

CAPITOLO 6

AMBIENTI DI PROVA E METODOLOGIE PER MISURE EMC: EMISSIONE E IMMUNITÀ IRRADIATA

6.1 Introduzione

6.2 Siti di misura e procedure di prova per le emissioni irradiate

6.3 Campi elettromagnetici di sorgenti artificiali

6.4 Fenomeni fondamentali della EMC

6.5 Prevenzione dei fenomeni di interferenza

6.6 Sorgenti di disturbi elettromagnetici

6.7 Sorgenti artificiali non intenzionali di disturbi elettromagnetici

6.8 Meccanismi d'emissione, suscettibilità ed accoppiamento

Sommario

Il presente capitolo ha lo scopo di illustrare i principali ambienti di prova e le metodologie di misura per la verifica della conformità dei sistemi elettrici ed elettronici alle prescrizioni di Compatibilità Elettromagnetica, in relazione all'emissione ed all'immunità irradiata nel *campo delle radiofrequenze* (in particolare nella banda da 30 MHz ad 1 GHz). Dopo aver evidenziato l'importanza di fissare una situazione ambientale di riferimento per descrivere il comportamento di sistemi radianti, si passerà a descrivere i siti di misura e le procedure di prova per verificare la conformità ai limiti fissati dalle norme delle emissioni e delle immunità irradiate di un apparato in prova.

6.1 Introduzione

Il funzionamento, in trasmissione ed in ricezione, delle antenne, così come il comportamento radiativo e suscettivo di apparati elettrici/elettronici, è influenzato dalle caratteristiche dell'ambiente circostante. Si può addirittura affermare che, in particolari condizioni, l'ambiente partecipa in maniera attiva al processo radiativo, tanto che non ha quasi senso distinguere tra ambiente ed apparato in prova. Per descrivere, quindi, il comportamento di tali oggetti occorre fissare convenzionalmente una situazione ambientale di riferimento; in relazione ad essa si possono definire certe grandezze, riguardabili come caratteristiche degli oggetti in studio, proprio in quanto l'ambiente sia stato definito una volta per tutte. Questa situazione ambientale di riferimento è lo *spazio vuoto illimitato*; nelle definizioni, infatti, d'impedenza d'ingresso o di diagramma di radiazione di un'antenna, si suppone l'assenza, nell'ambiente, di ogni causa che perturbi gli effetti connessi agli oggetti in studio.

Per quanto riguarda il problema della determinazione sperimentale delle grandezze considerate, si manifesta l'esigenza, in primo luogo, di realizzare condizioni di misura che approssimino al meglio quelle ideali di spazio vuoto illimitato (connessa alla definizione di alcune delle grandezze considerate, è anche l'ipotesi che siano soddisfatte altre condizioni, inerenti, in particolare, alle distanze tra sorgenti ed altri elementi del sistema; tali condizioni, però, non pongono ordinariamente gravi problemi dal punto di vista sperimentale), e quindi di valutare l'influenza (*errore*) della inevitabile residua "imperfezione" ambientale. Con riferimento alla prima questione, la soluzione più spontanea, e spesso seguita, consiste nell'allontanare effettivamente il più possibile il sistema in prova da ogni altro oggetto: si allude ai campi prova all'aperto (*Open Area Test Site*, OATS), in cui, per mantenere gli oggetti in prova lontano anche dal suolo, si ricorre ad alte torri di supporto. Tale soluzione, però, anche quando le

condizioni realizzate approssimino in modo soddisfacente quelle ideali, è sempre esposta al rischio di perturbazioni elettromagnetiche di origine esterna ed all'eventualità, anch'essa indesiderata, di perturbazioni meteorologiche.

Durante il periodo 1950-1960, si sono resi disponibili materiali dalle accentuate proprietà assorbenti nei confronti delle radiazioni elettromagnetiche e tali da mantenere tale prerogativa entro un ambito molto ampio di frequenze (assorbenti a larga banda). La possibilità di rivestire dall'interno, con tali materiali, le pareti di un generico ambiente, ha consentito di ottenere al chiuso, una regione dello spazio all'interno della quale i fenomeni evolvono come se essa fosse circondata da uno spazio vuoto illimitato. Poco importa che la radiazione si perda all'infinito o nel materiale assorbente; ciò che conta è che non venga ridiffusa all'interno della regione in questione. Il fatto stesso che la radiazione si esaurisca all'interno del materiale assorbente consente poi di disporre, all'esterno di questo, qualora necessario, un rivestimento metallico (*schermatura*) che ponga al riparo anche dalle perturbazioni elettromagnetiche d'origine esterna.

Ambienti del tipo descritto, detti *camere anecoiche elettromagnetiche* (schermate o non), per il loro pregio di fornire una zona di prova per misure in spazio libero (la regione entro cui sono verificate le condizioni desiderate, detta *zona imperturbata* o *zona di quiete*, non coincide con tutto lo spazio interno della camera anecoica, ma è notevolmente più piccola) in condizioni controllate e sempre comodamente agibili, trovano sempre più largo impiego, in sede industriale e presso grandi laboratori di ricerca. Nel caso in cui la camera anecoica sia uno strumento di ricerca di ampia utilizzabilità, si richiede ad essa, da una parte la massima versatilità, dall'altra prestazioni in generale superiori a quelle che possono essere ritenute soddisfacenti per una misura industriale di controllo; molto più difficile in questo caso si presenta pertanto la delineazione delle sue caratteristiche strutturali e di dettaglio, vale a dire il suo progetto.

Prima di procedere alla descrizione dei siti di misura maggiormente adoperati, è opportuno richiamare i concetti, peraltro già presentati, di emissioni e di immunità, nonché i principali tipi di sorgenti.

6.2 Siti di misura e procedure di prova per le emissioni irradiate

Siti di misura all'aperto

L'obiettivo di un laboratorio di prova è ottenere misure *accurate e riproducibili* nel tempo. Una condizione indispensabile affinché ciò avvenga è utilizzare ambienti di prova idonei. L'ambiente di riferimento per le misure di emissioni irradiate relative all'EMC, è costituito dal sito all'aperto descritto nella norma C63.7 dell'ANSI (American National Standard Institute).

OATS

(ANSI C63.7 – 1988)

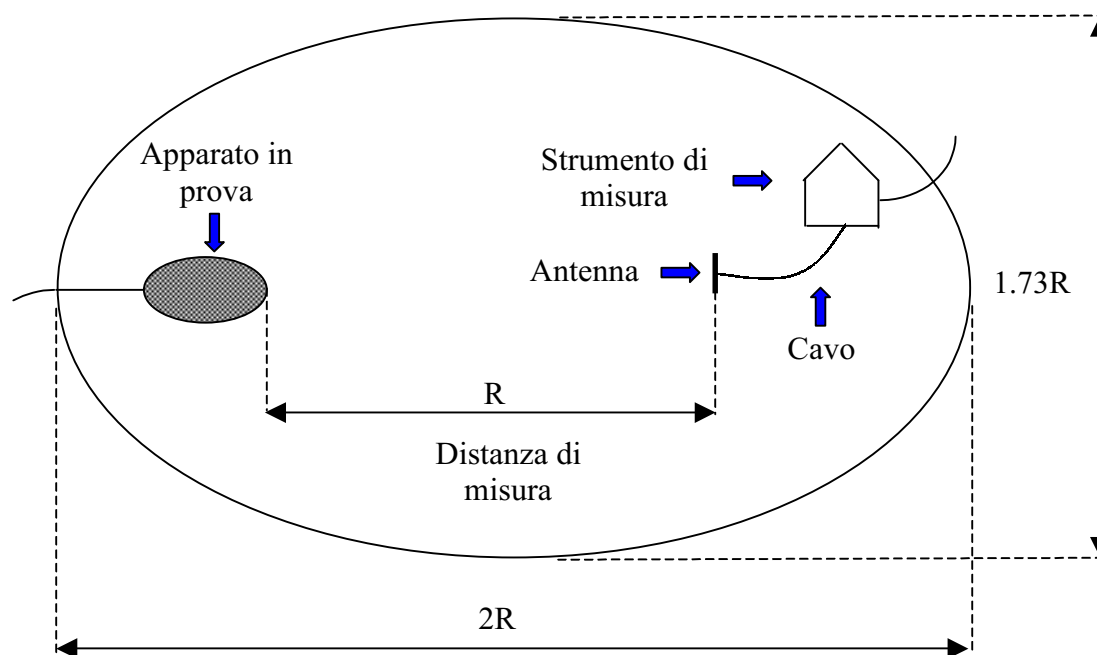


Figura 6.1: Schematizzazione dell'OATS.

