



# Trasmissione dell'informazione con Onde Elettromagnetiche

---

## Impatto ambientale e sanitario delle onde elettromagnetiche

### 1. *La condivisione dell'ambiente radioelettrico*

Il concetto da cui intendiamo partire è che l'ambiente radioelettrico non ha proprietari né confini: è un ambiente aperto, condiviso, in cui tutte le emissioni naturali e artificiali convivono e si diffondono. Ora, questo ambiente è condiviso non solo da sistemi che generano ed utilizzano campi elettrici e magnetici, bensì anche dall'uomo e da altri organismi biologici che con tali campi si trovano a convivere. Un conduttore immerso in un campo elettrico/magnetico diventa sede di corrente, raccoglie e dissipa energia; se ciò è vero per i sistemi di telecomunicazione, lo è anche per tessuti biologici quando sono investiti da una qualsiasi forma di energia radiante.

I livelli di esposizione sono aumentati negli ultimi cento anni di molti ordini di grandezza: in larga approssimazione tale crescita è pari a **un ordine di grandezza ogni dieci anni**. E' facile intuire che dal tempo in cui è iniziato l'utilizzo industriale e domestico dell'elettricità, e ancor di più dall'invenzione della radiocomunicazione, l'ambiente in cui l'uomo vive è divenuto sede di emissioni di energia, sempre più intense e a lui vicine.

Ciò ha favorito la diffusione popolare di termini come "elettrosmog" o "inquinamento elettromagnetico". L'energia elettromagnetica viene percepita come una forma subdola di inquinamento, in quanto non visibile e non percepibile; ma è anche bene chiarire subito che tale energia viene diffusa nell'ambiente per compiere un servizio, un servizio per di più pregiato, richiesto e ormai inalienabile.

Non ha quindi niente da spartire col concetto di "inquinamento" comunemente inteso: scorie di lavorazione o prodotti secondari di processi industriali rappresentano inquinamento quando vengono diffusi o abbandonati nell'ambiente, per lo più contravvenendo a norme di protezione dell'ambiente e della salute umana, e quindi creando reali condizioni di rischio.

Le onde elettromagnetiche vengono utilizzate in tantissimi settori dell'attività umana: sistemi di radiodiffusione sonora e televisiva, sistemi di telefonia cellulare pubblica, e numerosi altri sistemi, che vanno dalle reti radio private, agli apparati militari, ai sistemi satellitari e quant'altro.

Si tratta di emissioni intenzionali, ovvero pensate per dare un servizio connesso con la possibilità di comunicare. I radiatori intenzionali hanno caratteristiche note in termini di frequenza generata, potenza emessa, polarizzazione, diagramma di radiazione, tipo di modulazione; e quindi è possibile caratterizzare tali sorgenti.

Esistono invece sorgenti non intenzionali le cui caratteristiche di irradiazione non sono caratterizzate, in quanto il loro impiego non è legato all'irradiazione di un segnale, ma per lo più alla generazione di energia. Si tratta di apparecchi per applicazioni biomedicali (marconiterapia, radarterapia, ipertermia) o per applicazioni industriali (riscaldatori a perdite dielettriche, a induzione magnetica, a microonde). Non va dimenticato il fondo elettromagnetico naturale e tutte le emissioni connesse con la presenza di circuiti elettrici ed elettronici, non ultimi i sistemi di accensione delle autovetture.

## 2. **La compatibilità elettromagnetica**

La presenza nell'ambiente di campi e.m. difficilmente controllabili crea un problema di compatibilità, su due versanti:

- da un punto di vista tecnologico, c'è anche di modesta entità possono provocare malfunzionamenti di apparati elettronici od elettrici;
- sotto l'aspetto sanitario, si sospetta che i cem di una certa entità possano determinare effetti biologici sugli organismi viventi.

Per quanto riguarda la compatibilità tra apparati, si parla di **suscettibilità** per indicare il grado di riduzione nelle prestazioni subito da un oggetto con funzionalità elettriche quando sottoposto a campi presenti nell'ambiente in cui esso opera; il termine **emissione** viene invece usato per definire e quantizzare di che tipo e di che intensità siano le radiazioni non intenzionali prodotte da un determinato apparato elettrico o elettronico.

Nel caso di emissioni intenzionali, oggi assistiamo ad una crescita esponenziale di apparati che utilizzano onde radioelettriche, e ciò ha originato nella popolazione una forte sensibilità verso i possibili rischi connessi con la salute, ingigantiti anche dal forte impatto visivo delle antenne nel territorio. Ecco perché oggi è più che mai necessario che le Amministrazioni competenti si attivino per monitorare e regolamentare questo settore, anche per disporre di riferimenti normativi per le procedure di autorizzazione e controllo.

