

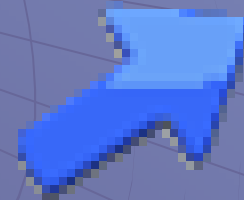
*facoltà di*  
**INGEGNERIA**  
**CORSO di LAUREA in**  
**INGEGNERIA ELETTRONICA**



**RILEVAMENTO DI CAMPI  
ELETTROMAGNETICI**

Coordinatore: prof. Galli Giovanni

Buttò Santina  
Calbo Giovanni  
Di Benedetto Luigi  
Mancuso Antonino  
Rinaldi Giuseppe



# NOZIONI SUI SEGNALE E SUI CAMPI ELETTROMAGNETICI

## Spettro delle frequenze

La frequenza di un segnale periodico indica il numero di volte che il segnale si ripete completamente (periodo) in un secondo. Essa si esprime in Hz (Hertz) e rappresenta l'inverso del periodo del segnale

$$f = 1/T$$

Anche i campi elettromagnetici (CEM) sono caratterizzati da una frequenza che viene scelta in base al tipo di trasmissione da effettuare.

Poiché i CEM si propagano nello spazio libero con una velocità che è pari a quella della luce (la luce è un CEM che si propaga ad una velocità  $c = 300.000 \text{ km/sec}$ ) essi percorrono uno spazio in un certo tempo. Si definisce lunghezza d'onda  $\lambda$  lo spazio che un CEM percorre in un tempo pari al suo periodo. La lunghezza d'onda si esprime in metri.

$$c = \lambda/T \quad T = 1/f$$

$$\lambda = c/f \text{ [m]}$$

Ogni CEM ha una frequenza e quindi una lunghezza d'onda associata.

## Campo elettrico E [V/m]

Un campo elettrico è una regione di spazio dove si manifestano forze sulle cariche elettriche, dando possibilmente origine, se le cariche sono libere di muoversi, a delle correnti elettriche.

Applicando una differenza di potenziale (tensione) “V” tra due punti distanti “d” si ottiene un campo elettrico E pari a:

$$E = V/d \text{ [V/m]}$$

Si può notare come il campo elettrico decresca all'aumentare della distanza e come sia più intenso al crescere della tensione.

## Campo magnetico H [A/m]

Un campo magnetico è una regione di spazio dove si manifestano forze sui dipoli magnetici e sui conduttori percorsi da correnti elettriche. Il campo H è in grado di generare correnti nei materiali conduttori poiché determina in essi un campo elettrico E indotto.

(i tessuti umani sono buoni conduttori)

Facendo circolare una corrente “I” su un conduttore, in un punto distante “d” dal conduttore si ottiene un campo magnetico H pari a:

$$H = I/2\pi d \text{ [A/m]}$$

Si può notare come il campo magnetico decresca all'aumentare della distanza e come sia più intenso al crescere della corrente.

# Induzione magnetica B

Normalmente invece del campo magnetico H si prende in esame la densità di flusso magnetico B (detta anche induzione magnetica).

L'induzione magnetica B è definita come la forza esercitata su una carica che si muove nel campo H. Essa si misura in TESLA [T], un Tesla è equivalente a  $1\text{Vsec/m}^2$  o ad  $1\text{ Weber/m}^2$ .

Il valore di B è legato a quello di H tramite una costante  $\mu$  (permeabilità magnetica del mezzo)

$$B = \mu H$$

Il valore di  $\mu$  dipende dal mezzo in esame e per il vuoto vale  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ [Henry/m]}$

Per esemplificare si può dire che nel vuoto, nell'aria, nel tessuto biologico esistano le seguenti corrispondenze:

1Tesla	$8 \cdot 10^5 \text{ A/m}$
1 mT	800 A/m
1 $\mu\text{T}$	800 mA/m
100 $\mu\text{T}$	80 A/m

## Legami tra E ed H

Quando la frequenza di E ed H è uguale a 0Hz si parla di **campi statici**.

Quando E ed H sono **variabili** la presenza di un campo elettrico determina sempre anche la presenza di un campo magnetico variabile e viceversa (la cosa non vale per i campi statici che possono esistere anche in modo indipendente).

Tale fenomeno si accresce con la frequenza.



## Impedenza del vuoto $\eta$

Nel vuoto (ma anche nell'aria) il valore di E ed H sono legati dalla relazione

$$\eta = E/H = 377\Omega$$

detta impedenza caratteristica del vuoto.

Ciò ci permette di misurare in genere solo E e di calcolare poi H.

## Densità di potenza S

In ogni punto dello spazio ove è presente un CEM esiste una densità di potenza espressa in  $[W/m^2]$  che è data da:

$$S = E \times H$$

Ovviamente ad E ed H occorre associare i valori efficaci [nel caso si utilizzino i valori massimi il valore di S è dato da  $S = (E_M \times H_M)/2$ ].

Vale la relazione  $V_{eff} = 0.707 V_M$

# Polarizzazione

E ed H giacciono sempre su due piani perpendicolari tra di loro. La posizione del piano ove si trova E determina la polarizzazione del CEM.

Si parla di polarizzazione orizzontale se E si trova su un piano orizzontale e di polarizzazione verticale se si trova su un piano verticale.

## Zona di campo vicino

Zona che va dall'antenna trasmittente fino ad una distanza di alcune lunghezze d'onda da essa. Dipende dalla frequenza trasmessa. In questa zona il CEM non ha le caratteristiche dell'onda piana.

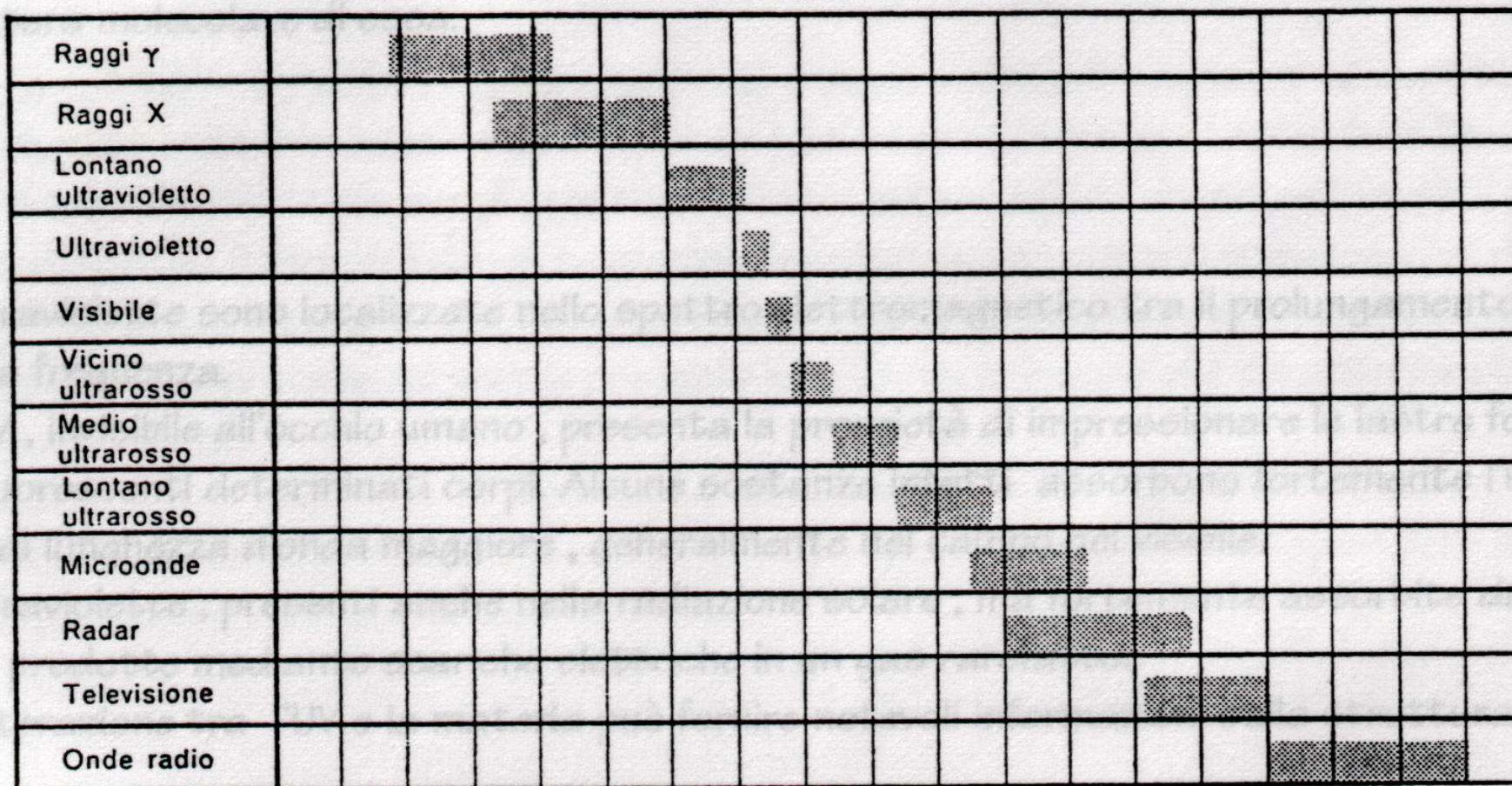
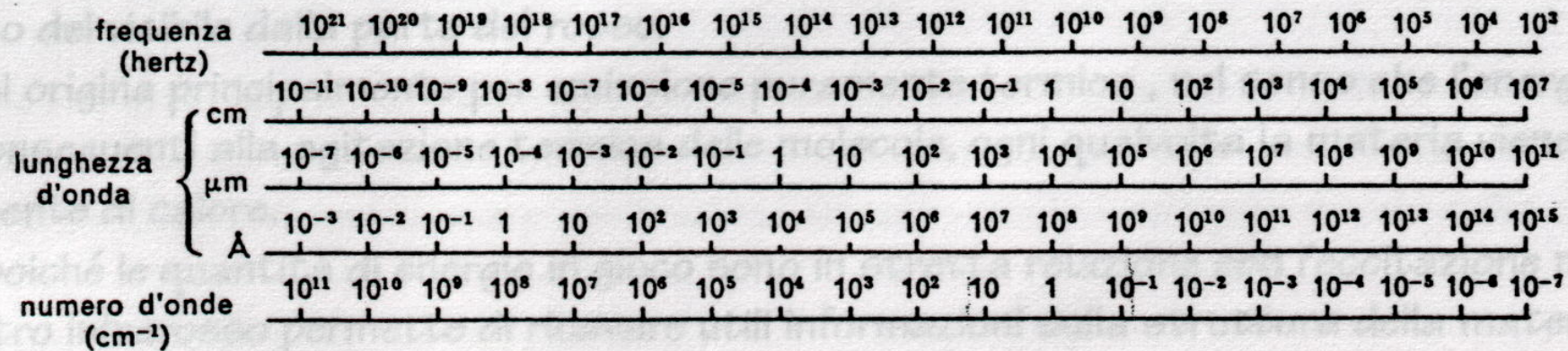
## Zona di campo lontano

Zona che si estende oltre alcune lunghezze d'onda dall'antenna trasmittente. Normalmente le considerazioni e le misure sui CEM sono relative a questa zona.

# Costanti fisiche

Costante fisica	Simbolo	Valore
Velocità della luce	$c$	2,997 108 m/s
Costante dielettrica del vuoto	$\epsilon_0$	8,854 10-12 F/m
Permeabilità magnetica del vuoto	$\mu_0$	12,56 10-7 H/m
Impedenza caratteristica del vuoto	$\eta$	377 $\Omega$





Spettro delle onde elettromagnetiche.



DENOMINAZIONE		SIGLA	FREQUENZA	LUNGHEZZA D'ONDA
FREQUENZE ESTREMAMENTE BASSE		ELF	0 - 3kHz	> 100Km
FREQUENZE BASSISSIME		VLF	3 - 30kHz	100 - 10Km
RADIOFREQUENZE	FREQUENZE BASSE (ONDE LUNGHE)	LF	30 - 300kHz	10 - 1Km
	MEDIE FREQUENZE (ONDE MEDIE)	MF	300kHz - 3MHz	1Km - 100m
	ALTE FREQUENZE	HF	3 - 30MHz	100 - 10m
	FREQUENZE ALTISSIME (ONDE METRICHE)	VHF	30 - 300MHz	10 - 1m
MICROONDE	ONDE DECIMETRICHE	UHF	300MHz - 3GHz	1m - 10cm
	ONDE CENTIMETRICHE	SHF	3 - 30GHz	10 - 1cm
	ONDE MILLIMETRICHE	EHF	30 - 300GHz	1cm - 1mm
INFRAROSSO		IR	0,3 - 385THz	1000 - 0,78μm
LUCE VISIBILE			385 - 750THz	780 - 400nm
ULTRAVIOLETTO		UV	750 - 3000THz	400 - 100nm
RADIAZIONI IONIZZANTI		X	> 3000THz	< 100nm

La lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla frequenza. L'insieme delle frequenze è detto spettro elettromagnetico e va dalla frequenza di 0 Hz, che corrisponde a quella generata da una corrente continua (quella di una normale pila) fino ai raggi gamma prodotti nelle reazioni stellari la cui frequenza è di miliardi di milioni di miliardi di Hertz.

Banda	Frequenza	Sorgente
Corrente continua	0 Hz	Batterie
Corrente alternata	10 - 500 Hz	Linee corrente alternata
Onde lunghe	30 kHz - 300 kHz	Trasmettitori LW
Onde medie	300 kHz - 3 MHz	Trasmettitori OM
Onde corte	3 MHz - 30 MHz	Trasmettitori MW
VHF	30 MHz - 300 MHz	Trasmettitori FM
UHF	300 MHz - 3 GHz	Trasmettitori TV cellulari
Microonde	3 GHz - 300 GHz	Radar - satelliti
Infrarosso	300 GHz - 410 THz	Luce infrarossa
Spettro visibile	410 THz - 750 THz	Sole, illuminazione
Ultravioletti	760 THz - 30000 THz	Sole, luce di sincrotrone
Raggi X	>300000 THz	Tubi per raggi X
Raggi gamma	>3 milioni THz	Acceleratori particelle

Le onde elettromagnetiche a frequenze più elevate (superiori a 10.000 THz, oltre quindi alle radiazioni luminose) vengono dette radiazioni ionizzanti, in quanto sono in grado di modificare la struttura della materia, spostando elettroni dalle loro orbite e quindi ionizzandoli.

# NORMATIVE

Le principali norme CEI che trattano della materia sono:

- ◆ □ CEI 11.4 e 103.2 che trattano delle distanze dalle linee elettriche
- ◆ □ CEI 111.2 (ENV50166-1) Esposizione umana ai CEM di bassa frequenza (0-10kHz) sia per la popolazione che per i lavoratori
- ◆ □ CEI 110.15 e IEC 1000-2-3 Prove di immunità a frequenza di rete



# Breve storia della legislazione

- DPR 164 del 1957 Tratta delle distanze minime dalle linee elettriche per evitare infortuni sul lavoro
- Legge n°339 del 28-6-86 Indica che le distanze di sicurezza per gli elettrodotti devono essere controllate dal Ministero dei Lavori Pubblici
- Legge n°9 del 9-1-91 Riguarda la installazione degli elettrodotti
- DM 16-1-91 Riguarda gli elettrodotti sotto 132kV
- DPCM del 23-4-92 (GU 104 del 6-5-92) Limiti massimi di esposizione ai campi elettromagnetici generati alla frequenza industriale nominale (50Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno
- Legge n°339 DPCM 28-9-95 Questo decreto rinvia al 31-12-2004 le opere di bonifica previste dal DPCM del 1992 e pone rimedio ad alcune incongruenze in esso contenute (indica tra l'altro l'uso del valore efficace per la misure)
- Decreto n°381 del 10-09-98
- Legge Quadro 2001
- DPCM del 08-07-2003

# Nota sul Decreto n°381 del 10-9-98

Tale decreto si applica solo alla popolazione e NON ai lavoratori esposti per ragioni professionali

Esso fissa tre tipi di livelli:

- **Limiti di esposizione** valori del CEM che non devono essere superati in alcuna condizione di esposizione
- **Livelli di attenzione** valori del CEM che non devono essere superati negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate
- **Obiettivi di qualità** valori del CEM da conseguire nel medio e lungo periodo con opere di risanamento

Il decreto fornisce inoltre indicazioni sulle modalità di valutazione dei limiti espositivi dei CEM chiarendo che i valori possono essere misurati o calcolati.