Un sito all'aperto è costituito da un piano metallico (*piano di massa*) posto in un'area libera da ostacoli, in modo da non avere riflessioni indesiderate. L'area in questione deve avere la forma di un'ellisse le cui dimensioni devono essere quelle di Figura 6.1, dove R rappresenta la distanza tra l'apparato in prova e l'antenna ricevente della strumentazione di misura. Questi siti sono utilizzati per misure ad $R = 10$ m oppure ad $R = 30$ m.

Come già è stato evidenziato in precedenza, un OATS presenta i due inconvenienti che qui si riportano in qualche dettaglio.

1. Le normative prescrivono che le misure di emissioni irradiate devono essere effettuate in ambienti in cui il livello dei disturbi elettromagnetici, non emessi dagli apparati in prova, deve essere inferiore, rispetto ai limiti d'accettazione, di almeno 6 dB. Purtroppo, negli ambienti urbanizzati, è molto difficile trovare un'area libera da perturbazioni elettromagnetiche, per cui diventa quasi impossibile disporre di un sito di questo tipo.
2. I siti all'aperto sono esposti alle condizioni atmosferiche; esiste, allora, l'eventualità di non poter effettuare le misure a causa di condizioni meteorologiche avverse.

Le camere schermate semianecoiche

Una valida alternativa all'utilizzo dei siti all'aperto per le misure d'emissioni irradiate, è costituita dalle camere schermate semianecoiche (CSSA) descritte nella norma ANSI C63.4 e nel CISPR 16-1.

Una camera semianecoica schermata è costituita da una camera schermata, le cui pareti interne ed il soffitto sono ricoperti da materiale anecoico con proprietà assorbenti (nei confronti delle radiazioni elettromagnetiche) in un ampio intervallo di frequenze (assorbenti a larga banda). A differenza di una camera anecoica, nella camera semianecoica il pavimento è costituito da un piano di massa perfettamente conduttore. La camera schermata serve ad impedire ai segnali esterni di contaminare l'ambiente interno, mentre il materiale assorbente non permette la riflessione delle emissioni del dispositivo in prova sulle pareti perimetrali e sul soffitto. Il materiale anecoico simula il sito in campo aperto. Il fenomeno della riflessione può e deve avvenire sul piano di massa della camera.

I materiali anecoici utilizzati possono essere di tre tipi:

- *ferriti*;
- *piramidi* di materiale poliuretanico tradizionale;
- *FerroSorbTM*.

I *pannelli di ferrite* costituiscono la soluzione ottimale a problemi d'ingombro interno, avendo uno spessore di non più di 3 cm, incluso il materiale di supporto sul quale le singole mattonelle di ferrite sono assemblate manualmente, per garantire accoppiamenti precisi tra una piastrella e l'altra.

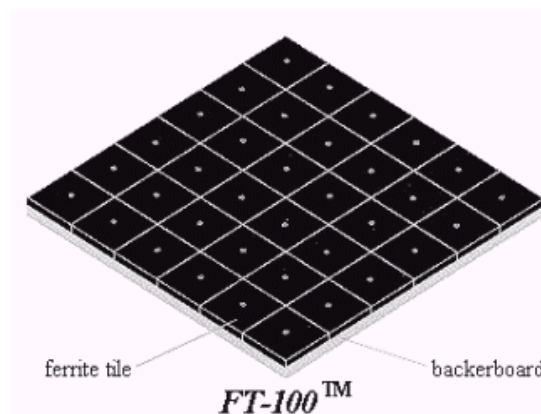


Figura 6.2: Pannello di ferrite.

Le piastrelle di ferrite possiedono un'elevata attenuazione della radiazione a radio-frequenza incidente, in particolare nello spettro di frequenza da pochi megahertz sino oltre 1 GHz, e sono per loro natura non infiammabili. Un'estensione di tale intervallo di frequenze fino ai (18 ÷ 40) GHz è possibile qualora si sovrapponga a tali pannelli, senza pregiudizio per le prestazioni, del materiale assorbitore poliuretanico di forma piramidale. Infatti, il materiale dielettrico tradizionale si comporta in modo eccellente alle frequenze più elevate, dove il rapporto tra la lunghezza delle piramidi e le prestazioni è particolarmente favorevole. Tale materiale dielettrico deve essere trattato

secondo procedimenti particolari in modo da poter garantire caratteristiche d'infiammabilità, secondo i limiti stabiliti dalle MIL-STD-461D/462D o da altre norme similari, quali le NRL 8093 e DN 4102-82, per citarne solo alcune.

Il *FerroSorb*[™], prodotto dalla *Rantec*, è costituito da una combinazione di materiali sinterizzati, ferriti e tronchi di piramide di materiale dielettrico poliuretanico, di consistenza spugnosa. Tale aggregazione di materiali conferisce al *FerroSorb*[™] un ottimo comportamento su un'ampia banda di frequenza, da 26 MHz fino a svariate decine di gigahertz, sopportando fino a 200 V/m di campo continuo e fino a 500 V/m di campo intermittente. Il *FerroSorb*[™] consente di ovviare al maggiore ingombro dei classici materiali poliuretanici al decrescere della frequenza di utilizzo.

In passato, quando i materiali assorbenti non erano molto efficaci, venivano realizzate camere anecoiche caratterizzate da configurazioni molto complesse, come quelle “a diaframma” (Figura 6.3) e quelle “a pareti deflettrici” (Figura 6.4), motivate in base ad una analisi ottico-geometrica delle riflessioni all'interno della camera stessa. In entrambi i casi il disegno è concepito in modo che i raggi che non illuminano direttamente la zona utile possano agire su di essa soltanto quando la loro intensità si sia molto ridotta in seguito a diverse riflessioni successive.

Attualmente, però, l'impiego di materiali assorbenti più efficaci, anche per angoli d'incidenza (rispetto alla normale) notevoli, realizzati con una struttura superficiale a bugnato piramidale acuminato, ha ridotto di molto l'importanza del problema delle riflessioni speculari ed ha portato, in definitiva, all'abbandono di tali configurazioni che comportavano, con le loro discontinuità strutturali, effetti diffrattivi sfavorevoli, divenuti prevalenti.

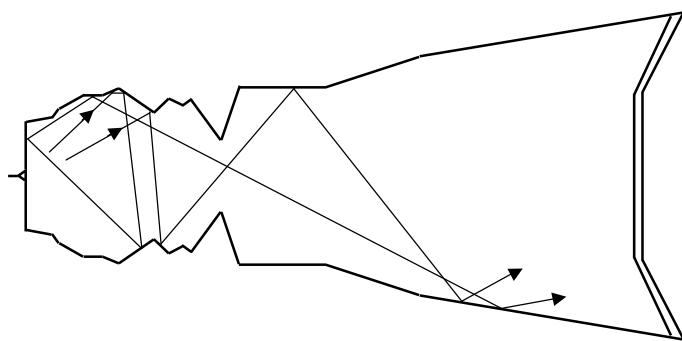


Figura 6.3: Camera anecoica “a diaframma”; pianta. Del tutto analoga è la sezione longitudinale verticale.