## 3. **Il principio di precauzione**

Questo termine implica una politica di gestione del rischio, da applicarsi nel caso di elevata incertezza scientifica. In questo caso il principio di precauzione suggerisce di attivare politiche adeguate nei confronti di un rischio potenzialmente alto, senza attendere i risultati della ricerca scientifica. Nel Febbraio del 2000 la Commissione europea ha emanato una importante raccomandazione basata sul principio di precauzione, fornendo anche adeguate linee guida applicative.

Il principio di precauzione richiede una valutazione dei rischi, comprese considerazioni di costo/beneficio. Andrebbe impiegato per fornire risposte provvisorie a minacce potenzialmente gravi per la salute, fino a che non siano possibili azioni fondate su base scientifica più certa.

## 4. **Energia, materia ed esposizione**

Nello spettro elettromagnetico, il sottoinsieme delle frequenze utilizzate nel **campo delle radiocomunicazioni** si estende dalle radiofrequenze (RF, nella gamma 30 KHz - 300 MHz), alle microonde (MW, nella gamma 300 MHz - 300 GHz).

Le radiazioni con le frequenze più elevate possiedono un particolare comportamento "granulare", ovvero si propagano non in maniera continua, bensì sotto forma di granuli di energia o "quanti". I quanti rappresentano valori minimi indivisibili di energia il cui valore  $E$  è direttamente proporzionale alla frequenza  $f$  della radiazione ad essi associata, secondo la relazione:

$$E = h \cdot f$$

dove  $h$  è una costante universale (costante di Plank). La figura mostra i valori di  $E$  in funzione della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica. L'energia è espressa in *elettronvolt* (**Ev**), una unità di misura che corrisponde all'energia acquisita o ceduta da un elettrone quando si sposta tra due punti la cui differenza di potenziale è pari ad 1 Volt. Valori particolarmente elevati di energia possono produrre fenomeni di **ionizzazione** della materia biologica: molti elementi chimici che costituiscono la materia vivente (ossigeno, idrogeno, carbonio, azoto), se sottoposti a campi e.m. con energia superiore a circa 12 eV, possono venire ionizzati. Ciò significa che si può provocare un'interazione tra energia e materia a livello molecolare, e ciò rappresenta una modifica strutturale della materia. E', in definitiva, una mutazione che coinvolge la molecola, e nel caso di tessuti biologici ciò può portare alla creazione di anomalie e la generazione di cellule tumorali.

**Radiazioni ionizzanti** sono ad esempio i raggi X, i raggi ultravioletti, i raggi gamma e cosmici, che come si nota possiedono elevati valori di energia quantistica.  
 Per contro le radiazioni i cui valori di frequenza sono inferiori a 300 GHz ( $E < 1$  milliElettronVolt) sono considerate **radiazioni non ionizzanti** (NIR = Not Ionizing Radiations).

Frequenza	Lunghezza d'onda	Energia quantistica	Caratteristiche della banda e utilizzazione
$10^{21}$ Hz	1 pm	1 MeV	Raggi gamma, raggi cosmici
$10^{18}$ Hz	1 nm	1KeV	Raggi X
$10^{15}$ Hz	1 $\mu$ m	1 eV	Raggi Ultravioletti
$10^{12}$ Hz	1 mm	1 meV	Radiaz. luminosa
$10^9$ Hz	1 m	1 $\mu$ eV	Raggi Infrarossi
$10^6$ Hz	1 Km		Gamme SHF, EHF (Ponti radio, satelliti)
			Gamme VHF, UHF (Radio/TV broadcasting, Radiomobile)
			Gamme MF, HF (Radiocomunicazioni terrestri e ionosferiche)
			Gamme VLF, LF (Telefonia, aiuto alla navigazione)

Dal punto di vista fisico un'onda elettromagnetica deve considerarsi come l'insieme inscindibile di un vettore di campo elettrico **E**, il cui modulo si misura in Volt/metro, e dal vettore di campo magnetico **H**, il cui modulo si misura in Amper/m[MA1]. Un'onda elettromagnetica che si propaga nello spazio trasporta nell'unità di tempo e per unità di superficie una quantità di energia che dipende dalle intensità del campo elettrico e di quello magnetico, e il cui prodotto è il cosiddetto vettore di Poynting **S**:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{H}$$

Il modulo del vettore di Poynting, noto come **densità di potenza**, si misura in **Watt/m<sup>2</sup>** e nel vuoto vale:

$$S = E^2/R_0$$

dove **E** rappresenta il valore efficace dell'intensità di campo elettrico, e **R<sub>0</sub>** è la resistenza caratteristica dello spazio vuoto, pari a 377  $\Omega$ .

Queste grandezze caratterizzano dunque il campo elettromagnetico che si propaga nello spazio, grandezze oggettive misurabili mediante opportuna strumentazione.