Le misure sono comunque necessarie quando i calcoli fanno prevedere valori di CEM superiori alla metà dei limiti prefissati.

Le misure vanno eseguite secondo le indicazioni contenute nelle norme CEI.

# Campo applicativo

Il decreto chiarisce che il campo di applicazione è compreso tra **100kHz e 300GHz** e che quindi sono regolamentati gli **impianti fissi** per:

- ☐ Telefonia mobile (impianti radio base)
- ☐ Trasmissioni radio e televisive
- ☐ Ponti radio
- ☐ Comunicazioni satellitari
- ☐ Radioamatori

Sono **esclusi gli impianti mobili** come:

- ☐ Telefoni cellulari
- ☐ Apparecchi CB portatili

Sono anche esclusi i Radar.



# Modalità di misura

Devono essere fatte misure della durata di almeno 6 minuti

Si devono fare due serie di misure ad altezza di 1.9m ed 1.1m (corrispondenti a due parti del tronco umano) da terra

Se la differenza tra le due misure è maggiore del 25% del valore più elevato, si deve fare una terza misura a 1.5m da terra

Si farà poi la media delle tre misurazioni (media aritmetica per S e valore quadratico medio per E ed H). (Valore quadratico medio o valore “rms” è la radice quadrata della somma dei quadrati)

# Legge Quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (2001)

La presente legge ha lo scopo di dettare i principi fondamentali diretti a:

- a) assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici ai sensi e nel rispetto dell'articolo 32 della Costituzione;
- b) promuovere la ricerca scientifica per la valutazione degli effetti a lungo termine e attivare misure di cautela da adottare in applicazione del principio di precauzione
- c) assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio e promuovere l'innovazione tecnologica e le azioni di risanamento volte a minimizzare l'intensità e gli effetti dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici secondo le migliori tecnologie disponibili.

La legge ha per oggetto gli impianti, i sistemi e le apparecchiature per usi civili, militari delle forze di polizia, che possano comportare l'esposizione dei lavoratori e della popolazione a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici con frequenze comprese tra 0 Hz e 300 GHz. In particolare, la presente legge si applica agli elettrodotti ed agli impianti radioelettrici, compresi gli impianti per telefonia mobile, i radar e gli impianti per radiodiffusione.

Le disposizioni non si applicano nei casi di esposizione intenzionale per scopi diagnostici o terapeutici.

Ai fini dell'applicazione della legge quadro si assumono le seguenti definizioni:

**a) esposizione:**

è la condizione di una persona soggetta a campi elettrici, magnetici, elettromagnetici, o a correnti di contatto, di origine artificiale;

**b) limite di esposizione:**

è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, considerato come valore di immissione, definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione della popolazione e dei lavoratori

**c) valore di attenzione:**

è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, considerato come valore di immissione, che non deve essere superato negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate. Esso costituisce misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine e deve essere raggiunto nei tempi e nei modi previsti dalla legge;



**d) elettrodotto:**

è l'insieme delle linee elettriche, delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione;

**e) esposizione dei lavoratori e delle lavoratrici:**

è ogni tipo di esposizione dei lavoratori e delle lavoratrici che, per la loro specifica attività lavorativa, sono esposti a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici;

**f) esposizione della popolazione:**

è ogni tipo di esposizione ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici

**g) stazioni e sistemi o impianti radioelettrici:**

sono uno o più trasmettitori, nonché ricevitori, o un insieme di trasmettitori e ricevitori, ivi comprese le apparecchiature accessorie, necessari in una data postazione ad assicurare un servizio di radiodiffusione, radiocomunicazione o radioastronomia;

**h) impianto per telefonia mobile:**

è la stazione radio di terra del servizio di telefonia mobile, destinata al collegamento radio dei terminali mobili con la rete del servizio di telefonia mobile;

**i) impianto fisso per radiodiffusione:**

è la stazione di terra per il servizio di radiodiffusione televisiva o radiofonica.

# NORMATIVA VIGENTE

D.P.C.M. DEL 08-07-2003

50Hz

- campo di applicazione
- limiti di esposizione
- valori di attenzione
- esposizioni multiple
- tecniche di misura

100K-3GHz

# CONFRONTO TRA I LIMITI NAZIONALI E INTERNAZIONALI PER LE FREQUENZE TIPICHE DELLA TELEFONIA MOBILE (900-1.800 MHz).

	Limiti di campo elettrico E (V/m)		Limiti di campo magnetico H (A/m)		Limiti di densità di potenza (W/m <sup>2</sup> )	
	900 MHz	1800 MHz	900 MHz	1800 MHz	900 MHz	1800 MHz
ICNIRP	41.25	58.3	0.11	0.15	4.5	9
CENELEC	41.1	58.1	0.10	0.15	4.5	9
DIN/VDE (Germania)	41.1	58.1	0.10	0.15	4.5	9
ANSI (Usa)	-	-	-	-	6	12
NRPB (Regno Unito)	112.5	194	0.29	0.52	33	100
Italia - Limite di esposizione (sanitario)	20	20	0.05	0.05	1	1
Italia - luoghi con permanenza di 4 o più ore	6	6	0.016	0.016	0.1	0.1



# ENTI E/O ORGANIZZAZIONI

Sigla	Ente
ICRP	Commissione Internazionale Radiazioni Ionizzanti
ICNIRP	Commissione Internazionale Radiazioni Non ionizzanti
OMS	Organismo Mondiale della Sanità
ISS	Istituto Superiore di Sanità
CENELEC	Commissione Europea per la Standardizzazione Elettrica
CEI	Comitato Elettrotecnico Italiano
ISPESL	Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza sul Lavoro
ARPA	Agenzia Regionale Protezione Ambientale
ANSI/IEEE	Ente Americano degli Standard

*La normativa attuale sui CEM è fortemente cautelativa;  
Allora perché il problema dei CEM è così fortemente sentito come  
emergenza ambientale?*

- Questo tipo di inquinamento non può essere percepito a livello sensoriale, per cui è più facile temerlo come "nemico nascosto"*
- I suoi meccanismi di interazione con il corpo umano sono complessi e non ancora del tutto noti*
- Le informazioni sul tema sono vaghe e creano un alone di incertezza sugli effetti*

# EFFETTI BIOLOGICI DEI CEM

Poiché in qualunque sistema biologico (corpo umano compreso) contiene cariche elettriche, appare chiaro che l'esposizione ad un campo esterno può dare luogo in qualche misura ad effetti biologici. In alcune situazioni gli effetti biologici possono trasformarsi in effetti sanitari (danni alla salute).

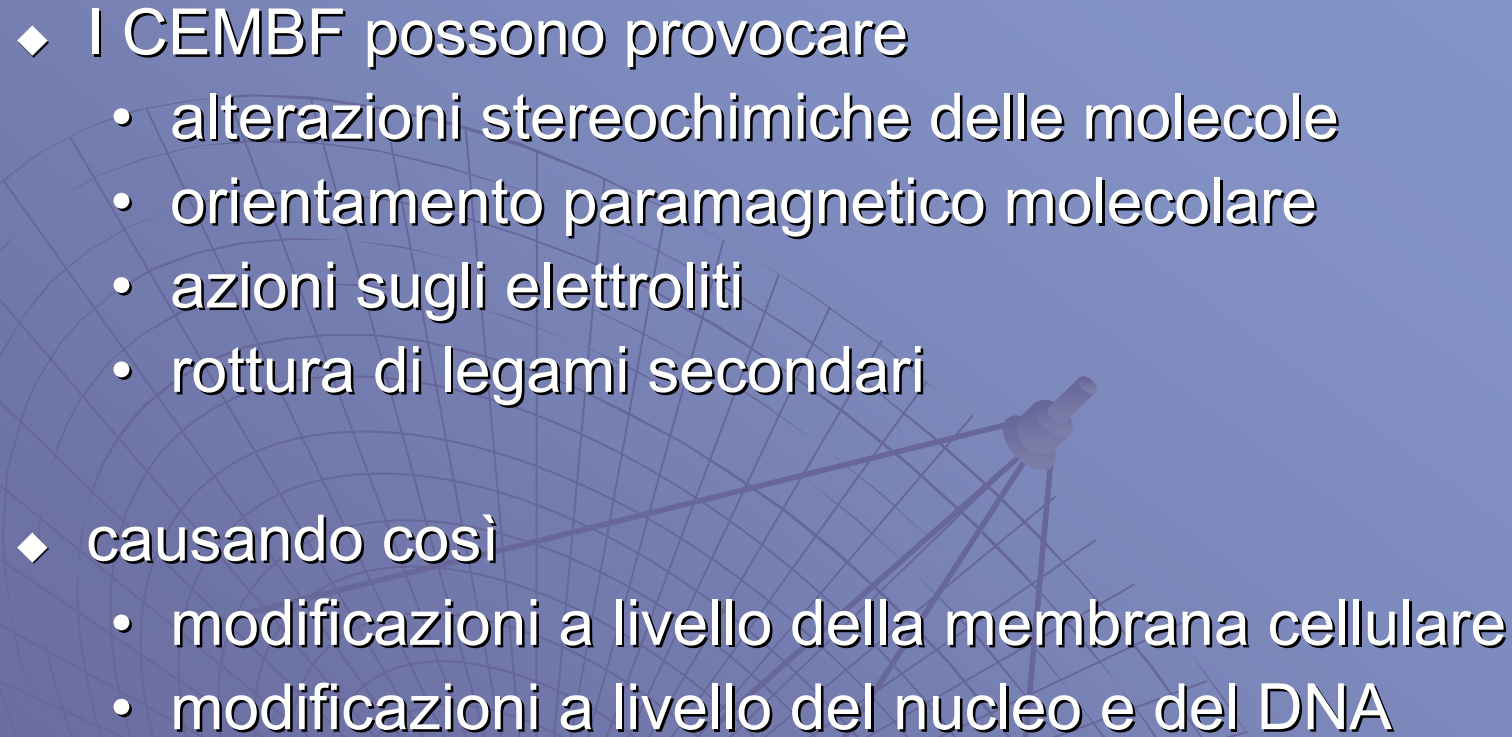
## Definizione di effetto biologico (Organismo Mondiale della Sanità OMS)

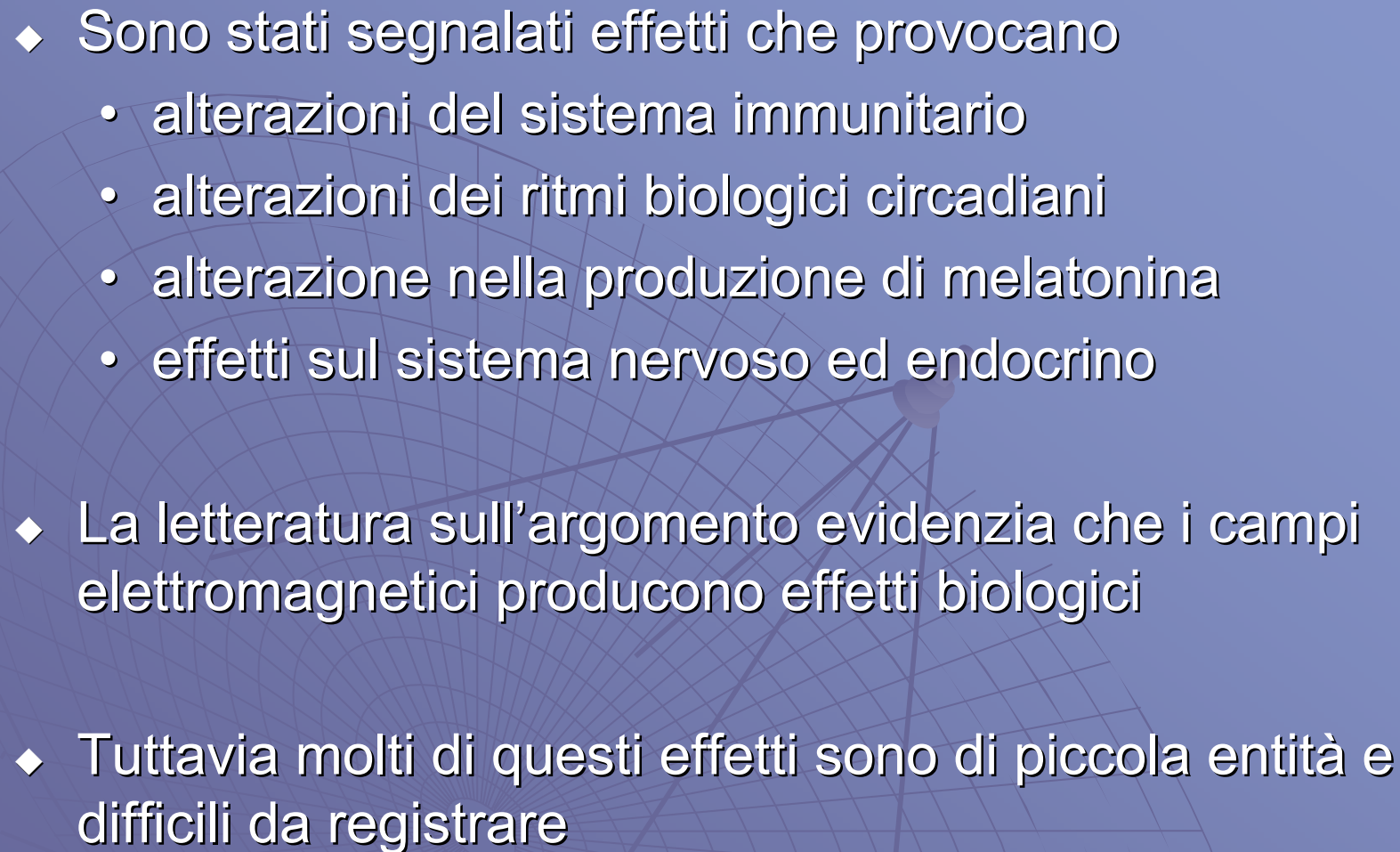
Un effetto biologico si verifica quando l'esposizione alle onde elettromagnetiche provoca qualche variazione fisiologica notevole o rilevabile in un sistema biologico. Un effetto di danno alla salute si verifica quando l'effetto biologico è al di fuori dell'intervallo in cui l'organismo può naturalmente compensarlo e ciò porta a qualche condizione di detrimento della salute. Alcuni effetti biologici possono essere innocui..... altri vantaggiosi..... ed altri ancora conducono a danni per la salute.



## Interazioni delle radiazioni con la materia vivente

- ◆ Le correnti indotte da campi elettrici nei tessuti umani o le vibrazioni molecolari trasformano l'energia elettromagnetica in CALORE
- ◆ Negli animali omeotermi e nell'uomo il sistema di termoregolazione permette di mantenere la temperatura corporea costante
- ◆ Un riscaldamento eccessivo dei tessuti provocherebbe un danno irreversibile alle strutture proteiche e lipidiche
- ◆ L'energia trasferita dai CEMBF è di piccola entità, per cui il calore provocato può essere facilmente controllato dai meccanismi di termoregolazione

- 
- The background of the slide features a faint, light blue graphic. It consists of a large spiral on the left side, resembling a DNA helix or a shell, and a molecular structure on the right side, showing a central atom bonded to several other atoms in a tetrahedral-like arrangement.
- ◆ I CEMBF possono provocare
    - alterazioni stereochimiche delle molecole
    - orientamento paramagnetico molecolare
    - azioni sugli elettroliti
    - rottura di legami secondari
  - ◆ causando così
    - modificazioni a livello della membrana cellulare
    - modificazioni a livello del nucleo e del DNA

- 
- ◆ Sono stati segnalati effetti che provocano
    - alterazioni del sistema immunitario
    - alterazioni dei ritmi biologici circadiani
    - alterazione nella produzione di melatonina
    - effetti sul sistema nervoso ed endocrino
  - ◆ La letteratura sull'argomento evidenzia che i campi elettromagnetici producono effetti biologici
  - ◆ Tuttavia molti di questi effetti sono di piccola entità e difficili da registrare



# Principio ALARA e limiti di sicurezza

## Come si svolge una ricerca e come nasce una norma di sicurezza:

Per individuare i limiti di sicurezza occorrerebbe applicare il cosiddetto principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable) che consiglia di fissare i limiti al più basso livello ragionevolmente ottenibile.