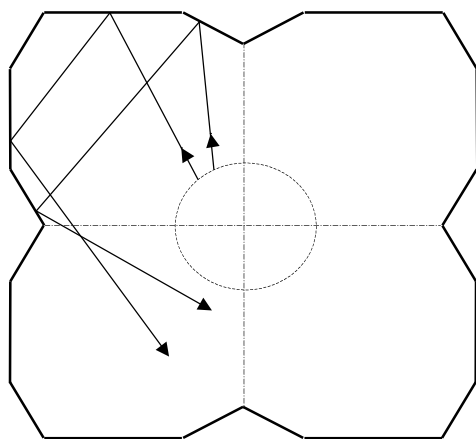


Figura 6.4: Camera anecoica “a pareti deflettrici”; sezione trasversale generica e proiezione in tale sezione dei raggi riflessi. Traccia circolare tratteggiata della zona imperturbata.

Le realizzazioni più recenti sono, pertanto, caratterizzate da una geometria molto semplice: esse sono o *rettangolari* (parallelepipedo retto), o *rastremate*, cioè a pareti divergenti (tronco di piramide).

CSSA

(ANSI C63.4 – 1992 e CISPR 16-1)

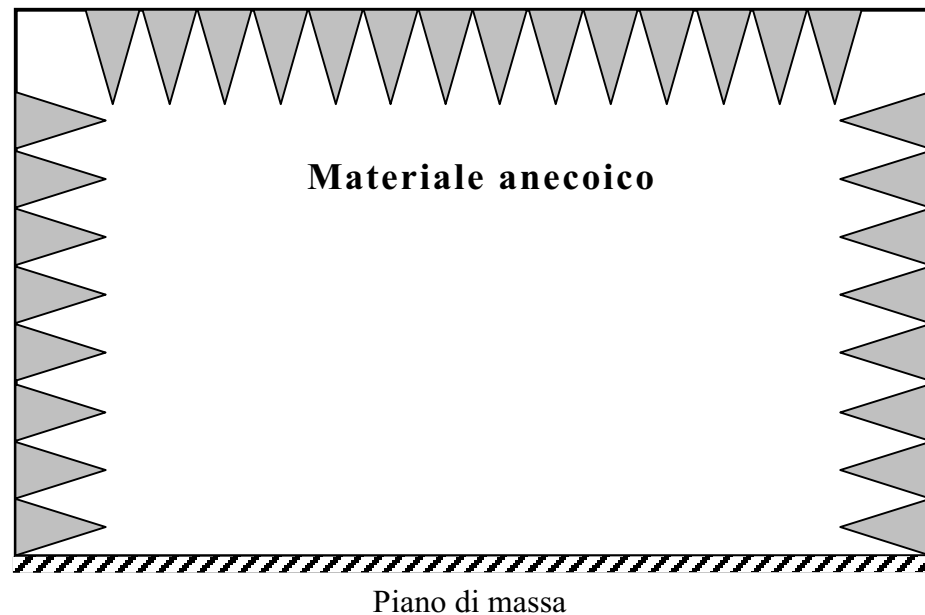


Figura 6.5: Camera schermata semianecoica rettangolare con coni assorbenti.

Attenuazione normalizzata del sito

Una camera anecoica è caratterizzata da un parametro fondamentale che rappresenta un indice dell'equivalenza del sito reale rispetto ad uno ideale con le caratteristiche fisiche viste in precedenza. Tale parametro è l'*Attenuazione Normalizzata del Sito* (NSA). Nella banda da 30 MHz ad 1 GHz, le prestazioni di una CSSA si misurano per mezzo dei valori dell'NSA; nella gamma di frequenze superiori ad 1 GHz, le prestazioni si misurano attraverso i valori di FSTL (Free Site Transmission Loss), a volte riferita anche come NSTL (Normalised Site Transmission Loss). Per definire l'NSA è necessario definire, innanzitutto, il parametro

$$SA = \frac{V_1}{V_R},$$

detto attenuazione del sito.

Attenuazione del sito: SA

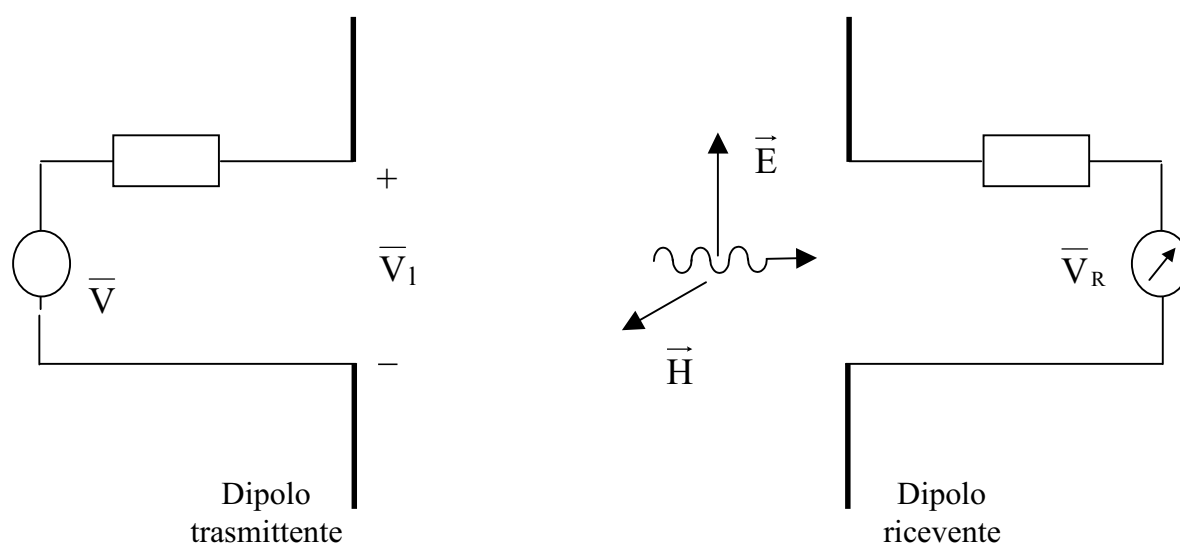


Figura 6.6: Definizione dell'attenuazione del sito (SA).

L'attenuazione del sito è, dunque, definita come il rapporto tra la tensione V_1 ai capi di un dipolo trasmittente e la tensione V_R fornita da un misuratore connesso ad un'antenna ricevente (dipolo ricevente).

Utilizzando il fattore di antenna AF_R (si ricorda che il fattore d'antenna è definito come il rapporto tra il campo elettrico incidente sulla superficie dell'antenna di misura e la tensione misurata ai morsetti dell'antenna; un'ipotesi fondamentale per la misura del fattore d'antenna consiste nel fatto che il campo incidente deve essere polarizzato in modo da ottenere il massimo segnale ai

morsetti dell'antenna) del dipolo ricevente, la tensione V_R può essere espressa, in funzione del campo elettrico incidente sul dipolo

$$V_R = \frac{E}{AF_R},$$

mentre V_1 può essere espressa, nell'ipotesi di massimo trasferimento di potenza attiva da parte del generatore di ingresso, come

$$V_1 = \frac{V}{2},$$

essendo V la tensione a vuoto del generatore equivalente connesso al dipolo accordato. L'attenuazione del sito, allora, può essere espressa per mezzo della relazione

$$SA = \frac{V AF_R}{2E}.$$

Fissata l'altezza dell'antenna trasmittente, l'altezza dell'antenna ricevente viene variata al fine di trovare il valore massimo del campo elettrico incidente. Il valore massimo del campo elettrico si ha quando l'onda diretta è in fase con l'onda riflessa dal piano di massa. In queste condizioni è possibile calcolare l'attenuazione del sito attraverso la seguente relazione:

$$SA = \frac{279.1 \cdot AF_R \cdot AF_T}{f \cdot E_{D_{max}}},$$

dove $E_{D_{max}}$ è il valore massimo del campo generato dall'antenna trasmittente quando irradia una potenza di 1 pW, normalmente tabulato nelle normative di riferimento (CISPR 22), ed f è la frequenza della radiazione espressa in megahertz.