Si parla di **esposizione** quando si introduce il concetto soggettivo di *persona investita dalla radiazione elettromagnetica*. Occorre premettere che da sempre l'uomo ha convissuto con radiazioni di fondo emesse dal Sole e da altri corpi celesti, dalla Terra stessa, e in generale da qualunque corpo con temperatura diversa dallo zero assoluto. L'entità delle emissioni naturali nella gamma delle radiazioni non ionizzanti è dell'ordine di circa  $10 \text{ pW/cm}^2$ , valore del tutto trascurabile rispetto all'intensità delle radiazioni prodotte da sorgenti artificiali, che risultano superiori di  $6 \div 12$  ordini di grandezza. Ciò ha sollevato in tempi molto recenti una vasta problematica, proprio perché l'esposizione ai campi elettrici e magnetici ha come conseguenza un **assorbimento** di energia elettromagnetica nei tessuti del corpo umano, con possibili implicazione sanitarie.

## 5. Sorgenti RF e MW

Al di sopra dei 30 KHz l'emissione radiante ha caratteristiche tipicamente elettromagnetiche, in cui il campo elettrico e quello magnetico sono intimamente associati e inscindibili. Ai fini dell'utilizzazione delle radiazioni elettromagnetiche la ITU (International Telecommunications Union) ha suddiviso la parte dello spettro elettromagnetico comunemente usata per le telecomunicazioni in bande di frequenza per ordini di grandezza, e di queste vengono definite:

- RF (RadioFrequencies) le bande comprese tra 30 KHz e 300 MHz
- MW (MicroWave) le bande comprese fra 300 MHz e 300 GHz.

Ma quali sono, in maggior dettaglio, le possibili sorgenti di radiazioni elettromagnetiche RF e MW? Esse si possono classificare nei quattro settori fondamentali illustrati in dettaglio nel box seguente.

### •1. Telecomunicazioni e radiolocalizzazioni

- 1a. Sistemi a fascio (radar, ponti radio, collegamenti spaziali e satellitari)
- 1b. Sistemi broadcast (diffusione di segnali radio e TV, reti di telefonia cellulare e paging, sistemi radio privati, radiofari, ecc.).

Questo settore fa uso sia di RF che di MW. L'esposizione è concentrata nelle aree ad alta densità di popolazione, ed è dovuta in larga maggioranza ai sistemi di cui in 1b.

### 2. Processi produttivi

- 2a. Riscaldamento induttivo ad alta frequenza per trattamenti termici e fusione di metalli; tecnologia dei plasmi - frequenze tra 80 KHz e 5 MHz con potenze fino a 400 KW;
- 2b. Processi di incollaggio di carte, tessuti, legno; processi di saldatura della plastica e del legno – frequenze fra 3 e 50 MHz, con potenze fino a 200 KW;
- 2c. Processi di distruzione degli insetti e larve in cereali e tabacco; eliminazione di tarli dal legno – frequenze nel range delle MW, con potenze fino a 100 KW;
- 2d. Industria alimentare (essiccazione di paste, sterilizzazione cibi, industria dei cibi precotti, scongelamento rapido surgelati - frequenze nel range delle MW, con potenze fino a 100

KW.

Questo settore riguarda ambienti confinati e il rischio è per i lavoratori addetti.

### 3. Attività domestiche

- 3a. Forni a microonde - frequenze fra 0,3 e 3 GHz, con potenze fino a 1200 W.

Questo settore riguarda ambienti confinati e le persone esposte sono gli individui della popolazione.

### 4. Applicazioni mediche

- 4a. Fisioterapia (marconiterapia), Ipertermia (terapia dei tumori)
- 4b. NMR (Risonanza Magnetica Nucleare) – Diagnostica con tecniche di imaging.

Le frequenze utilizzate, incluse in un elenco stabilito nel World Administrative Radio Conference di Ginevra (1979) per applicazioni industriali, scientifiche e mediche (ISN), sono comprese tra 27 e 2450 MHz, con potenze inferiori a 200 W. Il rischio dell'esposizione vale tanto per gli operatori che per i pazienti.

## 6. **Misura delle radiazioni assorbite**

Nel campo della protezione dai campi elettromagnetici non ionizzanti capita d'incontrare parole come **interazione**, **effetto biologico**, **danno**, che sembrano riflettere una certa confusione di concetti. Quando un organismo interagisce con campi elettromagnetici il suo equilibrio viene perturbato, ma questo non si traduce automaticamente in un *effetto biologico* apprezzabile e ancora meno in un *danno*. Si parla infatti di *effetto biologico* solo in presenza di variazioni morfologiche o funzionali a carico di strutture di livello superiore. E non sempre un **effetto biologico** comporta necessariamente un **danno alla salute**. Per poter parlare di danno occorre infatti che l'effetto biologico superi i limiti di efficacia dei meccanismi di adattamento dell'organismo, meccanismi le cui caratteristiche variano con l'età, il sesso, lo stato di salute, il tipo e il grado di attività del soggetto, nonché con le condizioni ambientali esterne, e ovviamente, dall'intensità della radiazione incidente sul soggetto.

