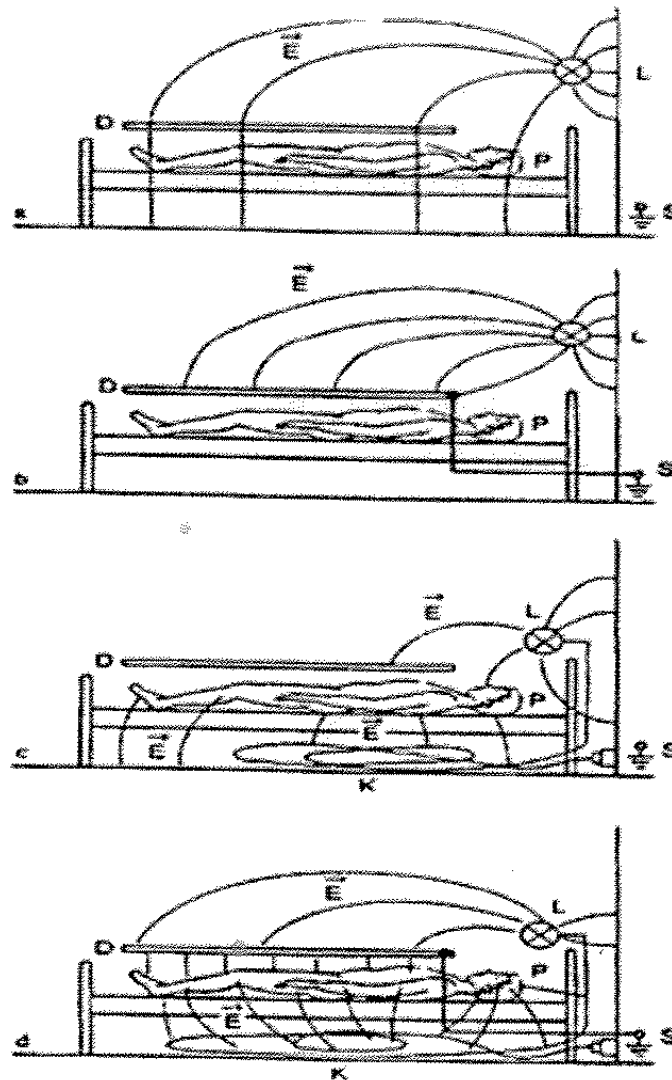


Fig.6

Come si può vedere il caso migliore è il **b** ove la lastra è posta al potenziale di terra. In generale si consiglia di collegare tutte le masse a terra, dividendole fra terra di protezione dai contatti diretti ed indiretti e terra a radiofrequenza. Per quest'ultima occorre fare attenzione affinché la lunghezza dei conduttori sia la più breve possibile per minimizzare l'impedenza del conduttore. La riduzione dell'impedenza si può ottenere anche aumentando la sezione trasversale del conduttore. In particolare, è importante il perimetro esterno di tale conduttore infatti la corrente si addensa nella superficie del conduttore a causa dell'effetto pelle. Quindi il conduttore migliore è costituito da una bandella di rame.

Per illustrare meglio i concetti sopra esposti riportiamo alcuni grafici.

Il campo elettrico risulta comunque di facile schermatura il grafico di fig. 7 evidenzia un'elevata efficacia del mezzo schermante (spessore 0.5mm). Non vale lo stesso meccanismo quando dobbiamo schermare un campo elettromagnetico in cui l'attenuazione è diversa per i campi elettrici e magnetici (campo vicino). La prima parte del

grafico di fig. 7 rappresenta la regione in cui prevale l'attenuazione per riflessione mentre nel secondo prevale l'attenuazione per dissipazione. Nel tratto in cui prevale l'attenuazione per dissipazione lo spessore incide molto sulle capacità schermanti della lastra.