MISURA DELL'ATTENUAZIONE DEL SITO

TIPO DI CONFIGURAZIONE

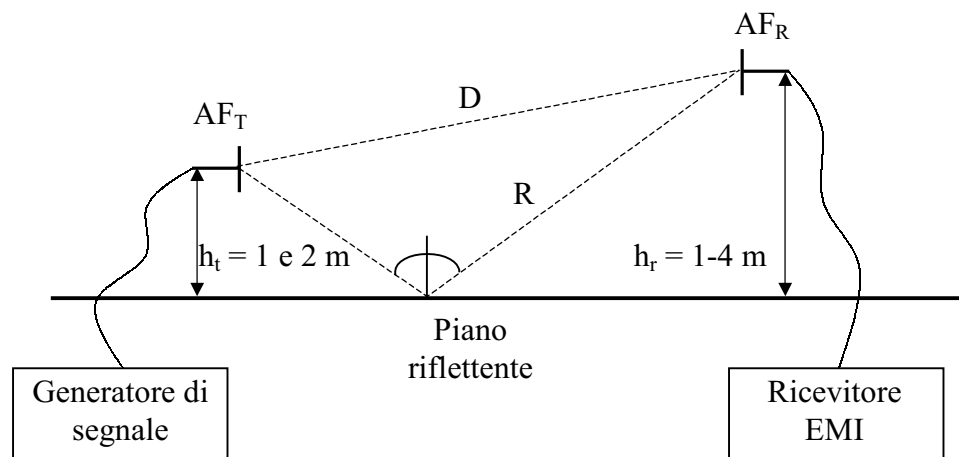


Figura 6.7: Tipo di configurazione per la misura dell'Attenuazione del Sito.

La relazione precedente espressa in decibel diventa

$$SA = 48.92 + AF_R + AF_T - 20\log(f) - E_{D_{max}},$$

con AF_R e AF_T espresse in dB, f espressa in MHz e $E_{D_{max}}$ in dB μ V/m. Conoscendo i valori di AF_R e AF_T è possibile svincolarsi dalla tipologia dell'antenna, per cui non è necessario utilizzare dipoli accordati.

Si definisce, poi, attenuazione normalizzata del sito la grandezza

$$NSA = \frac{SA}{AF_R AF_T},$$

mediante la quale è possibile svincolarsi completamente dal tipo d'antenna utilizzata. Si utilizza comunemente anche l'espressione dell'NSA in decibel $NSA = 48.92 - 20 \log(f) - E_{D_{max}}$, con f espressa in megahertz ed $E_{D_{max}}$ in dB μ V/m

MISURA DELL'NSA

TIPO DI CONFIGURAZIONE: POLARIZZAZIONE ORIZZONTALE

(Antenna a larga banda o dipolo accordato)

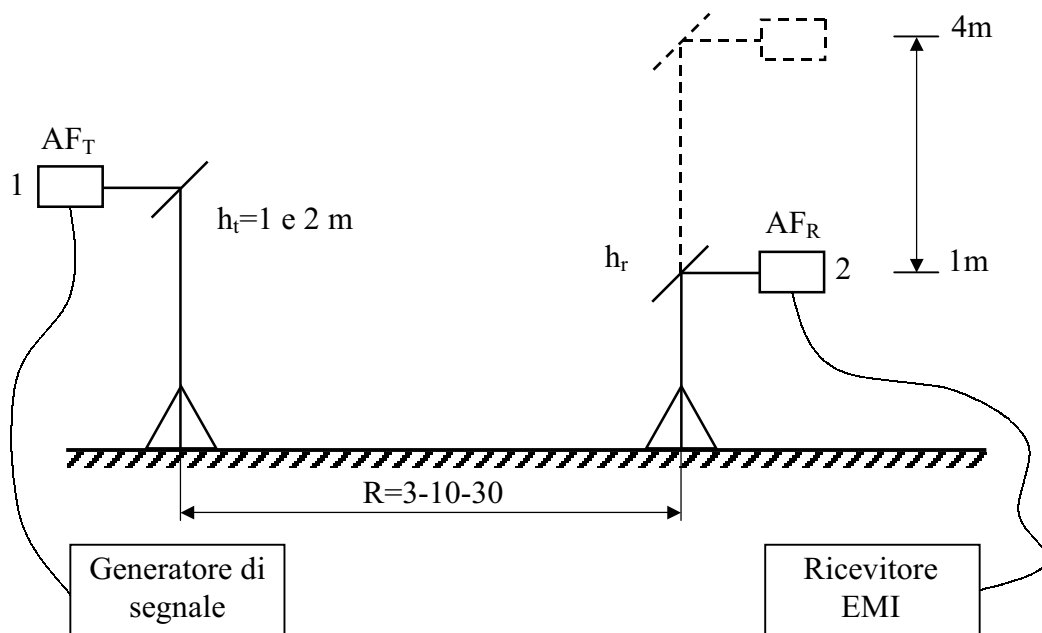


Figura 6.8: Tipo di configurazione per la misura dell'NSA.

Durante la misura, l'altezza dell'antenna ricevente viene variata per trovare la massima indicazione di segnale sullo strumento ricevitore connesso a quest'ultima. Questa indicazione viene chiamata *tensione del sito* V_{sito} . Successivamente, il generatore di segnale viene connesso direttamente al misuratore; la tensione letta viene chiamata *tensione diretta* V_{diretta} .

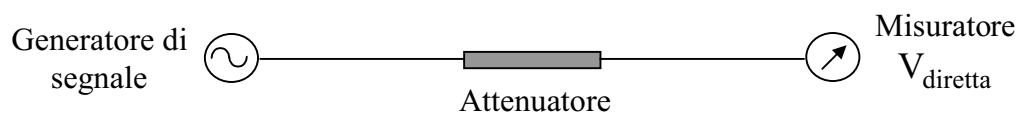


Figura 6.9: Misura della tensione diretta.

Il valore dell'NSA può allora essere calcolato come:

$$\text{NSA} = V_{\text{diretta}} - V_{\text{sito}} - \text{AF}_T - \text{AF}_R - \Delta\text{AF}_{\text{tot}},$$

dove tutti i termini sono espressi in decibel e $\Delta\text{AF}_{\text{tot}}$ è il fattore di mutua impedenza tra l'antenna ricevente e l'antenna trasmittente.

Validazione di una CSSA: Metodo Volumetrico

Affinché una CSSA possa essere utilizzata per effettuare misure EMC relative alle emissioni irradiate di un apparato in prova, deve essere *validata* (qualificata).

Un sito di misura è *accettabile*, rispetta cioè le norme, se i valori dell'*Attenuazione Normalizzata del Sito*, con polarizzazione orizzontale e verticale, si discostano, rispetto ai valori teorici definiti dalle norme (EN 55022 / CISPR 22 / EN 50147-2 / ANSI C63.4), di una quantità inferiore a ± 4 dB. La tolleranza di ± 4 dB comprende le incertezze della strumentazione, gli errori di misurazione e gli errori dovuti alle anomalie del sito.

Un buon sito di misura è quello che contribuisce alla tolleranza di ± 4 dB con un valore non superiore ad 1 dB (ANSI C63.6-1988).

La normativa di riferimento CISPR 22 stabilisce che la verifica dell'NSA deve essere effettuata in un volume. Tale volume rappresenta la cosiddetta *zona di quiete*, ovvero la zona imperturbata sensibilmente più piccola dell'intero sito, dove successivamente dovrà essere posizionato l'apparato in prova, per poter effettuare le misure delle sue emissioni irradiate nel pieno rispetto delle norme.