Per misurare in modo attendibile gli effetti dell'esposizione a campi elettromagnetici di organismi biologici occorrono parametri specifici, in base ai quali dovrà poi essere possibile valutare anche gli effetti indotti dall'irradiazione.

Per le radiazioni e.m. questo parametro è il **SAR**, acronimo di **Specific Absorption Rate** (ovvero, *tasso di assorbimento specifico*) definito come la quantità di energia trasferita ad un elemento di massa di un sistema biologico; 1 SAR equivale alla potenza assorbita dai tessuti fisiologici in **Watt per Kilogrammo** di peso corporeo.

Il valore del SAR è tanto più elevato quanto maggiore è la potenza elettromagnetica assorbita, mentre tende a diminuire all'aumentare della massa biologica esposta all'irradiazione. Si noti che tale concetto, assimilabile al quello di dosimetria utilizzato nel caso di radiazioni ionizzanti, in realtà se ne discosta in quanto l'assorbimento di energia, nel caso di esposizioni a RF e MW, non è considerato un **fenomeno cumulativo**.

Il SAR dipende dal quadrato del valore del campo elettrico nel punto considerato per la misurazione; inoltre dipende da numerosi altri fattori:

- dalla frequenza della radiazione, dalla polarizzazione e dalla configurazione del campo;
- dalle caratteristiche del corpo esposto (dimensioni, geometria, proprietà dielettriche dei tessuti attraversati);
- dagli effetti di terra e di riflessione di altri oggetti presenti nel campo di irradiazione (ad es. superfici metalliche vicine al corpo esposto).

Non va sottovalutata la **dipendenza del SAR dalla frequenza**, perché può realizzarsi una condizione di risonanza del corpo irradiato con la lunghezza d'onda della radiazione. Ad esempio, la testa umana risuona alla frequenza di 375 MHz: ciò significa che l'assorbimento di energia è maggiore a tale frequenza che per altre. Un uomo di altezza standard (1,75 m), in posizione eretta e non "posto a terra", presenta una frequenza di risonanza di circa 70 MHz, e quindi un SAR diverso da quello di persone più basse o di bambini, la cui frequenza di risonanza si pone a circa 100 MHz. In altre parole, il corpo umano si comporta come "antenna ricevente" sintonizzata su particolari lunghezze d'onda; si veda al proposito la figura che illustra la dipendenza del SAR dall'altezza del soggetto umano irradiato.

## 7. **La misura del campo elettromagnetico**

In Italia, a partire dagli anni '70 e in assenza di regole, sono proliferate emittenti radiofoniche e televisive in numero esagerato: più di 2400 radio e 700 televisioni (pari a 1/3 di quelle presenti in tutto il mondo), e spesso non sufficientemente lontane da case di civile abitazione o da edifici pubblici. Alcune Regioni italiane definirono alla fine degli anni '80 propri limiti di esposizione; finché tutte le leggi regionali furono poi rese organiche dal **Decreto legge 10 Settembre 1998 numero 381**, entrato in vigore il 2 Gennaio 1999, che fissa i limiti di esposizione a cui può essere sottoposta la popolazione civile secondo i valori riportati nella tabella.

I valori indicati devono considerarsi applicati su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano;

- si riferiscono ad una esposizione di durata continua di sei minuti;
- non si applicano ai lavoratori esposti per ragioni professionali; questi lavoratori sono individuate come persone adulte, consapevoli di essere esposte a rischio e capaci di adottare determinate precauzioni, quindi meno indifese della generica popolazione civile. I limiti di esposizione per i lavoratori, nelle legislazioni di molte Nazioni, sono di regola superiori di cinque volte rispetto ai limiti validi per il pubblico;
- si abbassano in prossimità di **scuole e ospedali**, in cui i valori da non superare, indipendentemente dalla frequenza, sono pari a 6 V/m per il campo elettrico, 0,016 A/m per il campo magnetico e, per frequenze comprese tra 3 MHz e 300 GHz, 0,10 W/m<sup>2</sup> per la densità di potenza.

Frequenza	Valore efficace di campo elettrico	Valore efficace di campo magnetico	Densità di potenza dell'onda equivalente
100 KHz – 3 MHz	60 V/m	0,2 A/m	
3 MHz – 3000 MHz	40 V/m	0,05 A/m	1 W/m <sup>2</sup>
3 GHz – 300 GHz	20 V/m	0,1 A/m	4 W/m <sup>2</sup>

Dall'entrata in vigore del decreto i nuovi impianti devono essere costruiti in modo conforme alla normativa in questione, e sempre mirando a produrre valori di campo il più basso possibile, compatibilmente con la qualità del servizio. Per gli impianti esistenti alle Società proprietarie veniva dato un arco di **dieci anni per mettersi in regola**.

Il problema che si pone riguarda dunque la **misurazione dei valori di campo** nei luoghi di vita della popolazione, non solo in quanto richiesti dalle Norme oggi vigenti, come per l'Italia il suddetto **Decreto legge 10 Settembre 1998 numero 381**, ma anche per andare incontro e dare una risposta concreta alle crescenti preoccupazioni della popolazione civile.