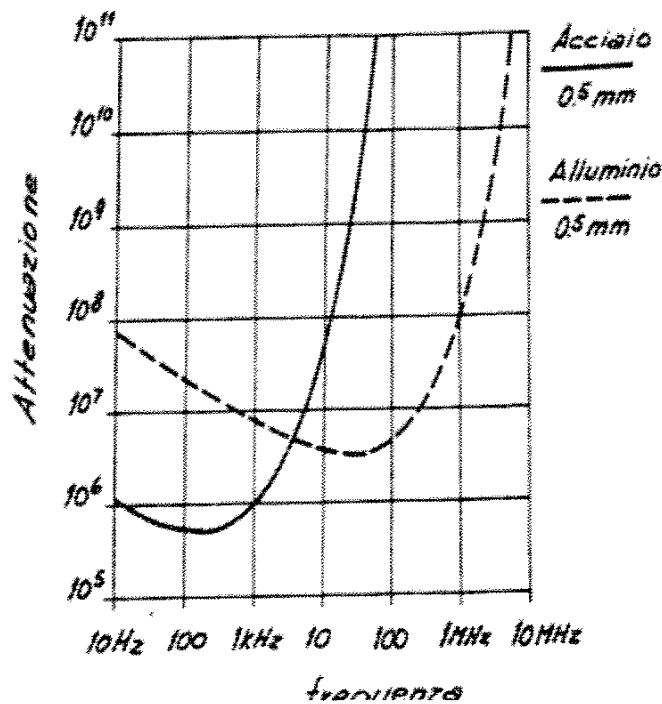


Fig.7

La schermatura del campo magnetico è tanto maggiore quanto maggiore è la sua frequenza (e quanto lo schermo è lontano alla sorgente). Il grafico di Fig. 9 si riferisce ad un campo magnetico con schermatura posta a 10cm di distanza dalla sorgente ed impiegando due diversi materiali, l'acciaio e l'alluminio.

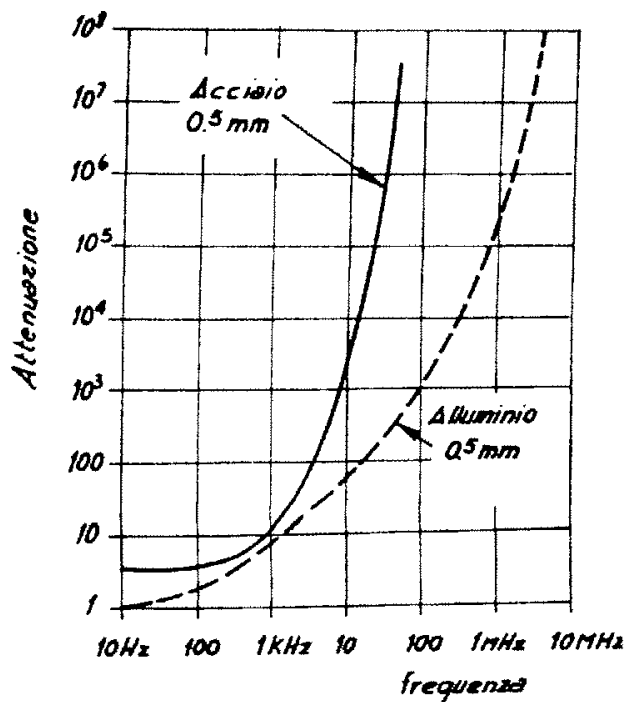


Fig.9

La distanza dalla sorgente di radiazione non ionizzante incide sulla bontà della schermatura. Il grafico di Fig. 10 illustra l'effetto di una lastra piana in alluminio a tre distanze dalla sorgente.