MISURA DELL'NSA CON IL METODO VOLUMETRICO

POLARIZZAZIONE ORIZZONTALE E VERTICALE

(Antenne a larga banda)

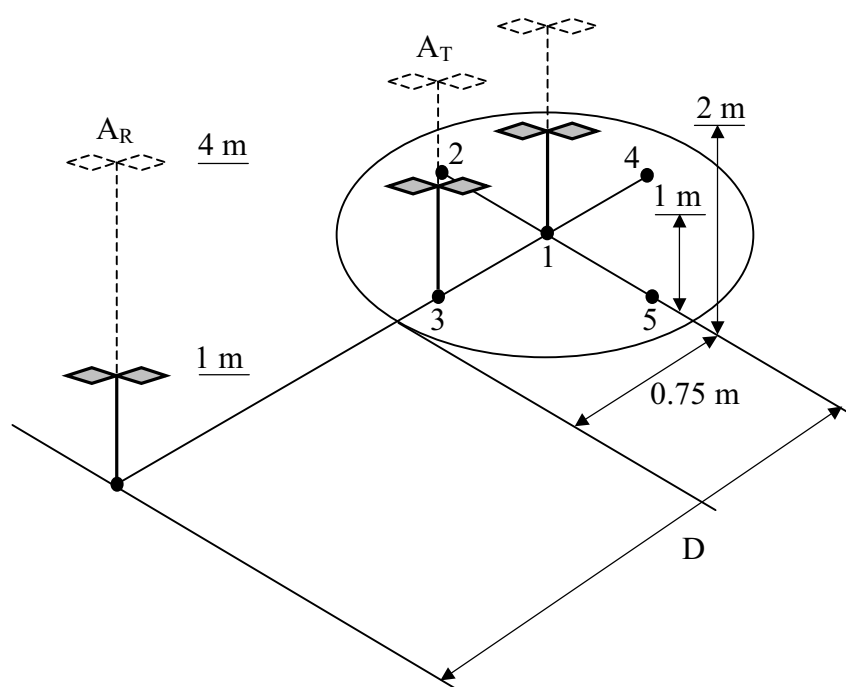


Figura 6.10: Metodo volumetrico

Il metodo volumetrico consiste nello spostare l'antenna trasmittente in diverse posizioni all'interno di un volume cilindrico (fittizio) avente un diametro di base di almeno 1.5 m ed un'altezza di 2 m (è possibile anche un'altezza di 2.5 m). L'antenna trasmittente deve essere posta in almeno cinque punti (Figura 6.10). In ogni punto, la misura deve essere effettuata sia per un'altezza pari a 1 m, sia 2 m (è possibile una terza misura per un'altezza pari a 2.5 m) in polarizzazione sia orizzontale che verticale. Per ogni posizione ed altezza dell'antenna trasmittente, e per entrambe le polarizzazioni, l'altezza dell'antenna ricevente deve essere variata da 1 m a 4 m per ricercare, ad ogni frequenza, la massima indicazione di segnale sullo strumento ricevitore (massimo campo in ricezione) connesso a quest'ultima. La distanza di misura D tra le due antenne, deve essere mantenuta costante per ogni posizione dell'antenna trasmittente e dipende dalla classe d'appartenenza dell'apparato che successivamente dovrà essere provato. Nel campo di frequenze da 30 MHz ad 1 GHz, le norme EN 55022 prescrivono come conformi, distanze di misure pari a 3 m o 10 m (la vecchia versione di tali norme prevede distanze di misura di 10 m o 30 m in relazione alla classe di appartenenza del sistema che successivamente dovrà essere provato).

L'andamento dell'NSA risulta decrescente con la frequenza.

In definitiva, fissata la distanza di misura, se nella zona di quiete, per ogni frequenza d'interesse, la deviazione in decibel dell'NSA, rispetto al valore teorico, è contenuta nella fascia ± 4 dB (Figura 6.11), sarà possibile effettuare successivamente, a quella distanza, misure d'emissioni irradiate *pienamente conformi*, su oggetti le cui dimensioni sono tali da essere comprese nel volume di prova.

Procedura di prova in CSSA per emissioni irradiate

Specificare in modo chiaro come si debbano misurare le emissioni di un dispositivo per poterne verificare la conformità ai limiti fissati, è di pari importanza che chiarire l'entità di tali limiti. È ovvio che, se le procedure secondo cui devono essere svolte le misure non sono fissate in modo univoco, ma sono lasciate all'interpretazione del personale che deve eseguire tali operazioni, allora è possibile ottenere, per lo stesso apparato, insiemi diversi di dati al variare del sito di misura!

In ogni normativa che preveda limiti per le emissioni irradiate (EN 55022 / CISPR 22 / ANSI C63.4), sono definite in modo chiaro anche le regole per la misura; vengono, cioè, indicate la procedura per eseguire la prova, la strumentazione da impiegare, l'ampiezza di banda degli strumenti, le antenne di misura, e così via.

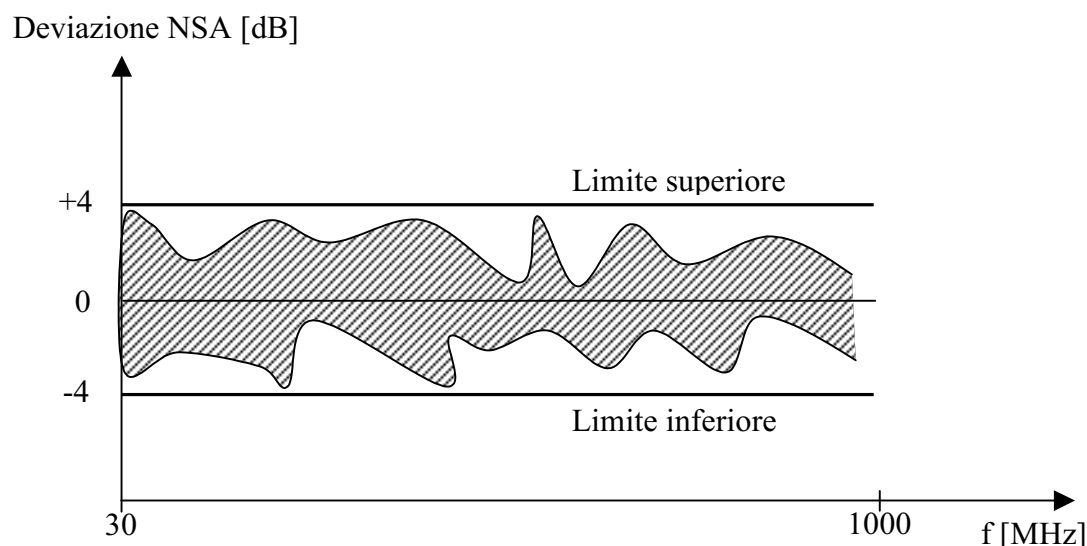


Figura 6.11: Inviluppo del risultato delle misure.

La procedura di misura in CSSA delle emissioni irradiate, richiede il posizionamento dell'EUT (Equipment Under Test) su di una tavola rotante nel

volume di prova (zona di quiete) precedentemente qualificato mediante il metodo volumetrico. L'EUT deve essere fornito di tutti i cavi d'interconnessione con eventuali suoi sottosistemi e di tutti i cavi di collegamento con l'ambiente esterno. La configurazione dell'EUT, sulla tavola, deve essere quella che massimizza le emissioni; il personale addetto alla misura deve determinare la configurazione che massimizza le emissioni (ricercandola tra tutte quelle che in condizioni reali il sistema può accettare) e, poi, utilizzare tale configurazione per l'esecuzione delle prove di conformità.