Ciò significa che, se possiamo fare a meno dell'agente di cui ci si deve difendere, allora il limite di sicurezza deve porsi a zero. (es. amianto, che è stato completamente vietato)

Se invece l'agente da cui dobbiamo difenderci ha una insostituibile utilità sociale allora bisognerebbe valutare il costo sociale in funzione dei limiti di sicurezza.

Questa via però non è facilmente percorribile e quindi per i CEM si è utilizzato un approccio un po' diverso dal principio ALARA. Le procedure seguite per individuare i limiti di sicurezza sono le seguenti:

- si sono presi in considerazione gli effetti noti che derivano dalle esposizioni
- si è cercato di individuare le intensità dei CEM al di sotto delle quali non si sono verificati effetti
- si è imposto un margine di sicurezza per tenere conto delle varie incertezze; si è ottenuto così il limite per le persone professionalmente esposte
- si è imposto un ulteriore margine di sicurezza individuando così il limite per la popolazione (imponendo ulteriori margini di sicurezza si ottengono i limiti per le categorie protette come bimbi, malati, anziani)

Il problema è quindi stato spostato nell'individuare le intensità minime dei CEM al di sotto delle quali non si verificano effetti.

# Densità di corrente nel corpo umano ed effetti biologici

da 1 a 10 m A/m<sup>2</sup> ==> di piccola importanza

da 10 a 100 m A/m<sup>2</sup> ==> significativi, possibili effetti sul sistema nervoso

da 100 a 1000 m A/m<sup>2</sup> ==> stimolazione dei tessuti eccitabili

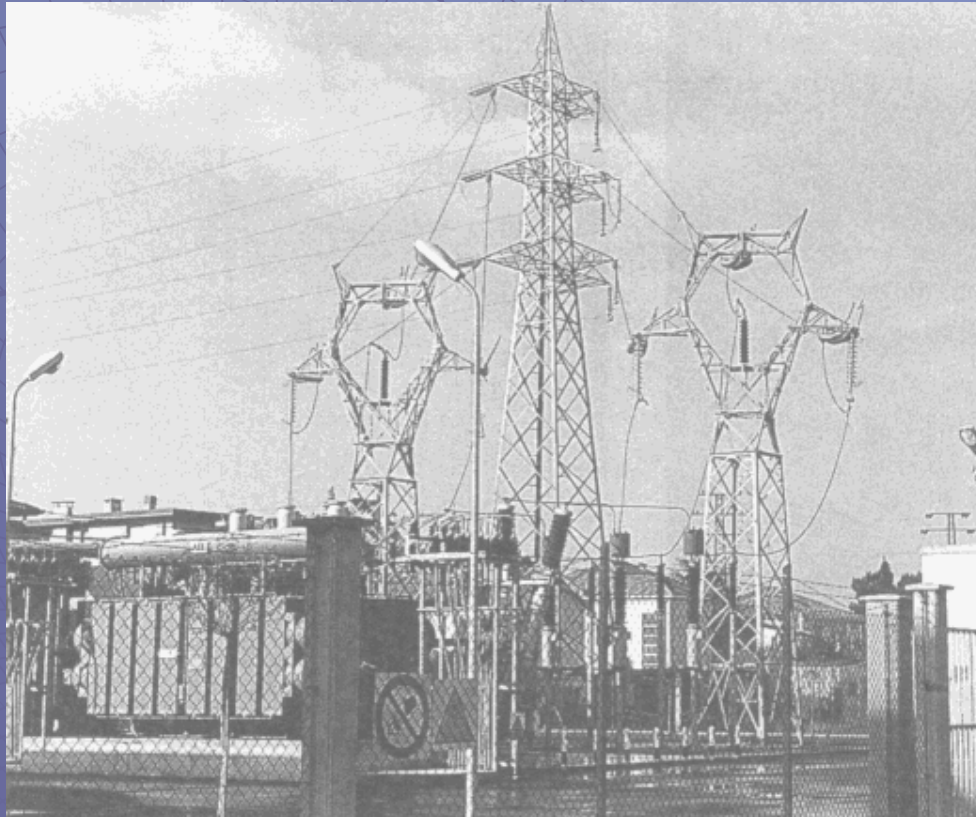
superiori a 1 A/m<sup>2</sup> ==> possibili rischi per la salute.

Gli effetti della densità di corrente sulle masse biologiche del corpo umano, esposto totalmente, sono a frequenze comprese tra 1 e 300 Hz. Ad un 1 KHz la sensibilità del corpo umano decresce, a 10 KHz il valore di soglia per effetti rilevanti sui tessuti eccitabili è 1 A/m<sup>2</sup>. A questa frequenza, applicando un fattore di sicurezza, il limite diventa 0,1 A/m<sup>2</sup>.

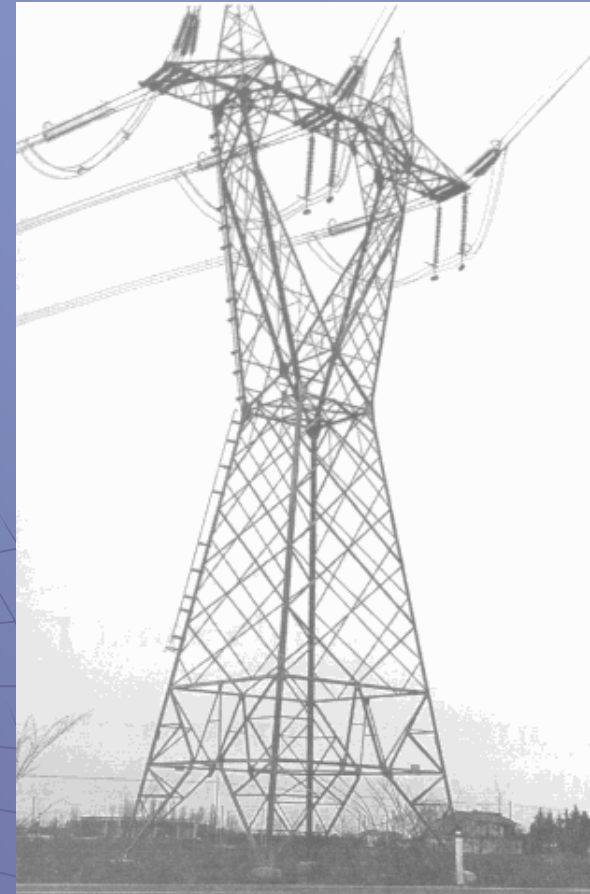
## Tasso di assorbimento specifico

Per frequenze oltre 1 Mhz fino a qualche Ghz la grandezza dosimetrica significativa per definire i limiti di esposizione è il tasso di assorbimento specifico (SAR). Alle basse frequenze, fino ad 1 Mhz, il campo elettrico genera una densità di corrente indotta pari a:  $J = K \cdot f \cdot E$  dove  $f$  è la frequenza mentre,  $K$  è un fattore di forma che tiene conto di dimensioni, forma ed orientamento del corpo. Considerazioni dello stesso tipo sono state fatte per il campo magnetico, mentre la densità di potenza è ottenuta come prodotto del campo elettrico e magnetico.

# TIPOLOGIE DI INSTALLAZIONE



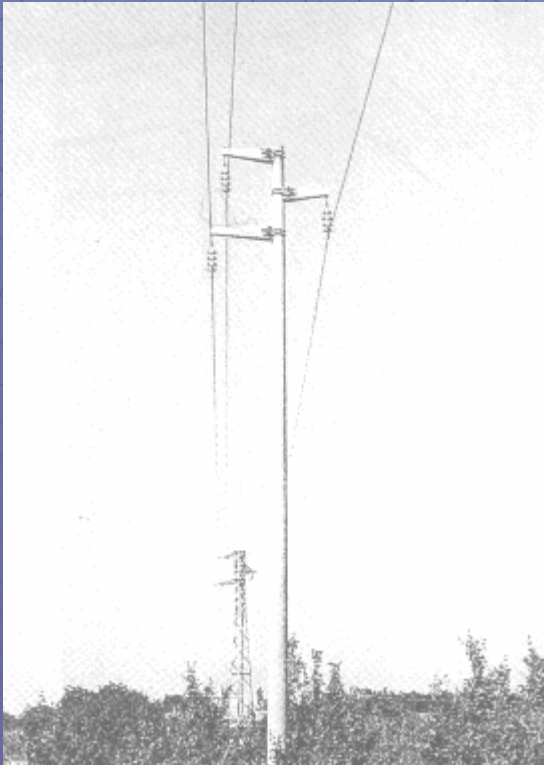
Cabina primaria AT/MT



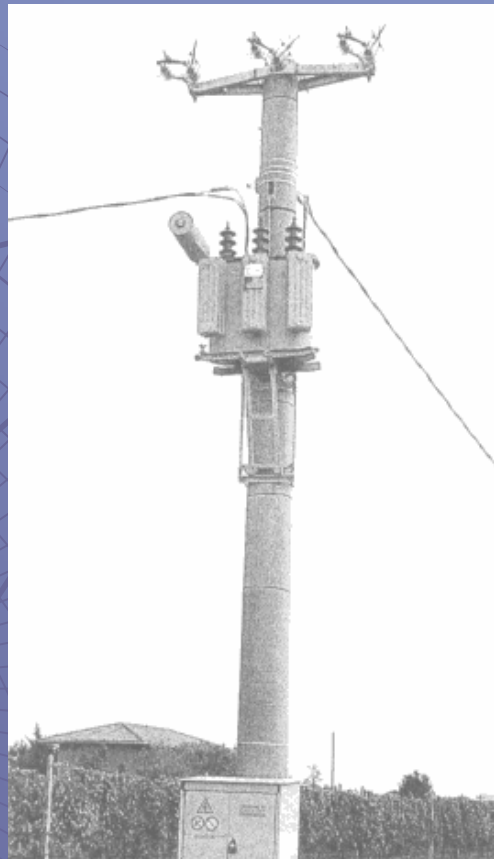
Elettrodotto AT



# TIPOLOGIE DI INSTALLAZIONE



Linea elettrica in media  
tensione



Trasformatore MT/BT a  
palo



Cabina secondaria  
MT/BT

# ELETTRODOTTI

Con il termine elettrodotto si intende "l'insieme delle linee elettriche, delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione" (Legge Quadro, n. 36/2001). Gli elettrodotti costituiscono gli elementi fondamentali del sistema elettrico realizzato per il trasporto e la distribuzione dell'energia elettrica dalle centrali di produzione agli apparati utilizzatori, che possono essere i comuni elettrodomestici così come anche gli impianti di grandi complessi industriali. Esiste una grande varietà di tipologie di elettrodotti, differenti per funzione (trasporto, distribuzione, trasformazione della tensione), per tecnica costruttiva (elettrodotti aerei o interrati, a semplice o a doppia terna, etc.), per tensione di esercizio.

Sulla base di quest'ultima è possibile individuare impianti a:

altissima tensione (Aat): 220 , 380 kV;

alta tensione (At): 40 , 150 kV;

media tensione (Mt): 10 , 30 kV;

bassa tensione (Bt): 0,22 , 0,38 kV.

La distribuzione sul territorio degli elettrodotti è diversa a seconda della tensione di esercizio:

il criterio di localizzazione è di definire per le altissime/alte tensioni tracciati che interessano prettamente zone disabitate, mentre per le medie e soprattutto per le basse tensioni le linee elettriche devono necessariamente svilupparsi in zone urbanizzate al fine di poter raggiungere gli utilizzatori domestici.

Gli elettrodotti generano nell' ambiente campi elettrici e magnetici variabili nel tempo con una frequenza pari a 50 Hz, detta anche frequenza industriale, e costituiscono la principale sorgente esterna di campi a frequenze estremamente basse (Elf).

L' intensità del campo elettrico generato da un elettrodotto aumenta al crescere della tensione di esercizio. Questa ultima è costante nel tempo e tale sarà anche il campo elettrico prodotto ad una certa distanza a parità di altre condizioni

L' intensità del campo magnetico dipende dalla corrente che circola nei conduttori, aumentando al crescere della corrente trasportata; tale grandezza è variabile nell'arco della giornata, perché strettamente correlata alla richiesta di energia elettrica da parte degli utenti.

Il campo elettrico e il campo magnetico diminuiscono all' aumentare della distanza dall' elettrodotto e dipendono anche dal numero e dalla disposizione dei conduttori.

## Elettrodotti - Campo elettrico

- ◆ Il campo elettrico generato dagli elettrodotti dipende principalmente dalla tensione della linea
- ◆ Dipende dalla distanza dalla linea e dall'altezza dei conduttori da terra
- ◆ In prossimità delle linee elettriche si misurano i seguenti valori tipici:
  - linee AAT a 380kV  $\Rightarrow$  4500 - 8000 V/m
  - linee AT a 132kV - 150kV  $\Rightarrow$  2000 - 3000 V/m
  - linee MT a 10kV - 30kV  $\Rightarrow$  200 V/m
- ◆ E' schermato dagli edifici



## Elettrodotti - Campo magnetico

- ◆ Dipende principalmente dall'entità delle correnti che circolano nei conduttori
- ◆ Dipende dalla distanza dalla linea, dall'altezza dei conduttori da terra e dall'ordine delle fasi
- ◆ In prossimità delle linee elettriche si misurano i seguenti valori tipici:
  - linee AAT a 380kV  $\Rightarrow$  15 - 20 mT
  - linee AT a 132kV - 150kV  $\Rightarrow$  10 mT
  - linee MT a 10kV - 30kV  $\Rightarrow$  5 mT
- ◆ Non è schermato dagli edifici

# Elettrodotti aerei

In Italia esistono elettrodotti da 132kV 220kV 380kV più una serie di linee a tensione compresa tra 10kV-132kV

Per gli elettrodotti si prende in esame una corrente massima di 1500A (550A per 220kV) ed una distanza delle linee dal suolo di 11m (9.5 per 220kV).

Si può notare quanto segue:

- □ la geometria delle linee ha un notevole effetto sul campo elettrico ed uno minore sul campo magnetico
- □ il valore di H è molto al di sotto degli standard di sicurezza ma notevolmente al di sopra della soglia di attenzione epidemiologica. Ciò avviene anche ad elevata distanza dalla linea (per scendere sotto  $0.25\mu\text{T}$  occorre stare oltre 75m dall'asse della linea)

In generale, dalla situazione reale, risulta che per avere un valore di  $100\mu\text{T}$  (valore più basso indicato nel DPCM 1992) con un elettrodotto con 500A occorre avvicinarsi fino a 0.5m

# Elettrodotti interrati

Per gli elettrodotti interrati (in genere a 1.5m) il campo elettrico diminuisce a causa della azione schermante del terreno.

Per quanto riguarda il campo magnetico si hanno effetti discordanti dato anche il fatto che aumenta la possibilità delle persone di avvicinarsi ai cavi.