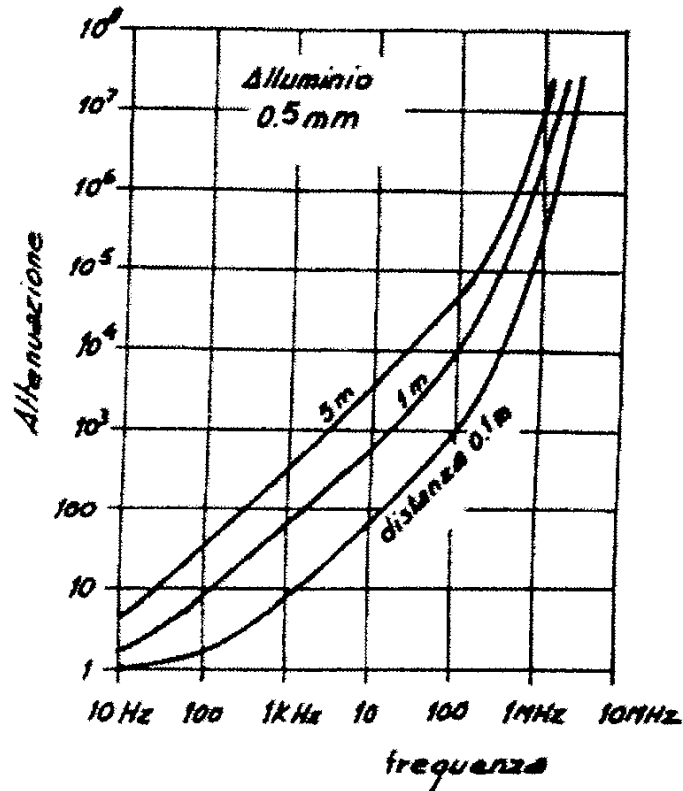


Fig.10

L'efficacia schermante dipende oltre che dal tipo di campo, anche dal tipo di metallo impiegato e dal suo spessore. I migliori risultati si ottengono con materiali ad elevata permeabilità magnetica (ad esempio i materiali ferromagnetici). Il grafico di Fig. 11 rappresenta l'efficienza schermante nel caso di schermo in acciaio.

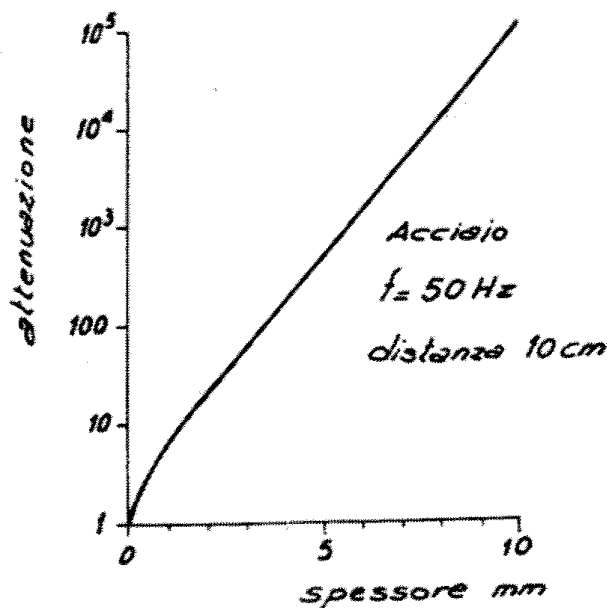


Fig.11

Molto spesso è possibile realizzare una buona schermatura utilizzando una rete metallica a maglie strette al posto di una lastra. Il grafico sottostante (Fig.12) è abbastanza significativo per i diversi valori della maglia.

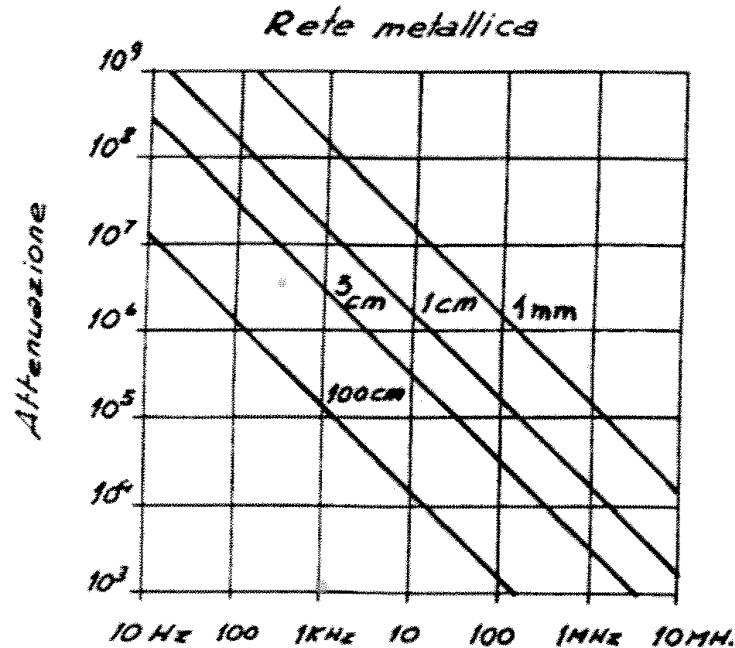


Fig.12

### 5.3 La schermatura nel campo vicino.

Nel campo vicino alla sorgente non siamo in condizioni di onda piana e quindi bisogna valutare sia il campo elettrico che il campo magnetico in modo separato.