MISURA DI EMISSIONI IRRADIATE

(EN 55022 / CISPR 22 / ANSI C63.4)

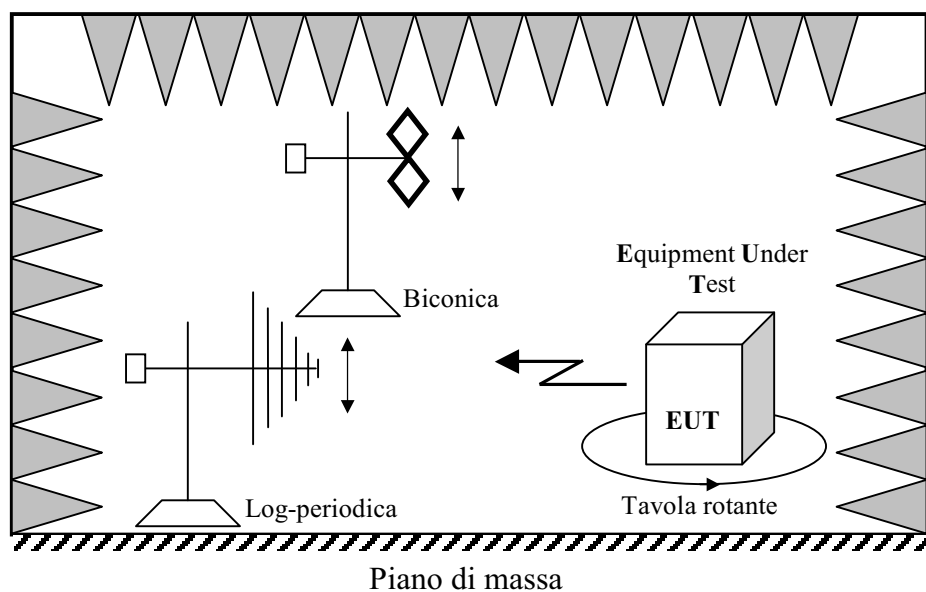


Figura 6.12: Misura di emissioni irradiate.

Nel corso della misura è prevista la rotazione dell'EUT da 0° a 360°; tale movimentazione identifica il volume di rotazione rispetto al quale vengono posizionate a 3 m o 10 m, in relazione alla classe di appartenenza dell'EUT, le antenne di misura (antenne riceventi).

La prova si sviluppa nella banda da 30 MHz ad 1 GHz, impiegando due antenne riceventi: un'antenna biconica da 30 MHz a 200 MHz ed un'antenna log-periodica da 200 MHz ad 1 GHz. Per ciascuna delle due bande di prova e per entrambe le polarizzazioni, orizzontale e verticale, l'altezza delle antenne riceventi viene variata da 1 m a 4 m per ricercare, ad ogni frequenza, il valore massimo del campo irradiato dall'EUT. La ricerca del massimo campo irradiato avviene, non solo variando le altezze e le polarizzazioni delle antenne di misura, ma anche ruotando l'apparato mediante la tavola rotante. Il risultato di tutte queste misure consente di tracciare il diagramma di emissione dell'EUT che dovrà essere confrontato con la *maschera* prevista dalle norme, al fine di verificare i requisiti sulla Compatibilità Elettromagnetica, come illustrato in Figura 6.13.

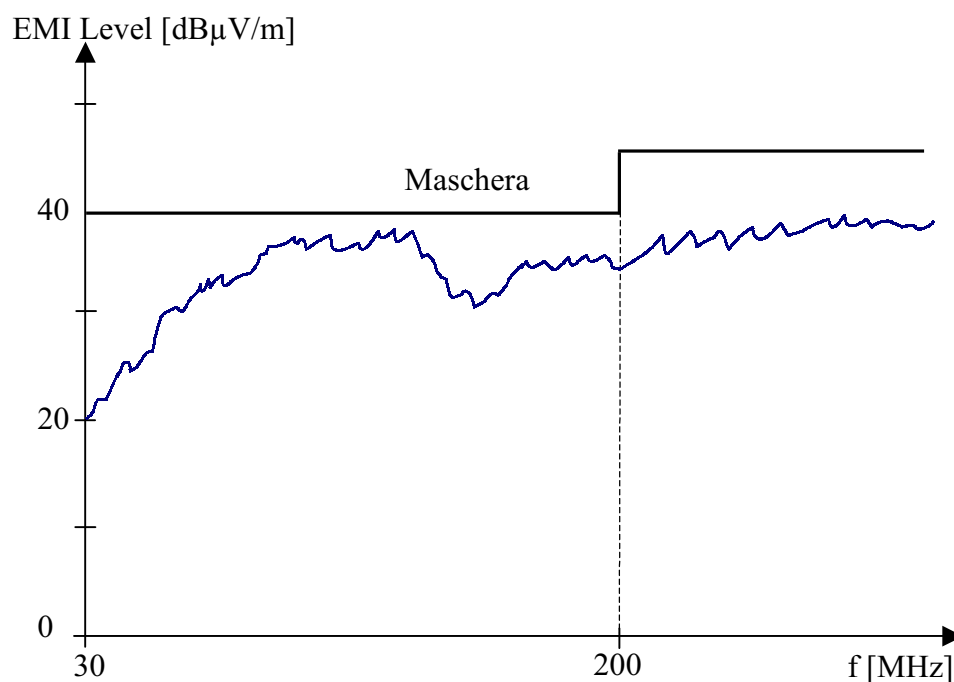


Figura 6.13: Diagramma di radiazione e maschera.

Attualmente i siti di prova sono dotati di apparecchiature che permettono di automatizzare l'intera procedura di misura: strumenti controllati da un

calcolatore spostano verticalmente le antenne, ne cambiano la polarizzazione e registrano i dati. Anche i grafici dedotti dai dati rilevati durante la misura vengono eseguiti automaticamente. Tutto ciò velocizza notevolmente la raccolta dei dati; in particolare, vengono registrate tutte quelle frequenze per cui le emissioni superano il limite fissato e, per queste frequenze, la posizione angolare dell'EUT e la posizione e la polarizzazione dell'antenna di misura.

Nella pratica, le misure vengono effettuate con dei *rilevatori di picco* e poi, nei punti in cui i livelli di disturbo superano i limiti di emissione definiti dalle norme, le misure vengono ripetute con dei *rilevatori di quasi picco* che richiedono un tempo di misura molto più lungo rispetto ai primi.

6.3 Siti di misura e procedure di prova per l'immunità irradiata

Lo scopo delle prove d'immunità irradiata è quello di verificare l'immunità delle apparecchiature, singoli apparati o sistemi, ai campi elettromagnetici generati da qualunque altro dispositivo che emetta energia elettromagnetica in modo continuativo. Tali prove, non possono essere effettuate in un sito all'aperto in quanto comportano il problema, a livello di sicurezza, di irradiare in campo libero elevati livelli di campo elettromagnetico tali da disturbare l'ambiente circostante. La normativa di riferimento è la IEC 801-3, la quale descrive che un ambiente è idoneo per effettuare misure d'immunità irradiata, se si riesce a raggiungere, in assenza dell'oggetto in prova, una certa uniformità di campo su una superficie di $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$. L'uniformità, in genere (0 ÷ 6) dB, viene richiesta su una matrice di 16 punti distanti 0.5 m l'uno dall'altro ed in almeno 12 di questi punti (75% della superficie), come mostrato in Figura 6.14.

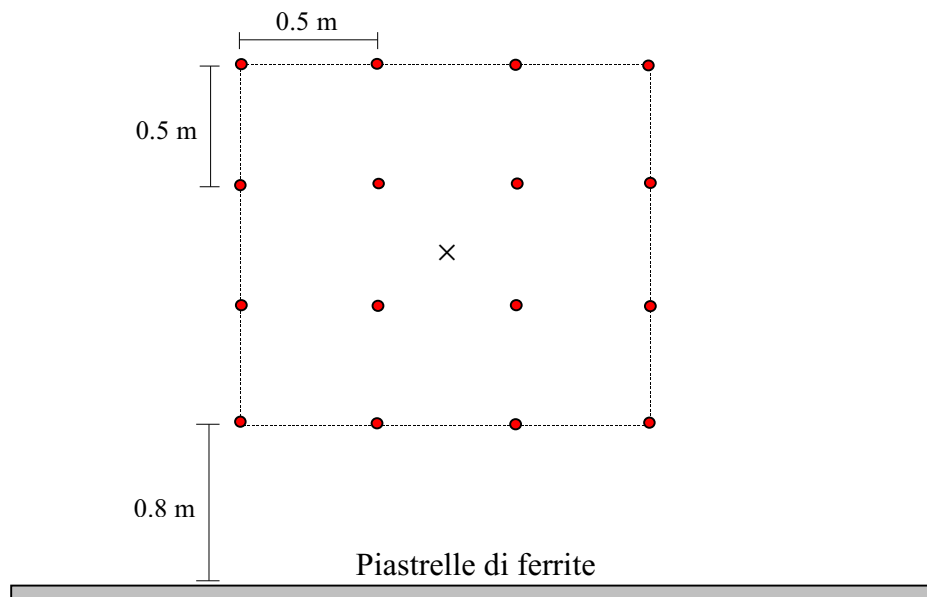


Figura 6.14: Superficie di $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$, lungo i punti della quale deve esistere l'uniformità di campo.