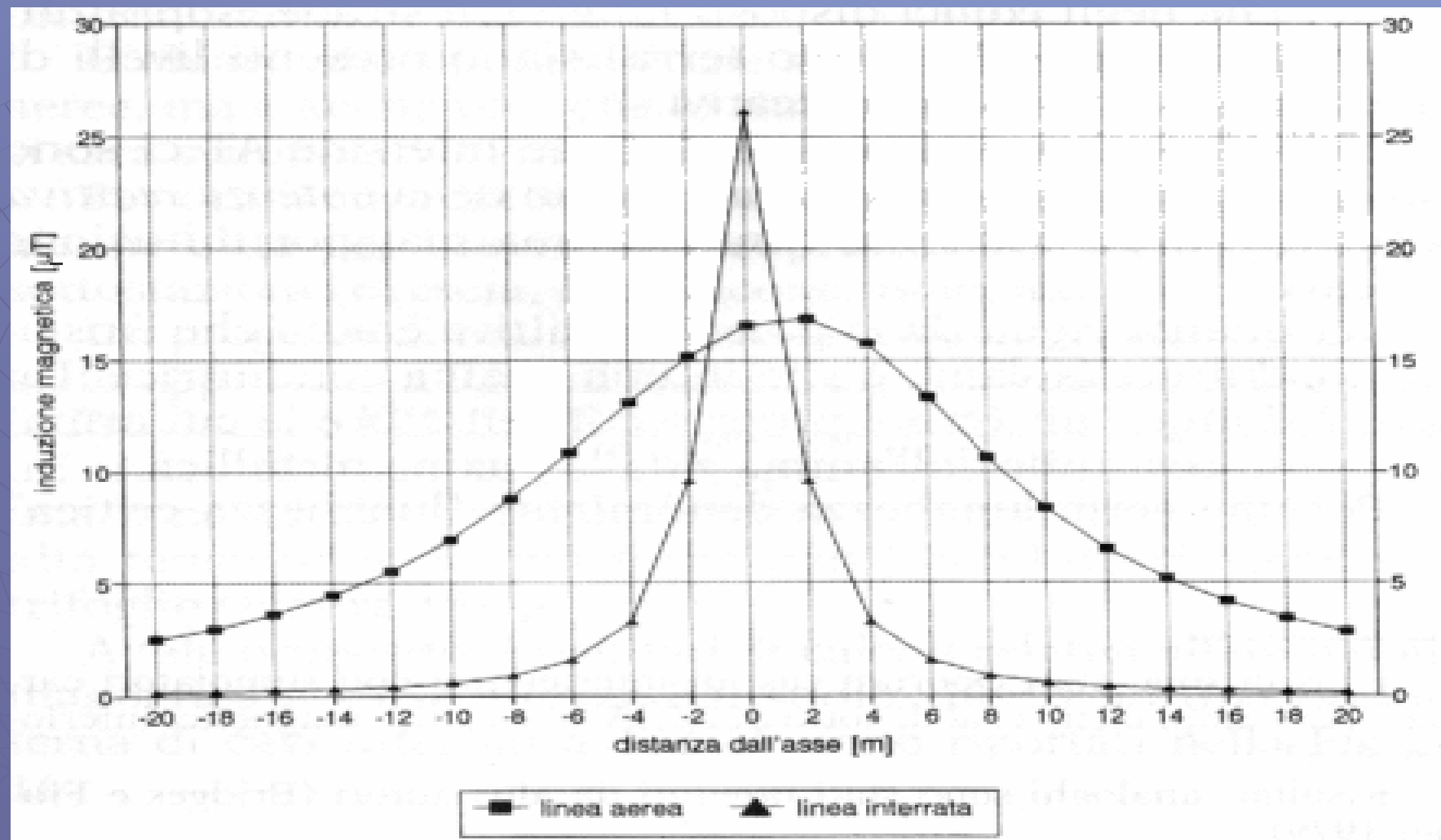
Ad esempio per un elettrodotto interrato a 1.5m con tensione 380kV e corrente 860A, ad 1m dal suolo (sopra i conduttori) si misurano  $25\mu\text{T}$ . Si riduce a  $0.15\mu\text{T}$  solo ad una distanza di 20m.

Il campo di un elettrodotto si riduce, indicativamente, a **0,2 microtesla** a

Distanza:	70 metri	150 metri
Linee a:	132.000 volt	380.000 volt

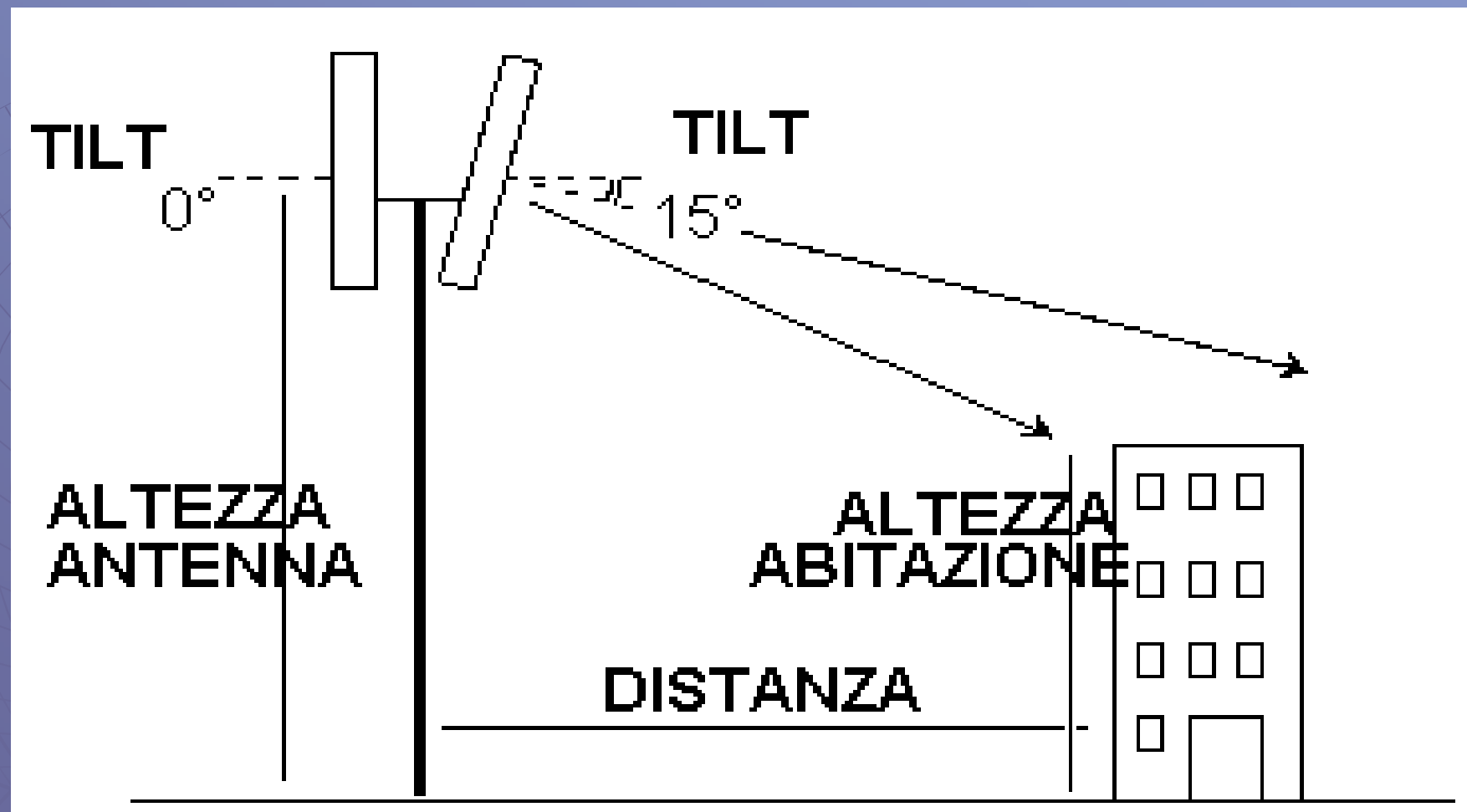
Il campo si può ridurre allontanandoli o interrando.

Le linee interrate danno luogo a campi ridotti grazie alla vicinanza dei conduttori ed all'effetto schermante del rivestimento del cavo e del terreno. A parità di corrente in linea il campo di un cavo interrato si riduce a 0,2 microtesla almeno alla metà delle distanze dalle corrispondenti linee aeree. Il seguente grafico mostra il campo magnetico al suolo prodotto da una linea aerea a 132 kV con corrente di 860 A e l'equivalente linea in cavo interrato.

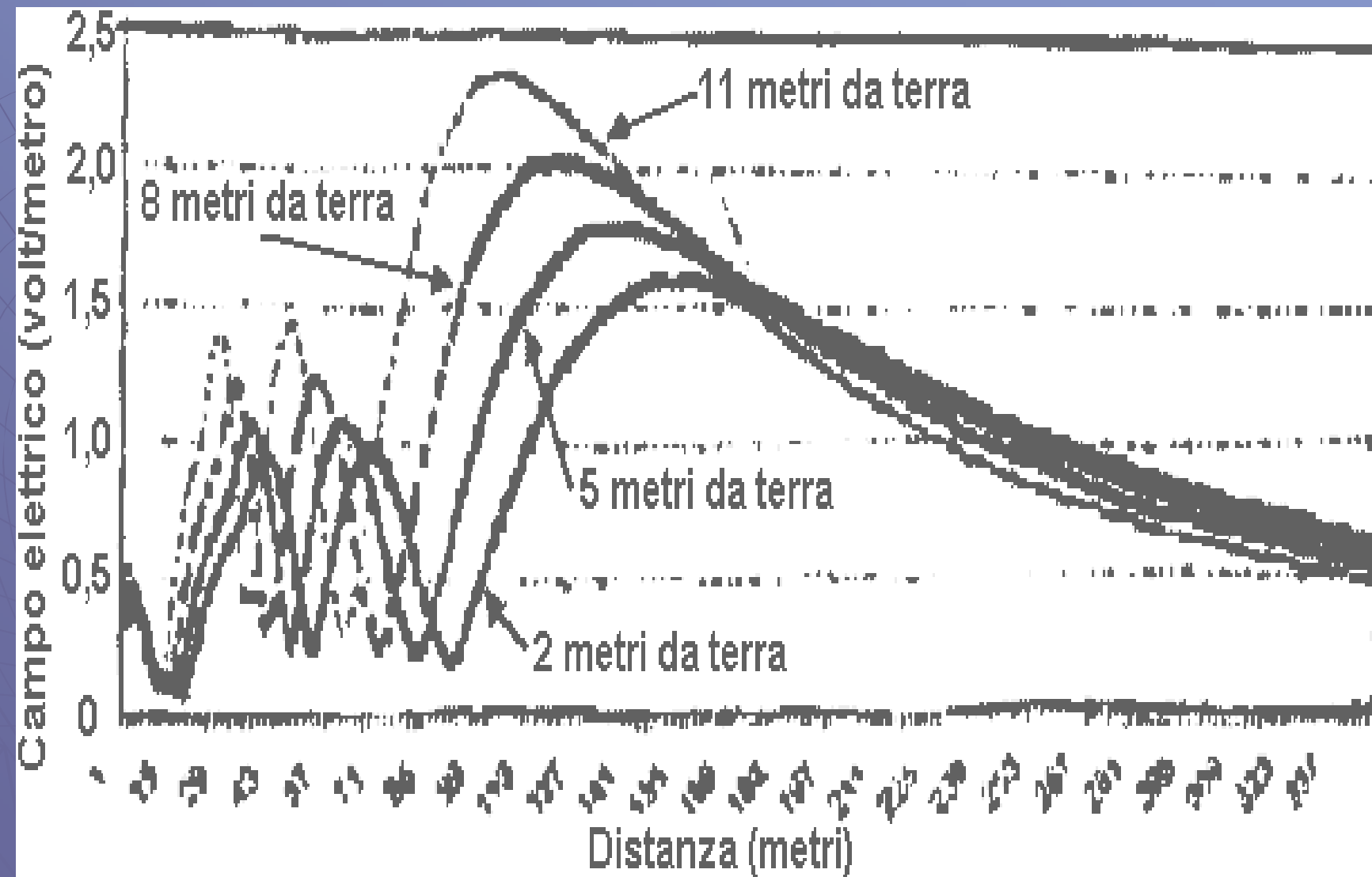


Nel caso delle antenne, il campo si può ridurre **allontanandole** dai luoghi del vivere o **riducendo la potenza** dell'antenna. Si può agire anche aumentando l'altezza e/o modificando il tilt di un'antenna.





Il campo di un'antenna tipo si riduce a 0,5 volt/metro a circa 500 metri dall'antenna e allontanandosi si riduce molto lentamente. La distanza di 150 metri non è di per sé garanzia dell'ottenimento dei valori di campo elettromagnetico necessariamente più bassi di quelli che si hanno a distanze inferiori. Infatti l'andamento del campo elettromagnetico di un'antenna tipo con potenza in ingresso di 50 watt installata su un palo di altezza 30 metri con tilt di 2° è il seguente.

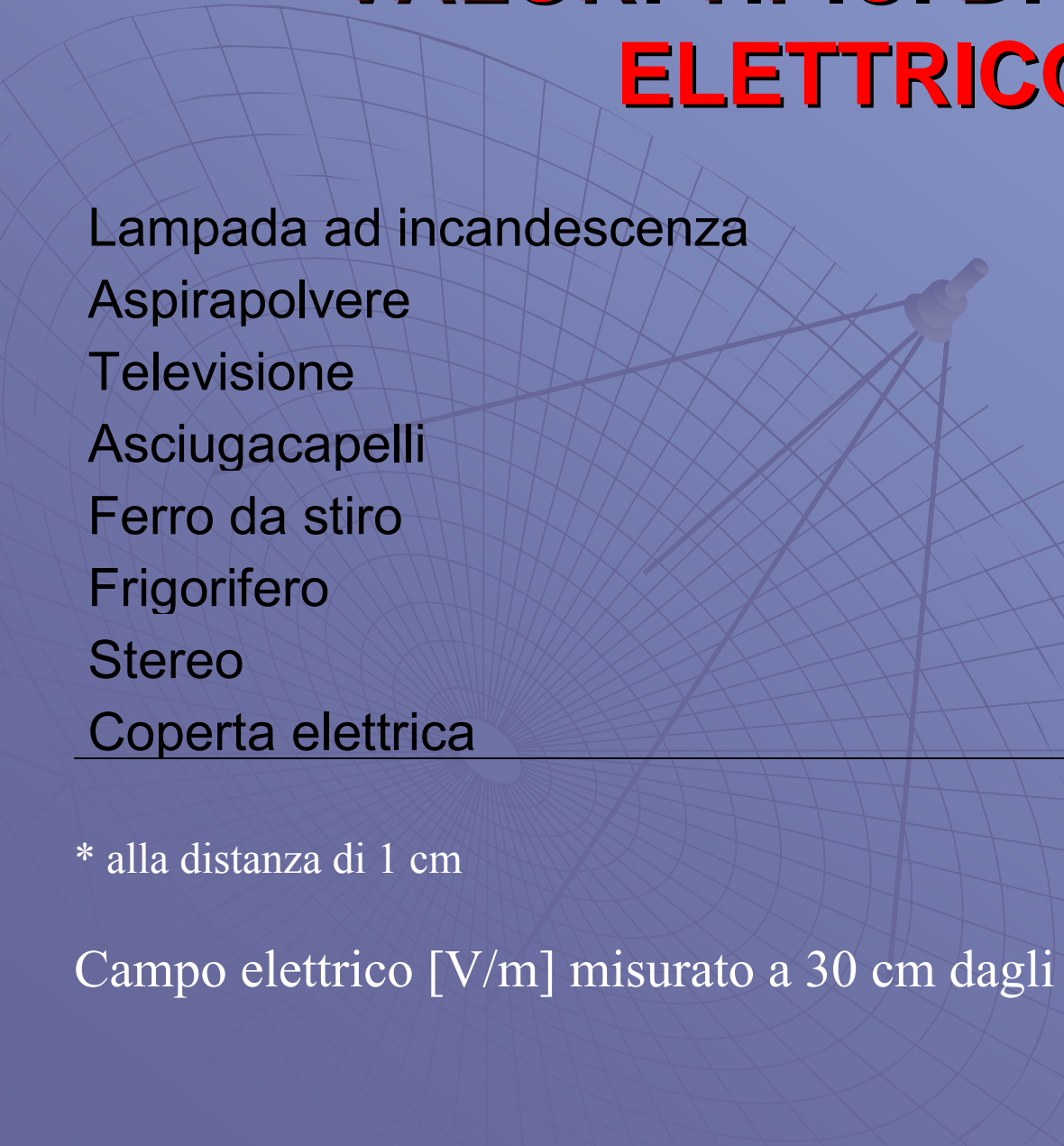


Si vede che a 100-150 il campo è massimo.

# CAMPO ELETTROMAGNETICO INDOOR

- ◆ Qualunque apparecchio che funziona ad energia elettrica genera un campo elettrico e magnetico a bassissima frequenza ogni volta che è in funzione
- ◆ Quando l'apparecchio è spento si può rilevare solo il campo elettrico generato dai conduttori di alimentazione
- ◆ Il livello di campo elettrico riscontrabile è di pochi V/m. Quando l'apparecchio viene messo in funzione si genera un campo magnetico che dipende esclusivamente dall'intensità di corrente e che può assumere valori piuttosto elevati

# VALORI TIPICI DI CAMPO ELETTRICO

A faint background graphic on the left side of the slide. It features a spiral pattern emanating from a central point, with several lines radiating outwards. Overlaid on this is a small, detailed illustration of a two-prong electrical plug.