Il campo elettrico nel campo vicino si comporta esattamente come nel campo lontano, per cui la perdita per riflessione è dominante alle basse frequenze mentre la perdita per assorbimento è dominante alle alte frequenze.

Il meccanismo che regola la schermatura del campo magnetico nel campo vicino alla sorgente è costituito prevalentemente dall'assorbimento (come per i campi magnetici statici) per cui la tipologia e lo spessore del materiale diventano molto importanti.

I materiali migliori sono quelli ad alto  $\mu_r$  cioè quelli ferromagnetici ma purtroppo sono soggetti al fenomeno della saturazione per cui solitamente si aggira l'ostacolo utilizzando due schermi: il primo rivolto verso la sorgente con bassa permeabilità magnetica  $\mu_r$  ed alta soglia di saturazione (tipicamente il rame o l'alluminio) ed il secondo con alta permeabilità magnetica ma con soglia di saturazione (come il mumetal). Così il primo schermo riflette ed attenua senza saturare ed il secondo schermo fa il resto.

Oltre a quelli menzionati in precedenza, i metodi più comunemente utilizzati per schermare il campo magnetico sono la deviazione del campo da parte di un materiale ad alta permeabilità e la fasciatura delle linee di forza, con una spira in corto circuito. In questo secondo caso il campo incidente genera, nella spira in corto circuito, una corrente indotta che a sua volta genera un campo magnetico, avente direzione opposta a quello che lo genera, che si somma vettorialmente a chi lo ha generato, ottenendo così una forte attenuazione del campo incidente. La figura 13 illustra questi due tipi di schermatura.

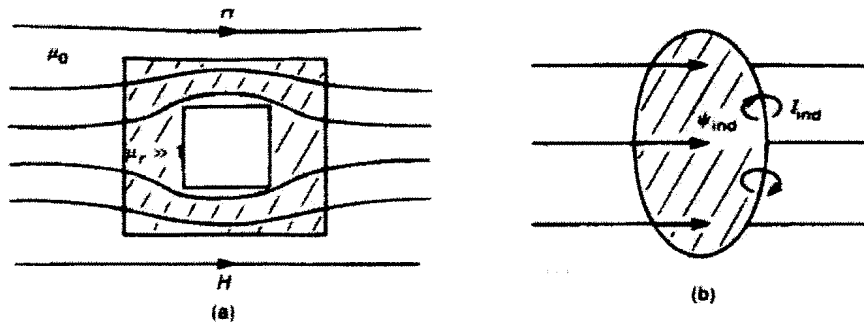


Fig.13

Altri sistemi possono essere usati se la frequenza dell'onda è nota e non cambia. Il più comune è l'utilizzo di un tubo di materiale conduttore lungo  $\lambda/4$ .

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Direttiva CEE/CEEA/CE n° 40 del 29/04/2004 Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, del 29 aprile 2004, sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici), Gazz. Uff. Unione europea n° L159 del 30/04/2004.
2. D.Lgs. Governo n° 81 del 09/04/2008 Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro, Gazz. Uff. Suppl. Ordin. n° 101 del 30/04/2008.
3. Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP) Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics 74: 494-522 (1998).
4. Legge n° 36 del 22/02/2001, Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. Gazzetta Ufficiale Italiana n° 55 del 07/03/2001.
5. Decreto Presidente del Consiglio dei Ministri del 08/07/2003, Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100kHz e 300GHz. Gazzetta Ufficiale Italiana n° 199 del 28/08/2003.
6. Legge Regionale della Regione Lombardia n° 11 dell' 11/05/2001, Norme sulla protezione ambientale dall'esposizione a campi elettromagnetici indotti da impianti fissi per le telecomunicazioni e per la radiotelevisione. Bollettino Ufficiale Regionale Supplemento Ordinario n° 20 del 15/05/2001.
7. European Standard Norme EN 50499 CENELEC December 2008.
8. Atti del corso C.E.I. "Misura e valutazione dei campi elettromagnetici per la caratterizzazione dell'esposizione umana" Moduli A e B. Relatori: Ing. F. Boffelli, Dr. D. Festa. Gennaio 2009