Una simile uniformità di campo si riesce ad ottenere esclusivamente in ambienti molto particolari quali le camere schermate anecoiche, o le camere schermate semianecoiche, disponendo sul piano riflettente (pavimento) del materiale assorbente, in particolare delle piastrelle di ferrite (Figura 6.15).

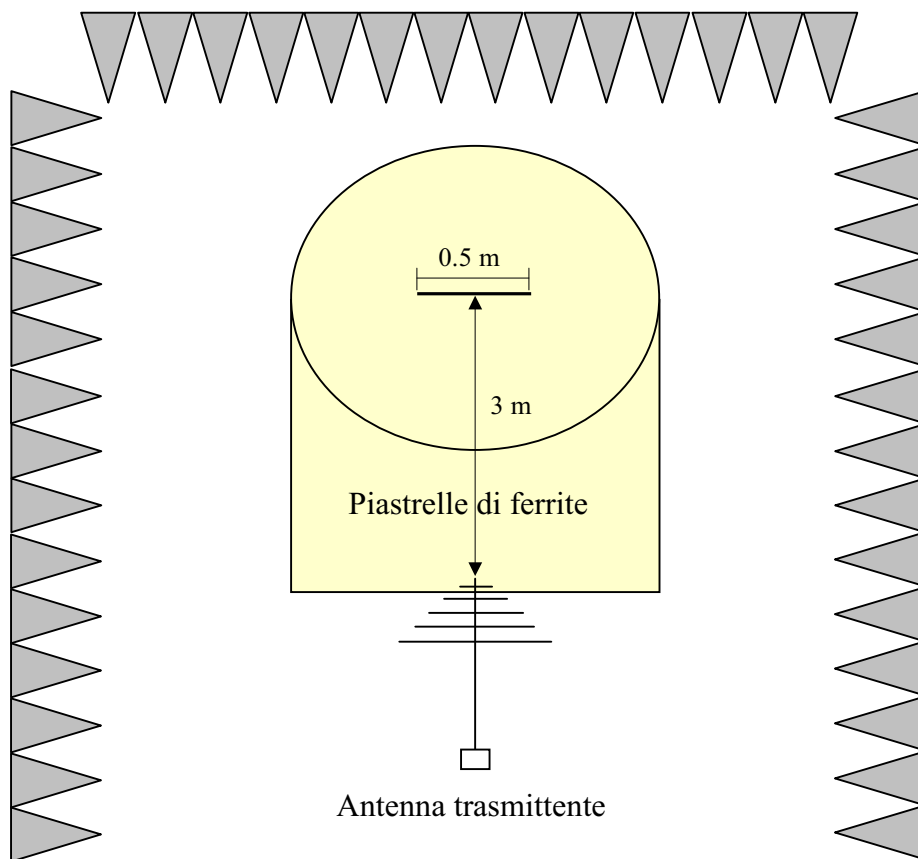


Figura 6.15: Configurazione di misura dell'uniformità di campo.

Nella configurazione di misura dell'uniformità di campo, l'antenna trasmittente, biconica per l'intervallo di frequenze $(27 \div 200)$ MHz, log-periodica per l'intervallo $(0.2 \div 1)$ GHz, in polarizzazione orizzontale o verticale, è posta a 3 m dalla superficie, mentre la superficie è posta a 80 cm dal pavimento. Nella superficie vengono individuati i 16 punti in cui posizionare le sonde di misura e il confronto avviene con il punto centrale della superficie: il campo in questi punti si deve mantenere in una fascia di uniformità di $(0 \div 6)$ dB rispetto al valore centrale. Ciò significa creare delle condizioni di prova dove il valore del campo può essere al massimo il doppio di quello richiesto. Inoltre, occorre rilevare, frequenza per frequenza, la potenza da applicare in antenna per ottenere l'intensità del campo voluta. Stabilita la superficie in cui c'è uniformità di

campo e ricavata la tabella frequenza-intensità di campo-potenza, si può procedere alla misura vera e propria, posizionando l'oggetto in prova posteriormente alla superficie.

Si noti che la procedura di calibrazione del sito per verificare l'uniformità di campo, per la complessità e la durata, non si deve ripetere ad ogni sessione di misura, ma va ripetuta ad intervalli di mesi (1 o 2 volte l'anno).

Come già accennato in precedenza, le modalità di prova per l'immunità irradiata sono definite nella norma di base IEC 801-3 o come recentemente rinominata IEC 1000-4-3. In questo standard vengono definiti il set up di prova (configurazione di prova), le procedure di misura ed, inoltre, in apposite norme di prodotto, vengono definiti i parametri che devono essere monitorati per verificare il corretto funzionamento dell'apparato in presenza di sollecitazioni elettromagnetiche. Per questo motivo, per effettuare questo tipo di prove, oltre a disporre della norma di base, è necessario disporre anche di norme di prodotto. Le prove di immunità irradiata, secondo le prescrizioni delle nuove edizioni degli standards, devono essere effettuate a partire da 80 MHz fino ad 1 GHz.

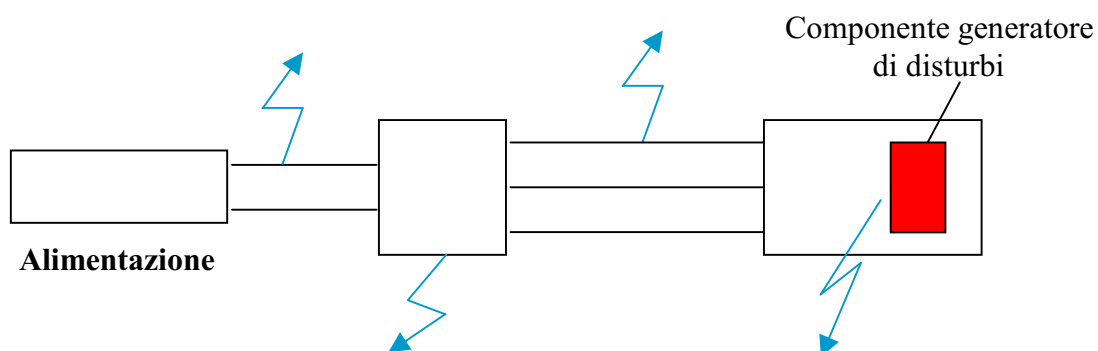
6.4 Fenomeni fondamentali della EMC

La Compatibilità Elettromagnetica si occupa, come si è già avuto modo di sottolineare nei precedenti capitoli, di quattro fenomeni fondamentali:

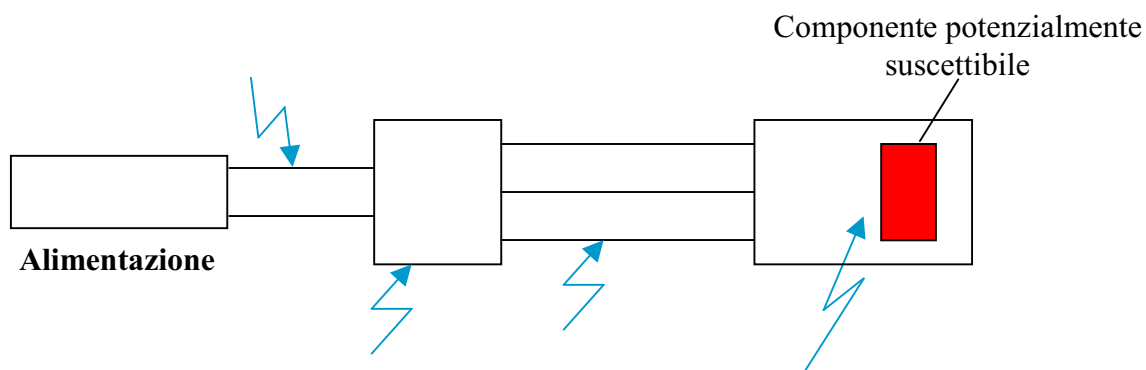
- *emissioni radiate,*
- *suscettibilità radiata,*
- *emissioni condotte,*