Lampada ad incandescenza	2
Aspirapolvere	16 ÷ 90
Televisione	30 ÷ 90
Asciugacapelli	40 ÷ 80
Ferro da stiro	60 ÷ 120
Frigorifero	60 ÷ 110
Stereo	90 ÷ 180
Coperta elettrica	250 ÷ 4500*


---

\* alla distanza di 1 cm

Campo elettrico [V/m] misurato a 30 cm dagli apparecchi elettrici



# VALORI TIPICI DI CAMPO MAGNETICO



	<i>Distanza 3cm</i>	<i>Distanza 30cm</i>
Lampada ad incandescenza	400	4
Aspirapolvere	200÷800	2÷20
Televisione	25÷50	0.04÷2
Asciugacapelli	60÷2000	0.01÷1
Ferro da stiro	8÷30	0.2÷0.4
Stereo	4	0.5
Coperta elettrica	2÷3	0.1÷0.2

Campo magnetico [ $\mu\text{T}$ ] misurato a 3 e 30 cm dagli apparecchi elettrici

# STAZIONI RADIO BASE

Le antenne usate sono in genere di due tipi:

- □ omnidirezionali (basso guadagno) (larghezza 6-18cm altezza 60cm-3m)
- □ settoriali (alto guadagno) (larghezza 18-35cm altezza 1.2m-1.5m)

Le antenne ad alto guadagno sono in genere poste nei vertici delle celle, nel punto ove si incontrano tre celle esagonali (nido d'ape) e sono poste in modo da formare un triangolo equilatero in modo che ogni lato serva una cella. Ogni lato è poi costituito da una antenna trasmittente e due riceventi (tre antenne).

Le stazioni radio base trasmettono livelli di potenza che possono arrivare anche a 100W a seconda dell'ampiezza della cella che devono coprire.

Le antenne hanno dimensioni di 20-30cm di larghezza e circa 1m di altezza e sono montate su pali o tralicci di altezza 15-20m.

L'apertura angolare in verticale è molto stretta ( $6^\circ$ ) mentre in orizzontale è larga ( $60^\circ$ ) Ciò significa che sotto l'antenna l'intensità del campo è molto bassa, cresce un po' a qualche decina di metri e poi decresce di nuovo.

Le potenze installate vanno da un massimo di 300 W per i sistemi TACS a 50 W per i sistemi GSM, a 10-15 W per i sistemi UMTS.

# CAMPI ELETTROMAGNETICI NATURALI

In natura esistono campi elettrici e magnetici con i quali il nostro corpo convive fin dalla nascita.

Per quanto riguarda il campo elettrico naturale (di fondo) esso si distribuisce sulle persone in modo tale da creare una differenza di potenziale tra testa (potenziale positivo) e piedi (potenziale negativo).

Per quanto riguarda il campo magnetico naturale (di fondo), che deriva dalla presenza di un polo Nord e Sud magnetici (campo magnetico terrestre), esso produce una induzione naturale  $B$  di valore compreso tra  $40\text{-}70\mu\text{T}$  (corrispondenti ad un campo  $H$  di circa  $50\text{ A/m}$ ).

Per cominciare a dare degli esempi si può notare come un bimbo che corra entro il campo magnetico naturale (che è statico), subisca delle correnti indotte maggiori di quelle provocate da un campo artificiale a  $50\text{Hz}$  e di induzione pari a  $0.5\mu\text{T}$ .

# PRINCIPALI SORGENTI DI CEM TIPO ELF

Le principali sorgenti di CEM ELF sono:

- CEM terrestre ( $f = 0.001\text{Hz}$ ) (a 50 Hz il CEM terrestre vale  $E=0.1\text{mV/m}$   $B=0.00001\mu\text{T}$ )
- trazione elettrica ferroviaria (freq. circa 16Hz)
- trasporto energia elettrica in alta tensione (132kV 220kV 380kV)( $f = 50\text{ Hz}$ )
- cabine di trasformazione MT/BT
- quadri elettrici di BT
- elettrodomestici per la casa
- coperte elettriche
- televisori
- computer
- macchine industriali

In Italia ci sono circa 60.000 km di linee ad alta tensione (AT) che interessano circa 5.500 km<sup>2</sup> di territorio.



# Valori tipici

Per poter valutare numericamente la situazione dell'inquinamento elettromagnetico tipo ELF si riportano alcuni valori tipici dell'induzione B, relativi a diverse sorgenti:

Fenomeno	B ( $\mu$ T)
Cabina MT/BT (1m)	1.9 ( $E \leq 5V/m$ )
Sotto una linea 380kV con $I=700A$ e fasi equilibrate	23
A 100m dall'elettrodotto del caso precedente	0.068-0.5
Linea interrata da 220kV (profondità 1.5m)	15 (al livello del suolo)
In ambiente domestico	0.01-1
A 30cm da un elettrodomestico di potenza max. 1.5kW	0.01-3
A 30cm da un asciugacapelli	0-074-2.1

Si può notare che sono tutti valori inferiori a quelli del magnetismo terrestre. Ciò conferma che, più che le intensità, contino i tempi di esposizione.

Si analizzano ora in dettaglio le situazioni più tipiche per i CEM tipo ELF

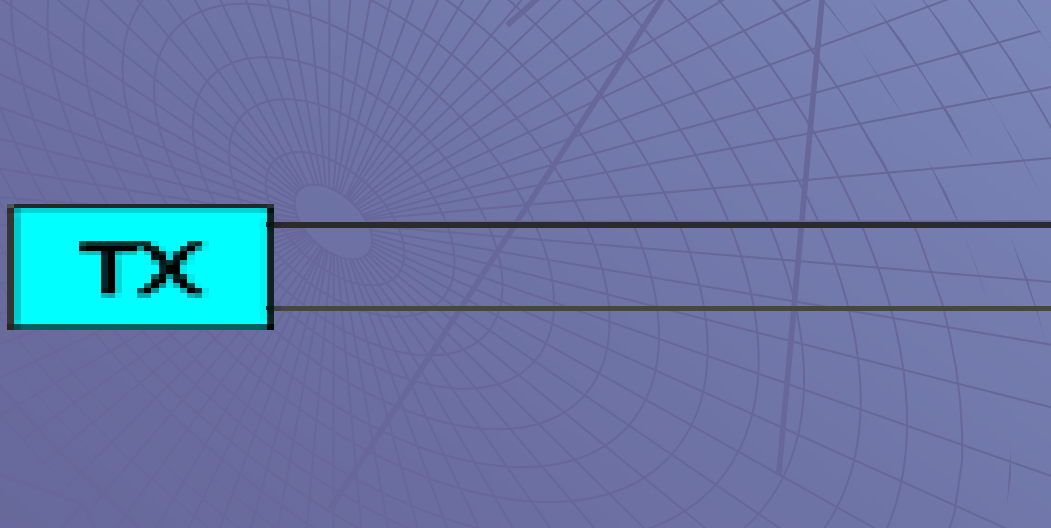
## Esempi delle principali sorgenti di CEM a RF

Sorgente	Frequenza (Hz)
Riscaldatori induttivi a radiofrequenza (fusione di leghe metalliche)	80k-5M (potenze intorno ai 500kW)
Riscaldatori capacitivi a radiofrequenza (incollaggio del legno, vulcanizzazione, essiccazione)	3M-50M (potenze intorno ai 200kW)
Forni a microonde per impieghi industriali (impieghi alimentari di grandi dimensioni)	900M-2.45G (potenza intorno ai 600kW)
Forni a microonde per impieghi domestici	2.45G (potenza intorno ai 600W)

Trasmettitori radio AM	550k-1650K
Trasmettitori radio FM	87M-107M
Trasmettitori telefonici per ponti radio	150M-500M (potenza decine di W)
Trasmettitori CB (Citizen Band)	27M (potenza massima 5W)
Radioamatori	Frequenze varie (potenza massima 500W)
Telefono cellulare (portatile)	950M (potenza qualche centinaio di mW)
Televisione VHF-UHF	50M-800M (potenza da kW a centinaia di kW)
Radar (modulazione ad impulsi di durata microsecondi e con frequenza di ripetizione 1000Hz)	100M-100G -alta potenza (>100kW) per avvistamenti -media potenza (centinaio di W) per aerei, navi -bassa potenza (decine di W) per pioggia
Radar per controllo della velocità	10G (potenza circa 0.1W)
Telepass	5.7G (potenza circa 0.1W)
Campo medico (sterilizzazione)	2.45G (potenza fino a qualche kW)
Ricerca (es. radioastronomia)	30G-300G (potenza da decine a centinaia di W)

# LE ANTENNE

Le antenne sono dispositivi in grado di convertire un segnale elettrico in onde elettromagnetiche ed irradiarle nello spazio circostante o viceversa. Le antenne possono essere **trasmettenti o riceventi** secondo l'uso cui sono destinate, oppure possono svolgere tutti e due le funzioni anche contemporaneamente. Le antenne sono dunque impiegate nei trasmettitori e nei ricevitori CB, radioamatoriali, televisivi, radiofonici, nei cellulari, nei ponti radio, nei satelliti artificiali, nei radiocomandi. Un trasmettitore è costituito, essenzialmente, da un generatore del segnale elettrico, da una linea a radiofrequenza e da un'antenna trasmittente secondo lo schema indicato in figura.





Il generatore produce un segnale elettrico contenente l'informazione da trasmettere, che può essere costituita, ad esempio, da un suono, nel caso di una stazione radioamatoriale o un baracchino.

La linea elettrica a R.F. trasporta il segnale dal luogo dove questo è prodotto, all'antenna trasmittente per essere inviato sotto forma di onde elettromagnetiche al destinatario dell'informazione.

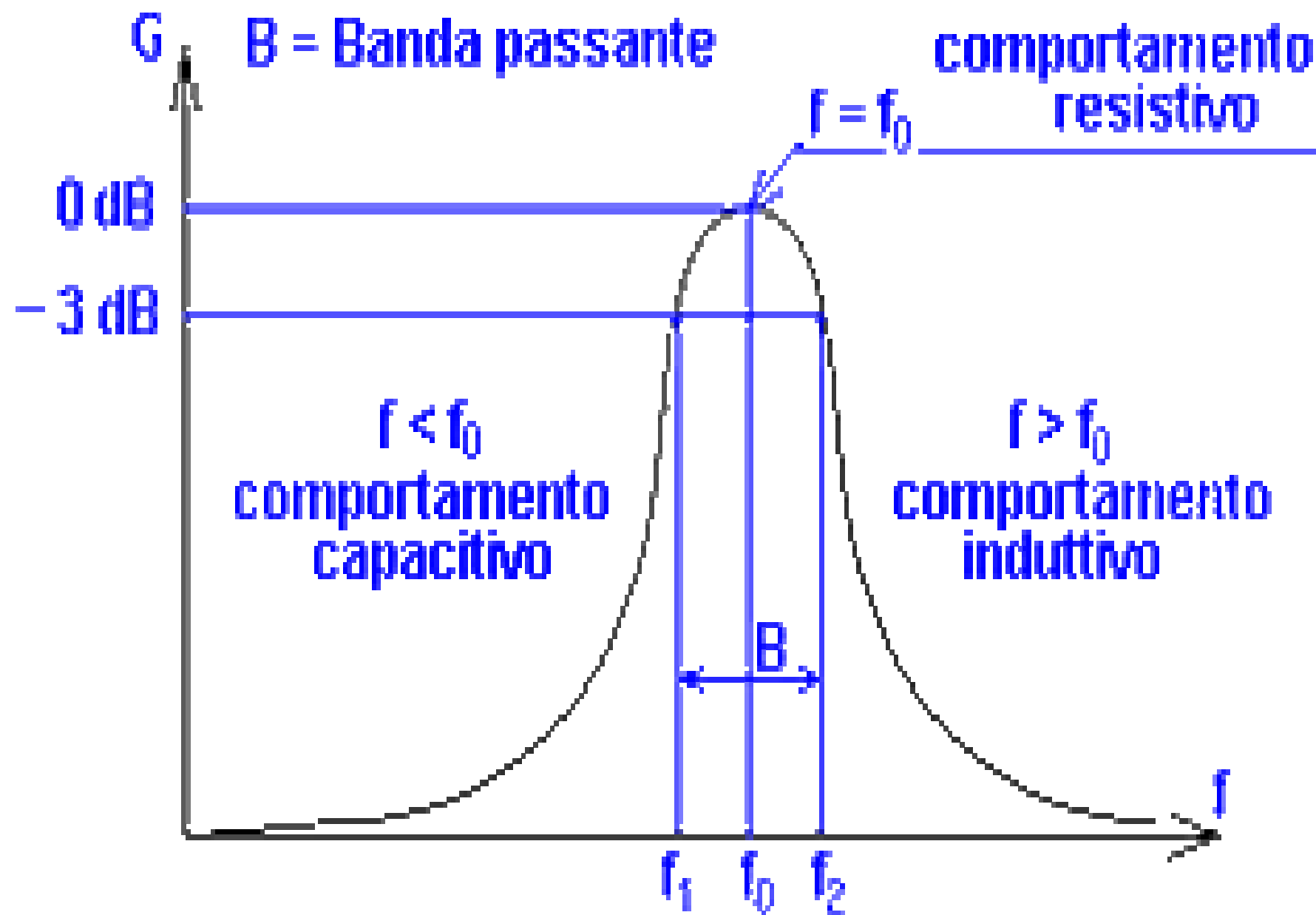
La linea di collegamento è di norma indispensabile perché l'informazione è prodotta spesso in un punto diverso da quello dove si trova l'antenna. Il radioamatore, ad esempio, può abitare a primo piano, mentre l'antenna va posta di preferenza, per funzionare meglio, sul tetto dell'ultimo piano.