Molte organizzazioni scientifiche e di normazione tecnica sottolineano l'importanza di definire metodi normalizzati per la valutazione dei campi elettromagnetici che garantiscano sia la riferibilità dei sistemi di misura, sia l'accuratezza della misura stessa. E pertanto:

- la strumentazione utilizzata deve essere tarata e riferita ai campioni nazionali, e regolarmente verificata;
- le procedure di misura devono essere normalizzate al fine di ottenere risultati riproducibili;
- la scelta delle suddette procedure deve essere orientata a minimizzare l'incertezza totale della misura.

Nel caso di misure nelle bande **a RF e MW**, per rilevazioni aventi essenzialmente fine protezionistico, occorre preventivamente conoscere la tipologia, la dislocazione e le caratteristiche delle sorgenti di radiazioni. Occorre inoltre individuare le condizioni più sfavorevoli di esposizione per le persone, cioè quelle che si avrebbero se tutti i parametri concorrenti (ad es. massima potenza di emissione, direzionalità e distribuzione della radiazione, ecc.) dessero contemporaneamente il massimo contributo negativo.

La scelta della strumentazione occorrente per i rilievi dipende da tali informazioni preventive, e a seconda del grado di precisione richiesto o del fine della misura, si può procedere gradualmente all'impiego di strumentazione sempre più raffinata e puntuale. Il primo passo di norma è l'utilizzo di un **misuratore isotropico a larga banda** della densità di potenza del campo elettromagnetico. La qualità di questo strumento risiede nella sua capacità di fornire minimo errore sia nella risposta in frequenza, sia nel livello misurato, sia nell'isotropia dell'antenna.



Un passo successivo può consistere nel distinguere le emissioni in base alla loro frequenza, allo scopo di **individuare le sorgenti** che contribuiscono alla potenza globale misurata nella fase precedente. In tal caso occorre utilizzare un **analizzatore di spettro**, avente una gamma operativa che copra l'intero spettro d'indagine. Associato all'analizzatore di spettro si dovrà impiegare un'**antenna a larga banda**, con curva di risposta calibrata; se tale antenna sarà di tipo direttivo, renderà possibile individuare anche la **direzione di provenienza** dei segnali sotto esame.

## **8. La misura a larga banda**

Notoriamente la distribuzione dell'energia e.m. nell'ambiente dovuta alla propagazione troposferica si realizza secondo criteri aleatori dovuti alla grande quantità di percorsi del segnale radioelettrico, conseguenti a riflessioni e rifrazioni su ostacoli naturali e artificiali. La misura del campo e.m. deve quindi realizzare una mappatura della zona indagata, al fine di individuare i punti a rischio potenzialmente più alto. A tal fine la campagna di misura dovrà essere circoscritta ad un territorio o ad un insediamento preventivamente concordato, di cui dovrà essere messa a disposizione una particolareggiata descrizione topografica (carta topografica del territorio alla massima scala, pianta degli edifici suddivisa per piani). Il risultato dell'indagine consisterà nella mappatura dei valori riscontrati entro un territorio inscritto in una circonferenza di determinato raggio con centro nell'impianto trasmittente, e nella evidenziazione dei superamenti delle soglie prescritte.

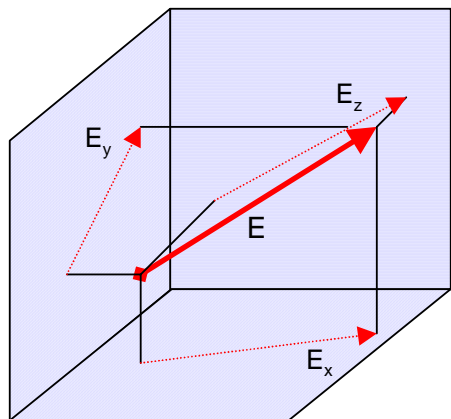
Gli strumenti appartenenti a questa categoria sono generalmente di tipo isotropico, a larga banda e formati essenzialmente da due elementi: un'antenna o sensore, e uno strumento indicatore. Il sensore è costituito da un elemento sensibile al campo elettrico (un dipolo di dimensioni trascurabili rispetto alla lunghezza d'onda) o al campo magnetico (una piccola spira). Nel caso di misure su segnali nelle bande VHF o UHF, in cui è facile realizzare la condizione di Far Field, è prassi corrente misurare solo il campo elettrico; in Far Field infatti, il campo elettrico, il campo magnetico e la densità di potenza sono direttamente correlati fra loro attraverso l'impedenza dello spazio. L'uso di dipoli corti caricati con diodi rivelatori, è fondamentale per avere un sensore in grado di lavorare su una ampia gamma di frequenze, tipicamente da 100 KHz a 3 GHz, con una risposta in frequenza il più possibile piatta.

Per rendere la misura indipendente dalla direzione da cui proviene il campo, il sensore deve risultare per quanto possibile isotropico, utilizzando tecnologie del tipo indicato nel paragrafo successivo, tipicamente con tre dipoli opportunamente orientati. La precisione della misura richiede che i tre dipoli abbiano centro elettrico coincidente e non si influenzino reciprocamente. Il rivelatore al centro di ogni dipolo fornisce una corrente continua proporzionale al quadrato dell'intensità di campo e.m.; i contributi forniti dai tre rivelatori vengono poi trattati da un circuito elettronico che ne ricava il valore quadratico medio (vettore), che viene poi indicato su un display opportunamente tarato in valori di campo elettrico (Volt/metro) o di densità di potenza (Watt/m<sup>2</sup>).

Per l'intera durata della misura (6 minuti, secondo le prescrizioni del DL 381) lo strumento verrà posto su di un cavalletto dielettrico e lontano da strutture metalliche (per non perturbare il campo misurato), e la misura verrà ripetuta a due distinte quote, corrispondenti ad un'altezza da terra del centro elettrico dell'antenna pari rispettivamente a 110 cm e 190 cm.

## **9. Il sensore isotropo**

Parlando di un'antenna o di un sensore, l'isotropia perfetta si otterrebbe quando il suo diagramma di radiazione fosse perfettamente sferico, condizione realizzabile solo alla condizione che l'antenna sia ridotta ad un punto, e quindi solo teorica. Nel caso di misure di radioprotezione, tuttavia, è richiesto che il sensore possieda nella massima misura possibile una capacità isotropa, per poter raccogliere emissioni di cui non sia nota né la direzione di provenienza, né la polarizzazione.

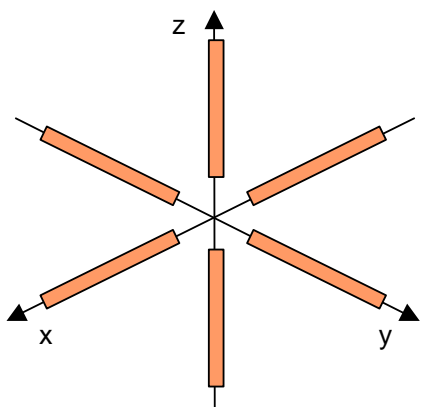
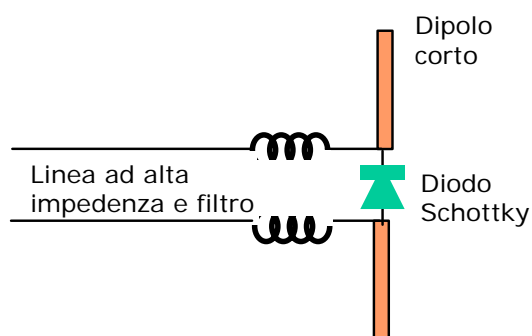


Dato un vettore  $E$ , comunque orientato nello spazio, il suo modulo può essere completamente descritto qualora siano note le proiezioni  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  del vettore stesso sui tre piani ortogonali  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Il modulo di  $E$  vale:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

Tale principio viene applicato nel campo delle misure sui campi elettromagnetici: si tratta di realizzare un sensore capace di rilevare le ampiezze delle componenti su tre assi ortogonali, e farne la somma quadratica.

Ogni componente verrà raccolta da un elemento sensibile al campo elettrico (un dipolo di dimensioni trascurabili rispetto alla lunghezza d'onda) o al campo magnetico (una piccola spira). Sensori per il campo elettrico, in grado di lavorare su un'ampia gamma di frequenze (tipicamente da 100 KHz a 3 GHz, con una risposta in frequenza il più possibile uniforme), si realizzano utilizzando dipoli corti caricati direttamente con diodi rivelatori.

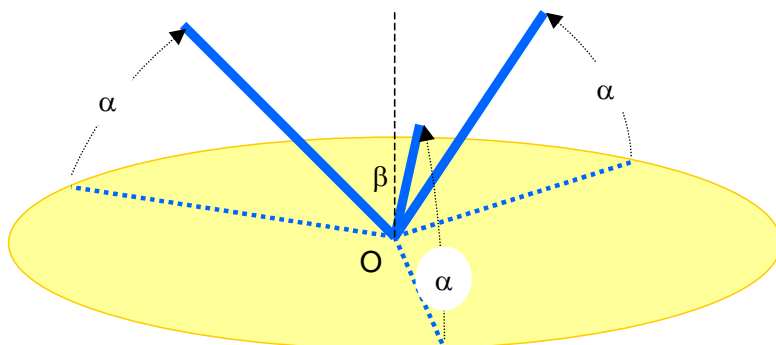


Verrebbe immediato concepire un sensore isotropico come l'insieme di tre dipoli lineari (allineati sugli assi  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), il cui centro elettrico (centro del dipolo) sia un punto comune alla terna. Si può però intuire che tale disposizione non risulti realizzabile con semplicità, per cui si ricorre spesso ad una diversa soluzione, in cui i dipoli risultano disposti su tre piani reciprocamente angolati di  $120^\circ$ .