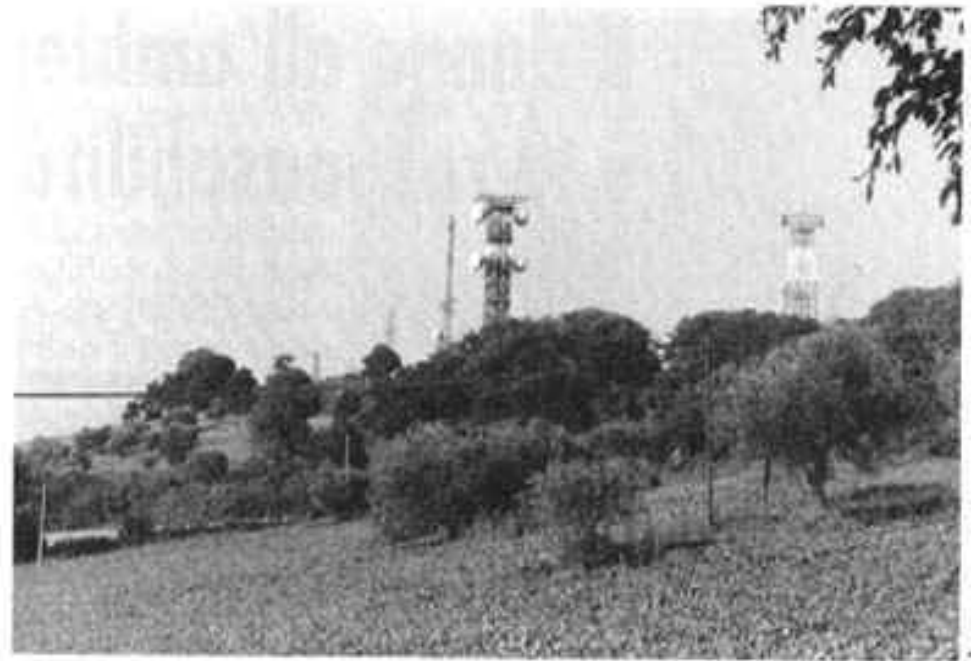
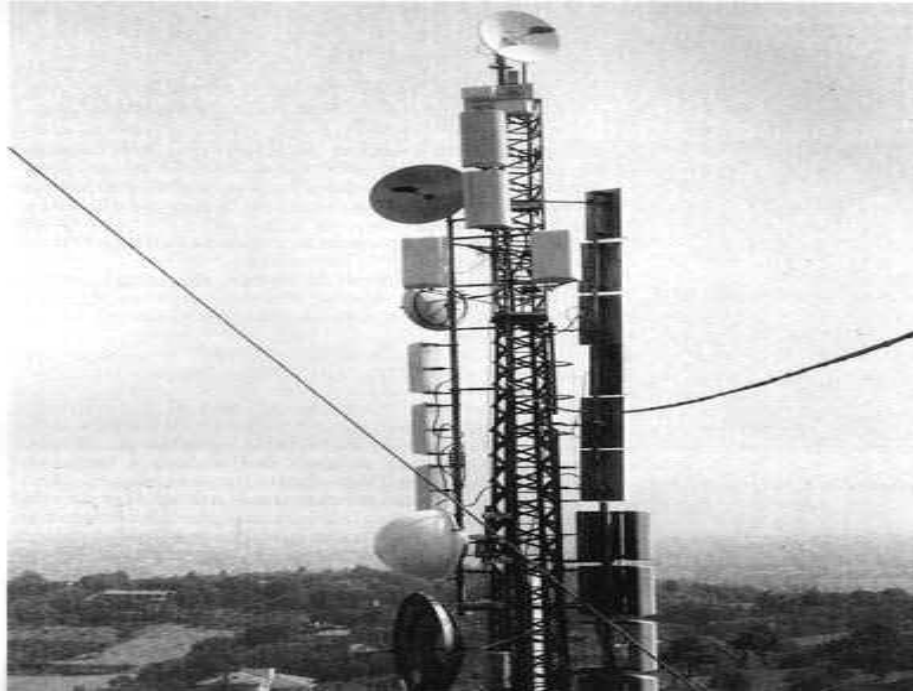
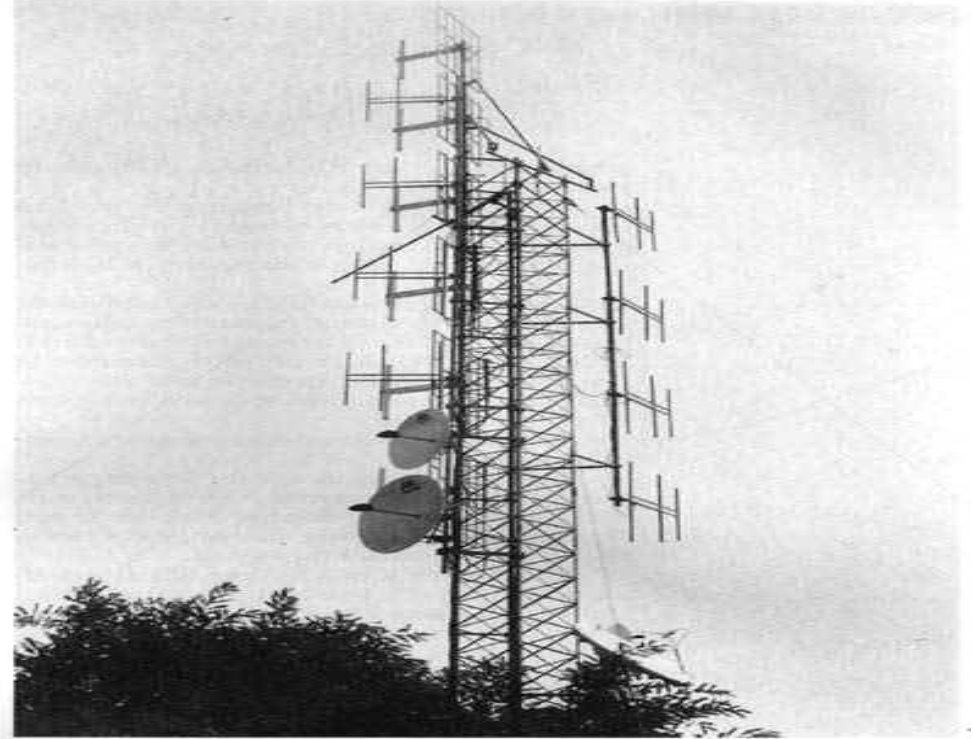
I campi elettrici e magnetici lungo il cavo si annullano quasi completamente per compensazione essendo i conduttori attraversati da cariche elettriche vicinissime e di segno opposto; lungo l'antenna invece, le cose cambiano completamente in quanto qui le cariche di segno positivo si trovano su uno stilo lontano da quelle di segno negativo che si trovano sull'altro stilo ed inoltre le correnti elettriche non risultano opposte, come avviene lungo il cavo, bensì allineate in modo da intensificare l'effetto del campo che esse producano. Il campo elettrico circostante il cavo è di intensità trascurabile perché dovuto alla differenza fra le due cariche e soprattutto perché i conduttori, schermati, ne rendono impossibile l'irradiazione.

Analogamente il campo magnetico circostante il cavo è di intensità trascurabile perché dovuto alla differenza fra le correnti circolanti nei due diversi.

Quando perviene sull'antenna, il segnale, si trasforma in energia elettromagnetica perché, in base alle equazioni di Maxwell, una perturbazione del campo elettrico dovuta alla continua variabilità data dalla frequenza, determina una continua variazione del campo magnetico e viceversa, dando così luogo a un'onda detta appunto elettromagnetica costituita da anelli di campo magnetico che si alternano con anelli di campo elettrico ad essi perpendicolari e viceversa.

## RISPOSTA IN FREQUENZA DI UN'ANTENNA

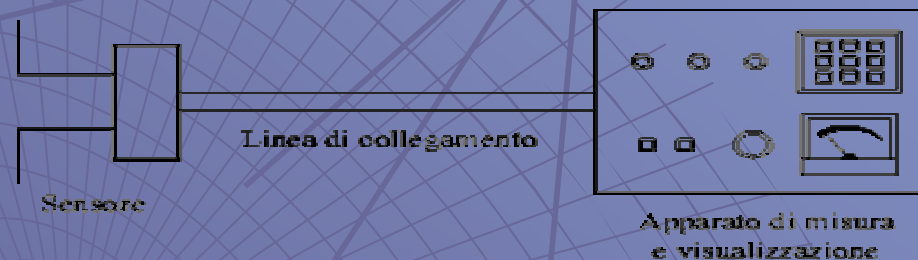






# CONFORMAZIONE GENERALE DEGLI APPARATI DI MISURA

Esiste una certa varietà di strumenti commerciali per misure di protezione RF/MW ed altri ne vengono continuamente realizzati dai laboratori e dalle aziende operanti nel settore, per affrontare situazioni particolari. Tali strumenti possono differire notevolmente tra di loro, ma la loro struttura generale ricalca in genere un modello comune in cui si possono riconoscere, come mostrato in Figura, tre subassiemi fondamentali: *il sensore, la linea di collegamento e l'apparato di misura e visualizzazione.*



**Il sensore** è l'elemento (in genere metallico) che si accoppia ai campi in cui è immerso e genera ai suoi terminali una grandezza elettrica (tensione e/o corrente) istantaneamente proporzionale al campo cui il sensore risponde. Talvolta si usa il termine **antenna** in alternativa a sensore. Noi adotteremo quest' ultima denominazione solo per le strutture di dimensioni paragonabili o maggiori alla lunghezza d'onda della radiazione misurata.

La **linea di collegamento** trasferisce il segnale dal sensore all'ingresso dell'apparato di misura: la sua importanza non va sottovalutata, si tratta spesso di una delle parti più critiche dell'intero strumento e può rendersi talvolta responsabile di complicazioni ed errori nella procedura di misura.

L'**apparato di misura** infine, mediante una elaborazione elettronica del segnale ricevuto, ricava e fornisce all'operatore una indicazione quantitativa dell'intensità dell'agente misurato.

# Frequenza

Ogni parte dello strumento interessata dal segnale a radiofrequenza o microonde oggetto di misura, deve essere in grado di operare alla frequenza di tale segnale. Per questo motivo, tra i parametri che caratterizzano ogni strumento figura sempre la **banda passante**. Essa specifica l'intervallo di frequenze a cui il dispositivo fornisce una risposta corretta, entro determinati margini di errore.

Può capitare che la sorgente sotto sorveglianza emetta contemporaneamente su più frequenze. In questo caso, sono possibili due strategie di misura.

Si può operare a **banda stretta** utilizzando strumentazione con una ridottissima banda passante, centrata attorno a ciascuna delle frequenze a cui la sorgente emette.

Si può altrimenti operare a **banda larga**, usando uno strumento la cui banda passante abbracci tutto lo spettro emesso dalla sorgente.

Lo strumento fornisce in questo caso una misura globale dell'intensità dei campi o della radiazione presente nel sito di misura.

Operare a banda larga è in generale l'approccio più economico ed immediato e probabilmente il più adatto alle esigenze delle misure di protezione. Esso soffre comunque di almeno una potenziale limitazione: non può essere utilizzato quando le norme di sicurezza cui ci si vuole riferire prevedono limiti massimi diversi per le diverse frequenze emesse dalla sorgente. È inoltre necessario ricorrere alle misure a banda stretta anche qualora a banda larga si rilevi un valore complessivo dell'intensità di campo maggiore del limite specificato dalla normativa presa a riferimento;

# Collocazione del sito di misura rispetto alla sorgente

Per distanze dalla sorgente superiori a circa una lunghezza d'onda siamo nella **zona di radiazione**; in questa regione i campi hanno una struttura di tipo radiattivo tanto più marcata quanto più ci si allontana dalla sorgente. La struttura radiattiva è caratterizzata da campo elettrico e campo magnetico perpendicolari sia tra di loro sia alla direzione di propagazione; le loro ampiezze decrescono in modo inversamente proporzionale alla distanza dalla sorgente e stanno in un rapporto fisso tra di loro, che dipende solo dalle caratteristiche del mezzo in cui i campi si stanno propagando.

Tale rapporto ha le dimensioni di una resistenza e prende il nome di **impedenza intrinseca** del mezzo; nel caso del vuoto, essa vale circa  $377 \Omega$ .

In questa situazione, l'intensità della radiazione elettromagnetica può essere univocamente specificata indicando o l'ampiezza del campo elettrico o quella del campo magnetico o la **densità di potenza**, che rappresenta la quantità di energia che attraversa in un tempo unitario una superficie unitaria posta perpendicolarmente alla direzione di propagazione dei campi.

Quando le dimensioni della sorgente sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda, è opportuno considerare la zona di radiazione ulteriormente suddivisa in una **zona di campo vicino o di Fresnel** ed una **zona di campo lontano o di Fraunhofer**, col limite di separazione posto grosso modo ad una distanza  $d^2/\lambda$  dalla sorgente, dove "d" è la massima dimensione lineare della stessa e " $\lambda$ " la lunghezza d'onda. La zona di Fresnel, a causa degli intensi fenomeni di interferenza che vi hanno luogo, è caratterizzata da un andamento molto irregolare delle ampiezze dei campi, con forti variazioni su piccole distanze.



Resta infine da parlare della **zona di induzione**, posta nelle immediate vicinanze della sorgente. Questi hanno le caratteristiche di **campi reattivi**: il campo elettrico e quello magnetico sono strettamente legati alla struttura ed alla dislocazione delle rispettive sorgenti fisiche (cariche per il primo, correnti per il secondo) e non sono deducibili uno dall'altro.

Il rapporto tra le loro ampiezze (indicato talvolta come **impedenza di campo**) varia grandemente a seconda del tipo di sorgente e del punto dove i campi sono valutati. I campi reattivi decadono più rapidamente di quelli radiativi con la distanza dalla sorgente (in modo inversamente proporzionale almeno al quadrato della stessa) per cui sono predominanti solo fino a circa un decimo di lunghezza d'onda da quella, mentre divengono trascurabili per distanze superiori ad una lunghezza d'onda.

## Potenza emessa dalla sorgente, modulazione

La potenza emessa dalla sorgente è un fattore molto importante ai fini di un corretto dimensionamento della strumentazione. I parametri pertinenti nelle specifiche di questa sono la **sensibilità** e la **gamma dinamica**; la prima indica il livello del minimo segnale misurabile, la seconda il rapporto tra il minimo ed il massimo misurabili.

La sensibilità è limitata soprattutto dal **rumore** e dalla **stabilità** del sistema di misura, la dinamica dipende dal massimo sovraccarico tollerabile dallo strumento senza alterazione della linearità della risposta o addirittura danni di qualche tipo.

Queste considerazioni sono particolarmente significative quando si trattano segnali con *modulazione impulsiva a basso ciclo di servizio* (tipica dei segnali RADAR), che presentano una notevole intensità di picco con basso valore medio.



# COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA

L'apparato di misura deve essere **compatibile** con l'ambiente elettromagnetico in cui opera, sia sotto l'aspetto dell'*emissione* sia sotto quello della *suscettibilità*.

Il problema dell'**emissione** nasce perché qualunque strumento elettronico appena un po' complesso contiene nel suo interno sorgenti di potenziali disturbi elettromagnetici (come oscillatori locali o generatori di segnali di temporizzazione).

Occorre evitare che tali disturbi raggiungano il sensore e causino errori di misura.

Questo si ottiene **schermando** l'elettronica dello strumento con pannelli metallici. In generale, quello dell'emissione non è un grosso problema nelle misure di radioprotezione, dove i segnali da misurare sono intensi e di conseguenza gli strumenti non sono eccessivamente sensibili.

Per quanto riguarda la **suscettibilità**, si noti che di solito tutto l'apparato di misura, anziché il solo sensore, si trova immerso nel campo elettromagnetico di cui si vuole determinare l'ampiezza. Occorre evitare che questo si accoppi direttamente a parti dell'apparato che non siano il sensore. La stessa schermatura applicata per ridurre l'emissione può servire a limitare l'accoppiamento del campo allo strumento di misura.

Il problema maggiore resta la **linea di collegamento**. Quando questa trasporta un segnale a corrente il problema può essere affrontato utilizzando *linee ad alta resistenza terminate con filtri passa-basso*. Quando invece la linea trasporta direttamente il segnale a RF captato dal sensore, occorre ricorrere a mezzi più quali l'utilizzo del **cavetto schermato** e del **doppino ritorto**.

# SENSORI PER LA ZONA DI INDUZIONE

Per la misura dei campi nella zona di induzione occorrono sensori che rispondono o solo al campo elettrico o solo al campo magnetico, poiché, non esiste alcuna relazione semplice tra i due, che devono perciò essere misurati **entrambi** e in modo **indipendente**.

Inoltre il sensore deve essere in grado di effettuare misure **puntuali**, poiché possono essere presenti notevoli variazioni spaziali delle intensità dei campi. Entrambi questi requisiti possono essere soddisfatti da sensori ad accoppiamento **reattivo**.

Si parla di accoppiamento reattivo quando l'interazione fra sensore e campo avviene tramite il solo campo elettrico o il solo campo magnetico.

Avremo un accoppiamento **capacitivo** quando interessa il campo **elettrico**, **induttivo** quando interessa quello **magnetico**.

L'accoppiamento **capacitivo** ha luogo se il sensore ha una struttura aperta, costituita da due masse metalliche confinate in una regione tanto piccola che il campo elettrico si possa considerare uniforme in essa.

L'accoppiamento **induttivo** ha luogo se il sensore ha una struttura anulare chiusa che abbraccia una superficie tagliata dalle linee di forza del campo magnetico e di estensione tanto piccola da poter considerare uniforme il campo stesso su di essa

# SENSORI PER LA ZONA DI RADIAZIONE

## Zona radiattiva vicina

In questa zona, le notevoli variazioni spaziali delle ampiezze dei campi impongono l'uso di sensori con alta risoluzione spaziale (dell'ordine almeno di  $1/4$  di lunghezza d'onda). Per questo motivo, si devono usare anche qui i sensori di piccole dimensioni impiegati nella zona di induzione. Solo in alcuni casi, nella parte più "lontana" della zona di Fresnel, si possono cominciare ad utilizzare **antenne**, specie se a larga banda e operanti alle frequenze più basse della loro gamma utile.

## Zona radiattiva lontana

Nella regione dei campi radiativi "lontani" si possono eseguire misure di campo EM utilizzando liberamente i sensori ad accoppiamento **radiattivo**, ovvero le **antenne**. Si tratta di strutture di grandi dimensioni, paragonabili o superiori alla lunghezza d'onda della radiazione misurata, che funzionano come *elemento di transizione tra la propagazione nello spazio libero di un campo elettromagnetico e la propagazione guidata all'interno della linea di collegamento*.

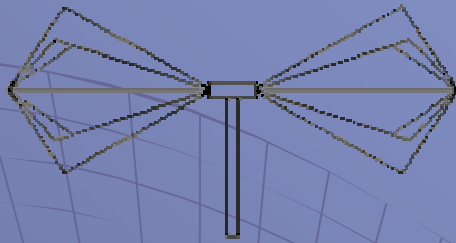
Quando un'onda che si propaga con le modalità dello spazio libero investe un'antenna, in uscita da questa (guida d'onda o cavo coassiale) è presente un'onda guidata che trasporta potenza in quantità direttamente proporzionale alla potenza per unità di superficie (*densità di potenza*) che investe l'antenna stessa. La costante di proporzionalità fra queste due quantità ha le dimensioni di una superficie e prende il nome di **area equivalente o efficace** dell'antenna; essa dipende sensibilmente anche dal carico applicato all'uscita di questa: normalmente, il valore specificato dal costruttore si riferisce ad un carico resistivo di  $50 \Omega$ .