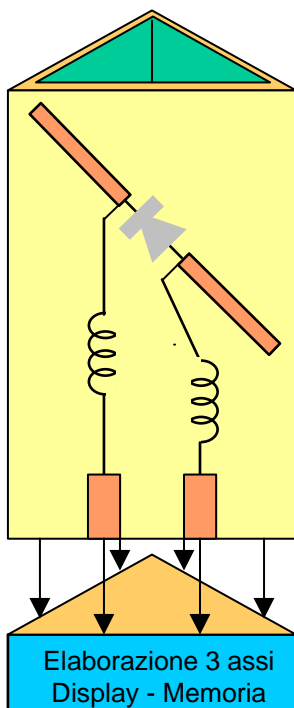
Il quesito che ci poniamo è come realizzare l'ortogonalità di tre segmenti, disposti su piani orientati reciprocamente con angoli di  $120^\circ$ .

I tre segmenti appoggiati sul piano orizzontale di riferimento (vedi figura seguente) abbiano un punto di vincolo al centro del piano (punto  $O$ ), in modo tale che possano ruotare muovendosi su altrettanti piani verticali angolati reciprocamente di  $120^\circ$ . Provocando una rotazione dei segmenti con perno in  $O$  (indicata con le frecce tratteggiate), i tre segmenti si sollevano dal piano.

Appare evidente che, nel corso di tale rotazione, l'angolo reciproco tra segmento e segmento ( $\beta$ ) diminuirà gradatamente e quindi attraverserà necessariamente una posizione in cui  $\beta$  assumerà il valore di  $90^\circ$ . Tale condizione è correlata con l'angolo di elevazione  $\alpha$  dei segmenti rispetto al piano di riferimento. Si può facilmente calcolare che per un angolo  $\alpha$  pari a  $54,74^\circ$ , l'angolo  $\beta$  tra segmento e segmento è pari a  $90^\circ$ , realizzando così una terna allineata su tre assi fra loro ortogonali nello spazio.







La geometria triassiale sopra descritta si presta per realizzare un sensore isotropo, capace quindi di raccogliere le tre proiezioni spaziali del vettore E. Si tratta dunque di realizzare un sistema di tre dipoli disposti su piani a  $120^\circ$ , le cui uscite rivelate dai diodi posti al loro centro verranno elaborate da un circuito che ne eseguirà la somma quadratica.

Una tipica disposizione utilizzata nei moderni misuratori a larga banda prevede che ogni dipolo, insieme ai componenti correlati, venga stampato su una lastrina di vetroresina ramata, rispettando l'inclinazione di  $54,74^\circ$ . Tre lastrine disposte sui lati di un prisma equilatero realizzano la voluta configurazione isotropica, il cui centro di fase è sull'asse del prisma.

Nel caso di misure selettive, può ancora venire utilizzata la disposizione triassiale, utilizzando un sensore capace di allineare il suo diagramma di radiazione (con forma a 8, come il dipolo) su tre assi ortogonali, quando venga posizionato successivamente lungo tre direttrici fra loro differenziate di  $120^\circ$  sul piano orizzontale.

La foto mostra una tipica antenna per misure selettive: si tratta di una piccola biconica a larga banda (80 MHz - 2000 MHz) montata su un opportuno supporto che conferisce l'inclinazione di  $54,74^\circ$  e capace di eseguire il movimento sopra indicato. Un analizzatore di spettro collegato all'antenna sarà quindi in grado di raccogliere - separatamente e in tempi successivi - i contributi (distinti secondo gli assi x,y,z) di una qualsiasi portante, il cui vettore possieda una qualunque polarizzazione arbitrariamente disposta nello spazio.