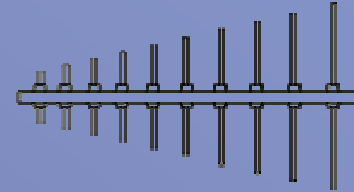
## È opportuno a questo punto evidenziare alcuni concetti:

- a causa della **attenuazione di spazio libero** (ampiezza dei campi proporzionale all'inverso della distanza), è assai raro dover compiere misure protezionistiche nella zona radiativa lontana e comunque questo avviene solo per campi a frequenza relativamente alta (indicativamente oltre i 300 MHz) e con sorgenti di dimensioni limitate;
- mentre, se si vuole, si possono usare sensori reattivi per misure sui campi radiativi (per quanto questo non sia in generale conveniente poiché, date le alte frequenze in gioco, tali sensori devono essere realmente molto piccoli e quindi molto poco sensibili), non è possibile il viceversa;
- la distinzione tra accoppiamento reattivo e radiativo dipende anche dalla frequenza: qualunque sensore reattivo diventa radiativo se utilizzato a frequenza sufficientemente elevata.



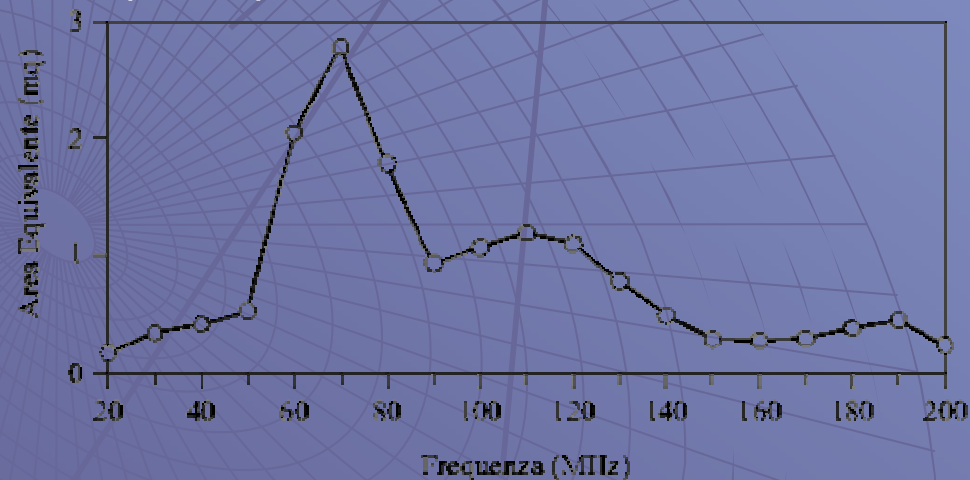


**Antenna biconica**



**Antenna log. Periodica**

**L'antenna biconica** è una delle più diffuse antenne standard per misure di campo. Essa ha grossomodo la struttura di un doppio cono come mostrato in Figura. Si tratta di una antenna a banda larga, usata per lo più a polarizzazione orizzontale, che copre la gamma da 20 a 200 MHz. I suoi parametri dipendono purtroppo dalla frequenza in modo irregolare e non monotono; si veda per esempio l'andamento dell'area equivalente (con carico di 50  $\Omega$ ) in funzione della frequenza, riportato in Figura, per un esemplare tipico di tale antenna.



**L'antenna logaritmica periodica** è costituita da una successione di dipoli paralleli e complanari, di lunghezza ed interdistanza progressivamente crescenti, tutti collegati tra di loro. E' una antenna a larga banda (da 200 a 1000 MHz) a polarizzazione lineare.

# POLARIZZAZIONE ED ISOTROPIA

Un sensore si dice **polarizzato** se fornisce una risposta dipendente dal suo orientamento spaziale rispetto al campo da misurare.

Esempi tipici sono i dipoli, che forniscono un segnale proporzionale al coseno dell'angolo tra il campo elettrico e la direzione dei bracci.

Analogamente, presentano una direzione privilegiata i sensori a spira, l'antenna biconica e la logaritmica periodica. Invece, le antenne a spirale conica logaritmica hanno una risposta uniforme qualunque sia la direzione del campo elettrico nel piano normale all'asse del cono, mentre sono insensibili alla componente del campo lungo tale asse.

E' possibile anche realizzare sensori **isotropi** (ottenuti per esempio per combinazione di tre sensori polarizzati linearmente), in cui la risposta è completamente indipendente dalla direzione del campo misurato.

I sensori isotropi semplificano sicuramente la misura, in quanto sollevano l'operatore dalla necessità di preoccuparsi dell'orientamento del sensore.

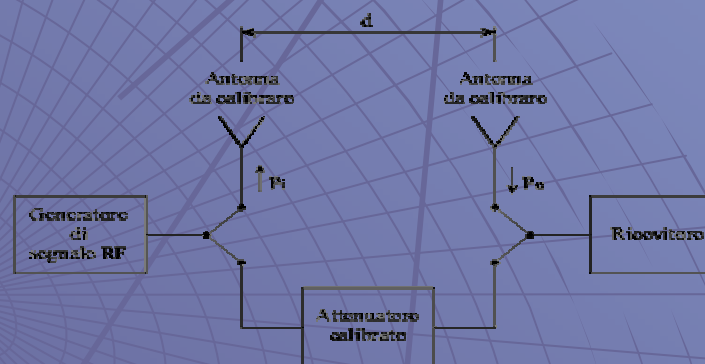
Essi inoltre diventano *indispensabili* quando la polarizzazione del campo misurato varia rapidamente nel tempo. Per contro, l'impiego di sensori polarizzati consente di ricavare una informazione in più dalla misura e cioè la direzione del campo misurato.

# Calibrazione di uno strumento

Calibrare uno strumento significa correlare la sua indicazione con il valore effettivo del campo in cui è immerso il sensore. Questa correlazione dovrebbe tener conto di un grande numero di fattori, tra i quali la variazione della risposta con la frequenza, con l'orientamento del sensore, con la temperatura o altri parametri ambientali. In realtà, dato che molto spesso, in sede di misura, parametri come la frequenza o la polarizzazione del campo non sono noti in maniera esauriente, non sempre è possibile correggerne l'effetto.

## Calibrazione di antenne

Per la **calibrazione delle antenne** accenneremo al *metodo delle due antenne identiche*, illustrato schematicamente in Figura . In esso si fa uso di due esemplari identici dell'antenna da calibrare, allineati uno di fronte all'altro ad una distanza "d" nota con precisione.



Si alimenta con un generatore la prima antenna con una potenza " $P_i$ " e si misura con un ricevitore la potenza " $P_o$ " disponibile ai morsetti della seconda; poi si collegano direttamente tra di loro i cavi provenienti dal generatore e dal ricevitore, interponendo un attenuatore variabile di precisione; si aggiusta l'attenuazione introdotta al valore " $A$ " ( $<1$ ) tale che, ferma restando la potenza  $P_i$  emessa dal generatore, il ricevitore indichi lo stesso valore  $P_o$  letto in precedenza; a questo punto è possibile risalire all'area equivalente " $A_e$ " dell'antenna con la relazione:  $A_e = \lambda d \sqrt{A}$



# TECNICHE DI MISURE

Le misure dei campi elettromagnetici vengono classificate in misurazioni in banda larga o integrali e misurazioni in banda stretta o spettrali.

Le misure a larga banda sono realizzate con una strumentazione che ha una sensibilità indipendente dalla frequenza e indica l'intensità totale dei campi senza dare informazioni sulla sua frequenza specifica a cui essi operano.

Le misure a banda stretta vengono effettuate con strumenti in grado di selezionare la frequenza del campo che stanno rilevando. Gli apparati di misura con queste caratteristiche sono costituiti generalmente da un'antenna e da analizzatori di spettro in grado di fornire in tempo reale le intensità dei campi alle diverse frequenze di emissione.

Ciò diventa particolarmente importante quando sono presenti numerose sorgenti a varie frequenze e si vuole determinare il contributo dovuto ad ogni singola sorgente.

Un'ulteriore classificazione in misure a bassa frequenza e misure ad alta frequenza è legata alla tipologia degli strumenti di misura che sono specifici per i suddetti intervalli di frequenza.



# **FONTI DI ERRORI DI MISURA**

- ◆ onda incidente non piana
- ◆ modulazione elevata
- ◆ sensibilità alla luce (vale per vecchi sensori)
- ◆ presenza di elevati gradienti di temperatura
- ◆ accoppiamento dei cavi
- ◆ presenza di campi intensi fuori banda
- ◆ presenza del corpo umano
- ◆ presenza nelle vicinanze di strutture metalliche

STAZIONI	Alta freq. 100Khz-3Ghz E(V/m)			Bassa freq. 0-100Khz E (V/m)      H (μT)	
	MAX	MIN	RMS		
<u>Papardo uscita panoramica</u>	No signal			MAX 1.708	0.102
				MIN 0.068	0.000
				RMS 0.477	0.040
<u>Salita Papardo</u>	No signal			MAX 19.240	0.093
				MIN 0.542	0.062
				RMS 3.865	0.078
<u>* Padardo pal. Telecom</u>	1.23	0.00	0.39	MAX 17.218	0.136
				MIN 0.000	0.121
				RMS 1.900	0.130
<u>Padardo pal. Telecom (2)</u>	0.65	0.34	0.49	MAX 15.648	0.208
				MIN 0.140	0.189
				RMS 3.088	0.199
<u>* Ingresso Ospedale</u>	0.87	0.00	0.05	MAX 26.341	0.050
				MIN 1.479	0.022
				RMS 5.469	0.037
<u>* Ingresso Ospedale(2)</u>	0.37	0.00	0.11	MAX 47.783	0.053
				MIN 0.478	0.024
				RMS 4.185	0.040
<u>* Eliporto</u>	0.89	0.00	0.18	MAX 4.948	0.037
				MIN 0.065	0.016
				RMS 0.490	0.025

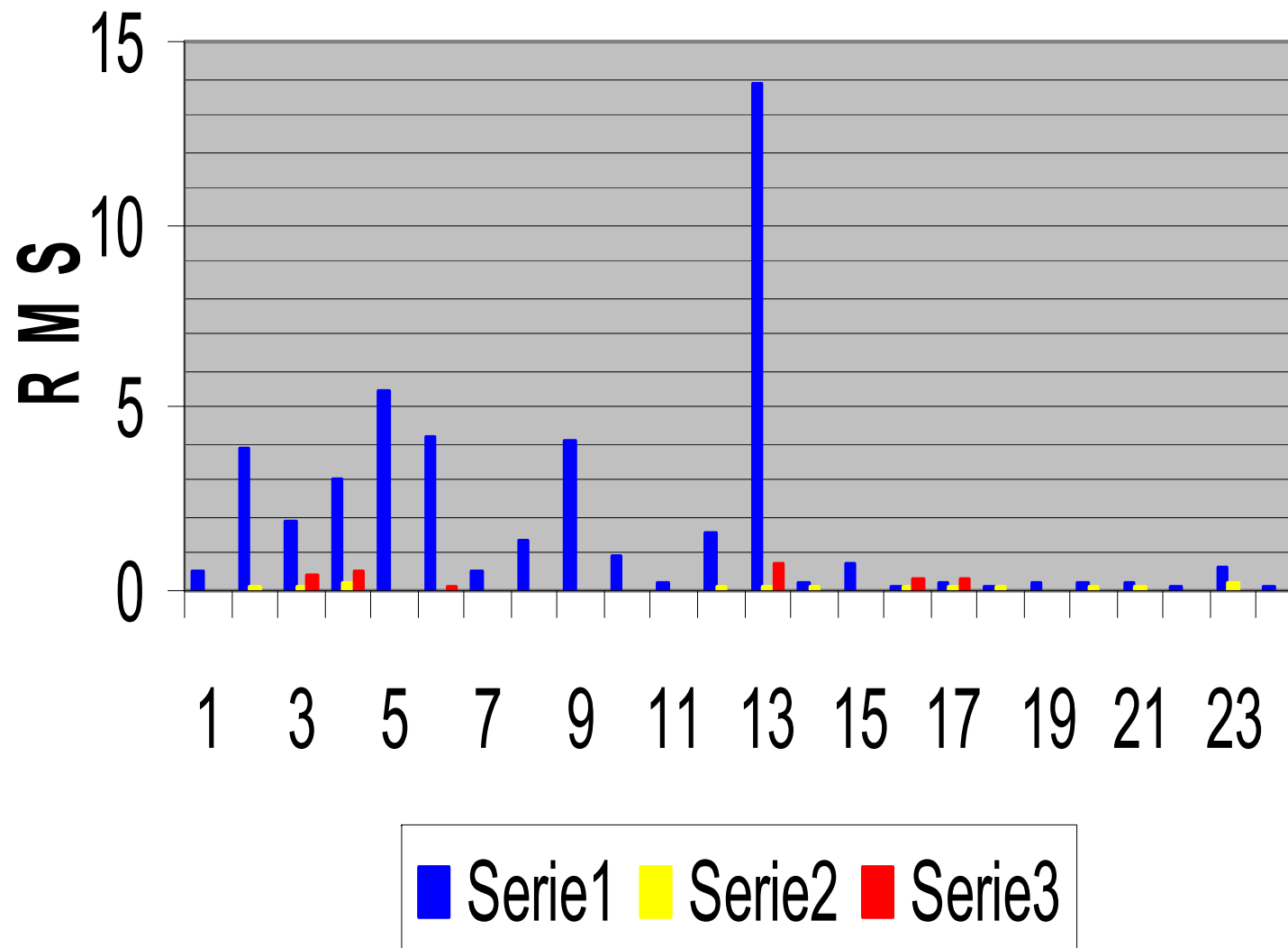
MISURA	Alta freq. 100Khz-3Ghz E(V/m)			Bassa freq. 0-100Khz E (V/m)      H (μT)	
	MAX	MIN	RMS		
<u>Ponte Papardo</u>	No signal			MAX 5.296	0.049
				MIN 0.000	0.028
				RMS 1.315	0.036
<u>*Cinema Iris</u>	No signal			MAX 7.082	0.079
				MIN 0.144	0.000
				RMS 4.113	0.051
<u>Scuola media Petrarca</u>	No signal			MAX 2.997	0.048
				MIN 0.059	0.029
				RMS 0.918	0.039
<u>Via pantano n° 47</u>	No signal			MAX 1.503	0.086
				MIN 0.047	0.000
				RMS 0.159	0.052
<u>Via Andrea Donato n° 64</u>	No signal			MAX 3.342	0.142
				MIN 0.053	0.117
				RMS 1.606	0.130
<u>*Via pantano n°86</u>	0.72	0.72	0.72	MAX 13.910	0.158
				MIN 13.701	0.087
				RMS 13.804	0.143
<u>*Via Nuova Torre Faro</u>	No signal			MAX 1.870	0.114
				MIN 0.000	0.065
				RMS 0.245	0.086

MISURA	Alta freq. 100Khz-3Ghz E(V/m)			Bassa freq. 0-100Khz E (V/m)      H (μT)	
	MAX	MIN	RMS		
<u>Ristorante la Napoletana</u>	No signal			MAX 5.005 MIN 0.000 RMS 0.767	0.040 0.020 0.023
<u>Via pantano</u>	0.33	0.33	0.33	MAX 1.741 MIN 0.045 RMS 0.156	0.193 0.000 0.148
<u>Via pantano n°99</u>	3.43	0.00	0.30	MAX 2.333 MIN 0.044 RMS 0.251	0.154 0.115 0.137
<u>Via circuito</u>	No signal			MAX 0.555 MIN 0.046 RMS 0.089	0.132 0.093 0.123
<u>Via circuito n°129</u>	No signal			MAX 1.532 MIN 0.042 RMS 0.235	0.116 0.036 0.051
<u>Via circuito n°126</u>	No signal			MAX 0.351 MIN 0.110 RMS 0.160	0.263 0.124 0.149
<u>Horcynus Orca</u>	No signal			MAX 1.202 MIN 0.054 RMS 0.188	0.084 0.076 0.079



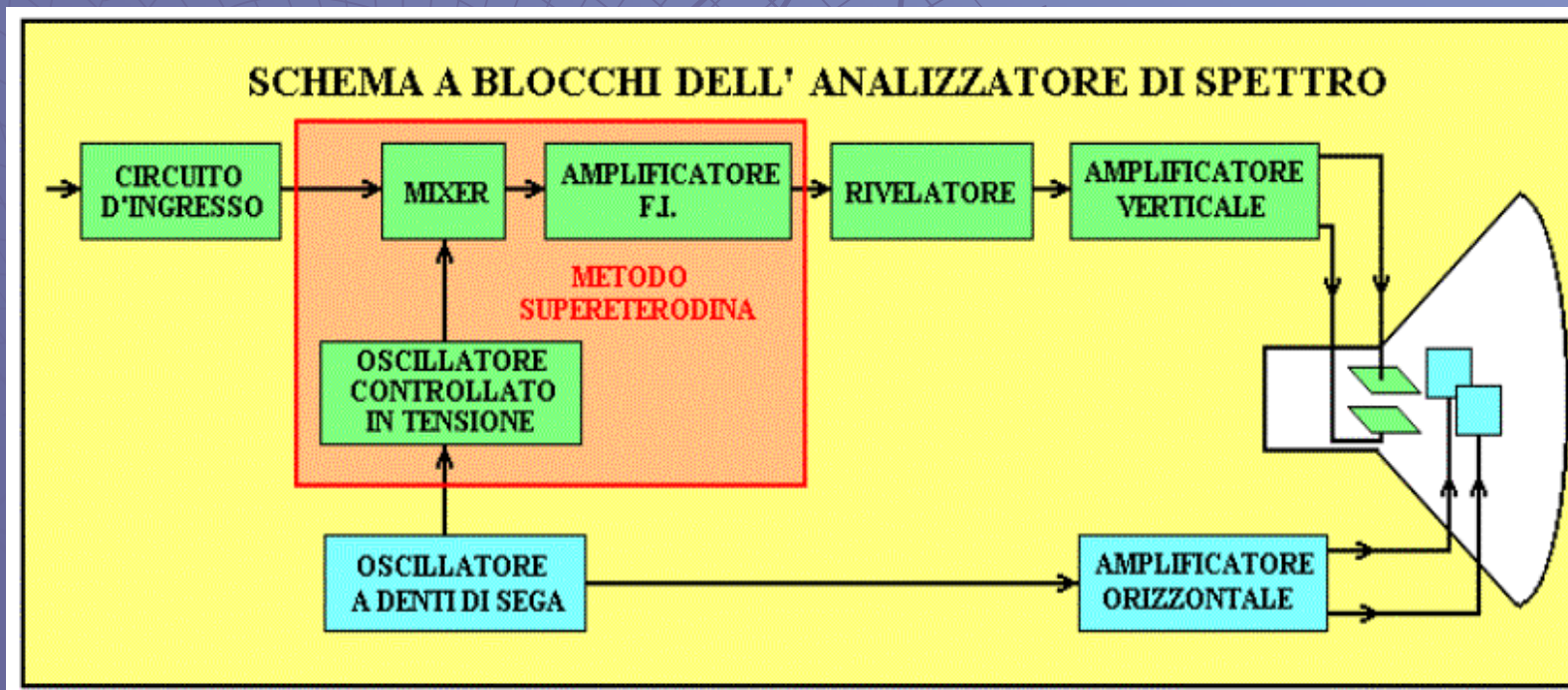
MISURA	Alta freq. 100Khz-3Ghz E(V/m)			Bassa freq. 0-100Khz E (V/m)      H (μT)		
	MAX	MIN	RMS			
<u>Pilone (lato sinistro)</u>	No signal			MAX	0.473	0.054
				MIN	0.047	0.000
				RMS	0.089	0.026
<u>* Base</u>	No signal			MAX	0.873	0.227
<u>Pilone</u>				MIN	0.072	0.215
				RMS	0.623	0.219
<u>Pilone (lato destro)</u>	0.32	0.00	0.01	MAX	0.074	0.052
				MIN	0.050	0.029
				RMS	0.073	0.039

**Serie1 = E LF Serie2 = H LF Serie3 = E HF**



# ANALIZZATORE DI SPETTRO

L'analizzatore di spettro è uno strumento che fornisce l'immagine dello spettro di ampiezza di un segnale elettrico. Non rappresenta invece la componente continua. Le applicazioni più importanti di questo strumento riguardano le radiodiffusioni, la stereofonia, la televisione, il radar, la trasmissione dati. Lo strumento consente di verificare con grande precisione la larghezza di banda ed il livello del segnale emesso da una trasmittente, analogica o numerica verificando se le loro caratteristiche corrispondono alle prestazioni richieste. La presentazione dell'immagine esterna può essere di tipo analogico, ed allora esso si presenta esternamente del tutto simile all'oscilloscopio, oppure digitale, ed allora il suo schermo somiglia molto di più a quello di un computer.



Conoscendo il valore della **tensione** è possibile ricavare i **Watt/metroquadrato** e gli **Amper/metro** utilizzando queste due semplici formule:

$$\text{Watt/m}^2 = (\text{Volt/metro} \times \text{Volt/metro}) : 377$$

$$\text{Amper/metro} = \text{Volt/metro} : 377$$

**Nota** = il numero 377, presente in queste formule, è l'**impedenza** caratteristica dello spazio vuoto.

Quindi una tensione di **6 Volt/metro** corrisponde a:

$$(6 \times 6) : 377 = 0,09549 \text{ Watt/metroquadrato}$$

che sono equivalenti a:

$$6 : 377 = 0,0159 \text{ Amper/metro}$$

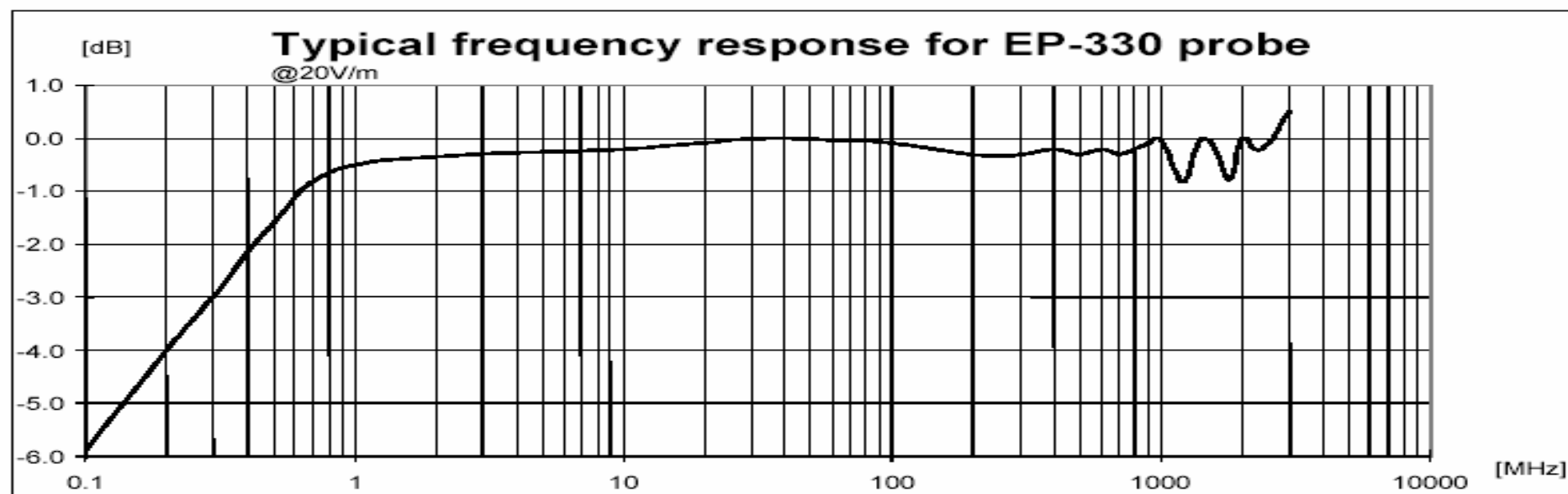
Questi numeri vengono spesso arrotondati sul valore di **0,1 Watt/m<sup>2</sup>** e **0,016 Amper/metro**.





## ELECTRIC FIELD PROBE EP-330

Campo di frequenza	100 kHz - 3 GHz
Portata	0,3 - 300 V/m
Sovraccarico	> 600 V/m
Dinamica	> 60 dB
Risoluzione	0,01 V/m
Sensibilità	0,3 V/m
Errore assoluto @ 50 MHz e 20 V/m	$\pm 0,8$ dB
Piattezza (10 - 300 MHz)	$\pm 0,5$ dB
Piattezza (3 MHz - 3 GHz)	$\pm 1,5$ dB
Isotropicità	$\pm 0,8$ dB (Tipico $\pm 0,5$ dB @ 930 e 1800 MHz)
Reiezione campo magnetico	> 20 dB $20^{\circ}\text{C} \div 60^{\circ}\text{C} = \pm 0,1$ dB $0^{\circ}\text{C} \div 20^{\circ}\text{C} = -0,05$ dB/ $^{\circ}\text{C}$ $-20^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C} = -0,15$ dB/ $^{\circ}\text{C}$
Errore in temperatura	
Calibrazione	E <sup>2</sup> PROM interna
Dimensioni	317 mm lunghezza, 58 mm diametro
Peso	100 g

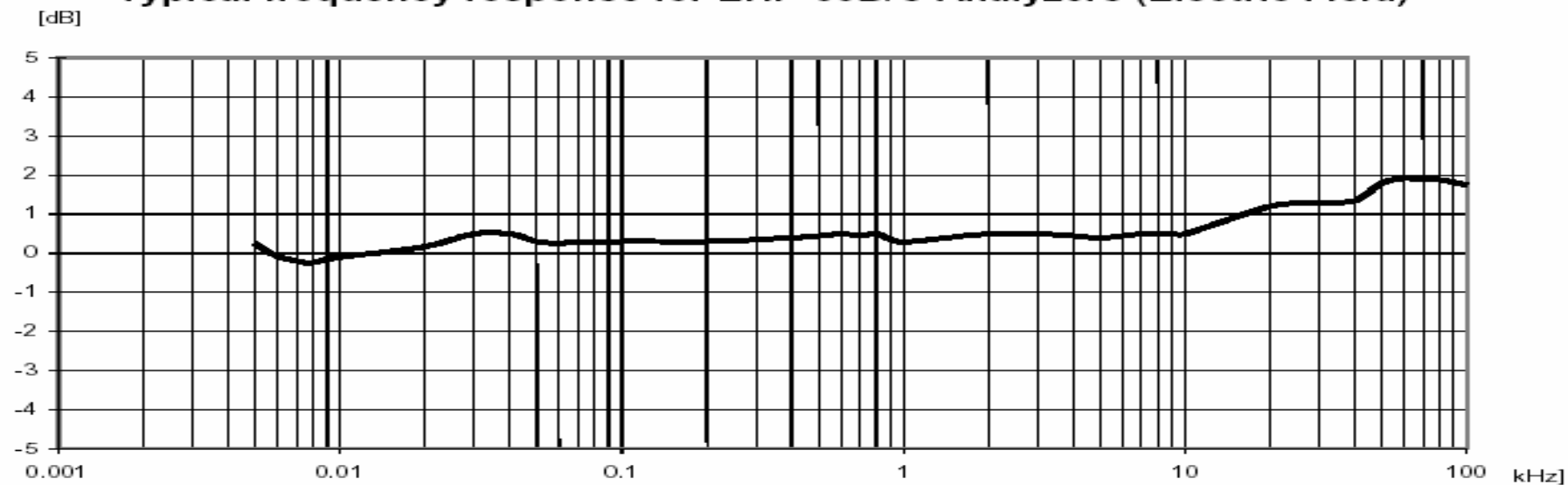


# **ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD ANALYZER EHP-50B**

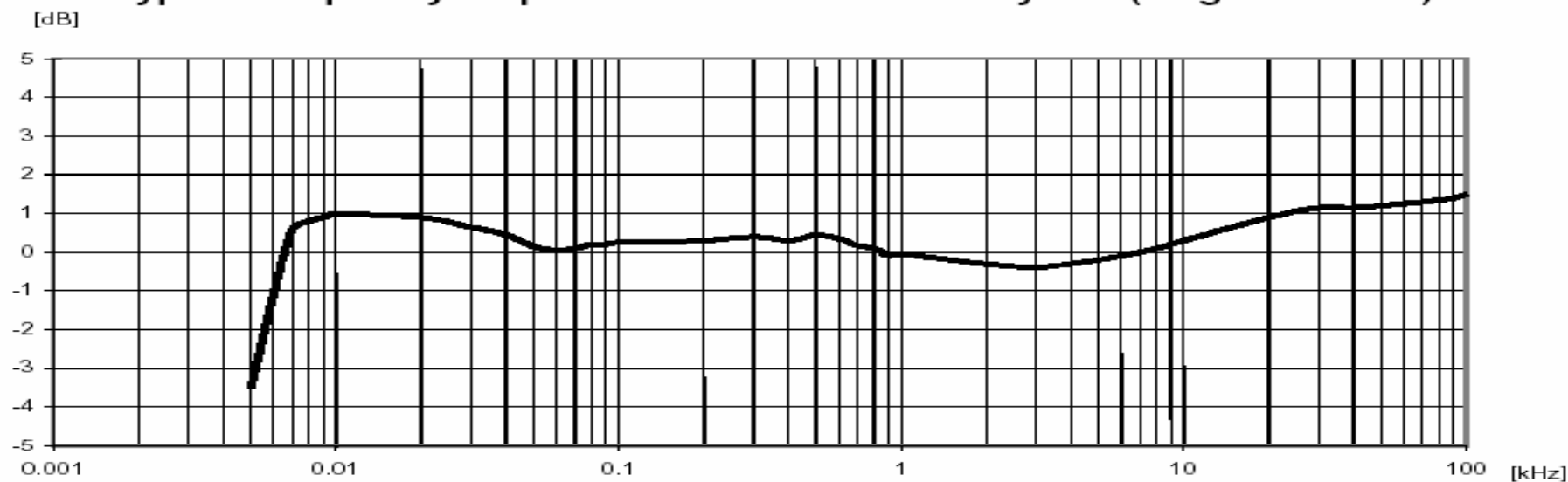
	<b>Campo elettrico</b>	<b>Campo magnetico</b>
Campo di frequenza	5 Hz – 100 kHz	
Portata	0.01 V/m – 100 kV/m	1 nT – 10 mT
Sovraccarico	200 kV/m @ 50 Hz	20 mT @ 50 Hz
Dinamica		> 140 dB
Risoluzione	0.001 V/m	1 nT
Sensibilità	0.01 V/m	10 nT
Errore assoluto	± 0.5 dB (@ 50 Hz e 1 kV/m)	± 0.5 dB (@ 50 Hz e 0.1 mT)
Piattezza (40 Hz – 10 kHz)	± 0,5 dB	± 0,5 dB
Isotropicità		± 1 dB
Linearità a 50 Hz	± 0.2 dB (1 V/m – 100 kV/m)	± 0.2 dB (200 nT – 10 mT)
SPAN	100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 10 kHz, 100 kHz	1,2 % dello SPAN
Frequenza di Start		Uguale allo SPAN
Frequenza di Stop		
Reiezione ai campi elettrici	---	> 20 dB
Reiezione ai campi magnetici	> 20 dB	---
Calibrazione		E <sup>2</sup> PROM interna
Errore in temperatura		0.05 dB/°C
Dimensioni		96 x 96 x 115 mm
Peso		525 g
Attacco treppiede		Inserto filettato ¼ "
Batterie interne		Batterie NiMH rettangolari (5 x 1.2 V)
Tempi di funzionamento	> 10 h	> 150 h in modalità basso consumo
Tempi di ricarica		< 4 h
Alimentazione esterna DC		DC, 10-15 V, I = circa 200 mA
Connessine fibra ottica		Fino a 80m
Aggiornamento firmware		Aggiornamento attraverso porta seriale
Autoverifica		Automatica dall'accensione
Temperatura di lavoro		-10 a +40°C
Temperatura di immagazzinamento		-20 a +70°C



**Typical frequency response for EHP-50B/C Analyzers (Electric Field)**



**Typical frequency response for EHP-50B/C Analyzers (Magnetic Field)**





# CONCLUSIONI

- ◆ Le 24 misure effettuate hanno interessato l'area compresa tra Sperone, Ganzirri e Torre Faro.
- ◆ I rilevamenti sono stati effettuati con sensori isotropici e analizzatore di spettro.
- ◆ Non sono state riscontrate anomalie nei valori rilevati i quali sono risultati al di sotto dei limiti imposti dalla legge.