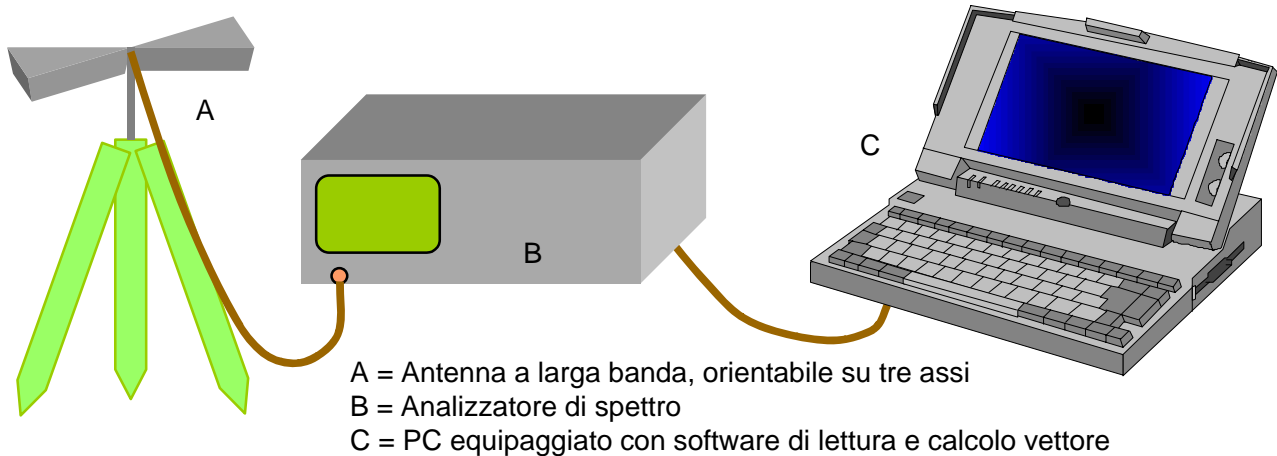
La vite metallica che unisce la base triangolare con la struttura verticale funge anche da perno per la rotazione di quest'ultima attorno ad un asse verticale (linea tratteggiata), che passa per il centro elettrico della biconica. Ciò significa che la biconica mantiene fisso nello spazio il suo centro elettrico, anche mentre viene fatta ruotare.



## 10. La misura a banda stretta

Il banco per misure selettive impiega l'analizzatore di spettro o un ricevitore di misura, strumenti che si distinguono per le loro spiccate caratteristiche di selettività, cioè di separazione di segnali differenziati in frequenza.

Il banco riportato in figura è pensato per effettuare misure in modo automatico dell'intensità di campo elettrico irradiato da più trasmettitori. Si nota l'antenna, un sensore con banda molto estesa e basso guadagno (del tipo visto sopra), posto su sostegno dielettrico ad un'altezza di m. 1,50 dal suolo.



Il sensore è connesso all'ingresso RF dell'analizzatore di spettro, il cui range di scansione determina l'estensione della banda misurata. Viene definito il valore in ampiezza del fondo scala, in funzione dell'intensità dei segnali presenti nella zona, ed anche il parametro BW (Bandwidth) che determina la selettività della misura.

I dati ricavati dall'analizzatore vengono trattati da un Computer, equipaggiato con un programma capace di memorizzare i dati forniti dalla misura, identificare le portanti, assegnarne il valore in funzione dell'asse su cui sono state misurate, ed infine calcolare per ognuna il valore del vettore. Il risultato della misura è quindi il valore del vettore per ciascuna portante rilevata, e l'insieme dei vettori viene fornito in forma tabellare o in forma grafica, qualora la misura debba essere corredata della configurazione dello spettro raccolto sul sito di misura.

## 11. La distanza di rispetto dalle antenne trasmettenti

Poiché notoriamente il valore di campo irradiato è massimo in corrispondenza dell'antenna trasmittente e si attenua in funzione della distanza, è possibile identificare i **confini di pericolosità** degli impianti radianti utilizzando un misuratore di campo che permetta di intercettare su tutte le direttrici spaziali con origine nell'antenna, un punto in cui il campo assume un determinato valore limite, tipicamente quello pari a **20 V/m** imposto in Italia dal **D.L. 381/98**. Il luogo dei punti che si viene a formare attorno all'antenna disegna il **volume di rispetto**, che dipende sostanzialmente dal diagramma di radiazione dell'antenna.

Il volume di rispetto deve essere interdetto alla popolazione in quanto al suo interno il valore del campo elettrico è superiore al limite di legge. Va osservato che le antenne, per ovvie esigenze di propagazione, sono sempre posizionate in alto: con ciò si può affermare che sotto ad un'antenna direttiva si riscontra un minimo di radiazione, mentre il massimo si ha di fronte all'antenna, in corrispondenza della sua direttrice d'irradiazione. In ogni caso il livello di esposizione dipende dalla potenza emessa dalle antenne; questa può essere particolarmente elevata nel caso di impianti di diffusione radiofonica e televisiva (ordine di grandezza delle centinaia di Watt fino a qualche KW), mentre di norma è più modesta per impianti di telefonia cellulare (da alcuni watt a qualche decina di watt). Tali differenze si riscontrano poi, ovviamente, anche nelle rispettive distanze di rispetto.

In conclusione, di fronte alla crescente presenza di campi elettromagnetici diffusi negli ambienti di vita, con l'ovvia finalità di dare all'uomo del XXI secolo servizi pregiati offerti da una tecnologia in



rapida evoluzione, va condotta con verità e rigore la ricerca mirante a dare risposte certe sulla reale pericolosità delle onde elettromagnetiche assorbite dai tessuti biologici, sia per dare protezione soprattutto alla popolazione più a rischio (bambini, anziani, malati), sia per dare limiti e regole mirate a chi intende installare impianti i cui servizi sono trasportati dalle onde elettromagnetiche.

**A.M.**