➤ *suscettibilità condotta*,

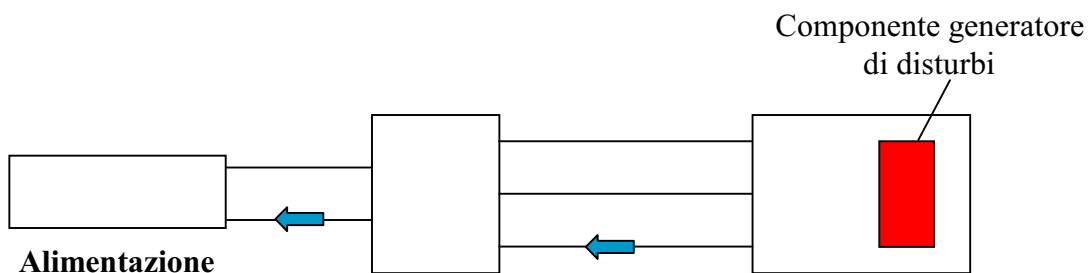
così come illustrato in Figura 6.16. Un tipico sistema elettrico e/o elettronico, generalmente, è costituito da uno o più sottosistemi intercomunicanti per mezzo di cavi (fasci conduttori). La potenza necessaria al funzionamento del sistema è fornita dal blocco “alimentazione” per mezzo d’opportuni cavi.



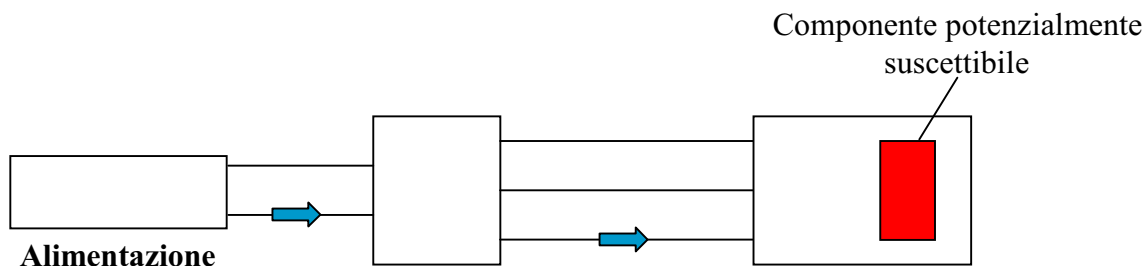
(a) Emissioni radiate



(b) Suscettibilità radiata



(c) Emissioni condotte



(d) Suscettibilità condotta

Figura 6.16: Schematizzazione dei quattro fenomeni di cui tratta la EMC.

- Emissioni radiate

Le emissioni elettromagnetiche rappresentano il fenomeno della generazione di campi elettromagnetici all'interno di una sorgente. Un'emissione si dice radiata se si propaga attraverso l'aria. In determinate condizioni, alcune parti di un sistema elettrico e/o elettronico, si comportano come antenne irradianti, anche se questa non è la loro funzione: un circuito elettrico percorso da corrente variabile nel tempo emette disturbi elettromagnetici, specialmente se lavora a frequenze elevate.

Emissioni elettromagnetiche radiate (non intenzionali), possono essere generate, ad esempio, da un cavo di alimentazione, da uno schermo metallico contenente un sottosistema, da un cavo che collega sottosistemi diversi oppure da un componente elettrico e/o elettronico localizzato all'interno di un contenitore non metallico, come mostrato in Figura 6.16 (a).

Le emissioni radiate possono essere captate da apparati elettrici/elettronici causando di conseguenza fenomeni d'interferenza. In generale l'efficienza del fenomeno d'emissione dell'energia elettromagnetica aumenta con le dimensioni della struttura irradiante.

Uno dei concetti più importanti circa le emissioni radiate è quello che coinvolge le *correnti di modo comune* e le *correnti di modo differenziale*. Si consideri una coppia di conduttori paralleli percorsi rispettivamente dalle correnti i_1 e i_2 , come mostrato nella Figura 6.17. Tali correnti possono essere scomposte in due correnti ausiliarie i_D e i_C (fasori delle correnti), dette rispettivamente *corrente di modo differenziale* e *corrente di modo comune* (Figura 6.18):

$$i_1 = i_C + i_D,$$

$$i_2 = i_C - i_D.$$

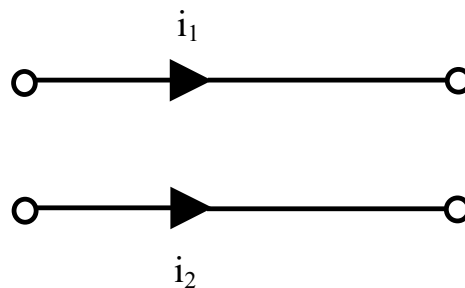


Figura 6.17: coppia di conduttori paralleli percorsi da corrente.

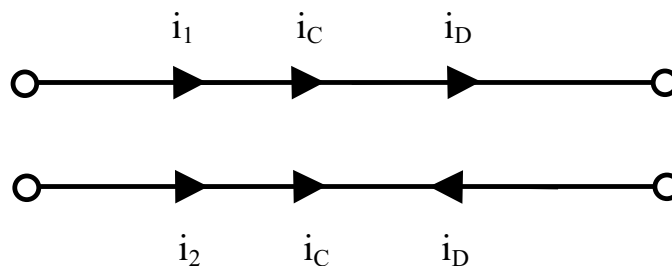


Figura 6.18: Decomposizione delle correnti di una linea di trasmissione a due fili.

Dalle equazioni delle correnti, i_1 ed i_2 , si possono ottenere le espressioni esplicite sia per la corrente di modo differenziale sia per quella di modo comune, cioè

$$i_D = \frac{1}{2} (i_1 - i_2),$$

$$i_C = \frac{1}{2} (i_1 + i_2).$$

Le correnti di modo differenziale i_D sono uguali in valore assoluto, ma hanno verso opposto lungo i due fili. Esse rappresentano le uniche correnti che idealmente dovrebbero essere presenti sulla struttura. Le correnti di modo comune i_C sono uguali in valore assoluto e hanno stesso verso lungo i due conduttori; esse idealmente non dovrebbero esistere. Esistono diversi fattori che possono dare origine a correnti indesiderate di modo comune, come la vicinanza a piani di massa e altre asimmetrie strutturali.

I campi elettrici generati dalle correnti di modo differenziale hanno verso opposto. Tuttavia non si annullano vicendevolmente poiché i conduttori non sono sovrapposti ma si sottraggono, dando origine ad un campo elettrico radiato complessivo di bassa intensità. Al contrario, i campi elettrici generati dalle correnti di modo comune hanno lo stesso verso e pertanto si sommano, dando così un contributo al campo totale ben maggiore di quello fornito dalle correnti di modo differenziale. In altre parole, *le correnti di modo comune determinano emissioni radiate molto più intense di quelle generate dalle correnti di modo differenziale, di conseguenza sono il fattore predominante nel meccanismo d'irradiazione.*

Tipicamente, i disturbi dovuti all'emissioni delle correnti differenziali si manifestano oltre i 100 MHz, quelli dovuti alle correnti di modo comune si manifestano al di sotto dei 200 MHz.

- *Suscettibilità radiata*

La suscettibilità rappresenta il degrado delle prestazioni di un sistema elettrico e/o elettronico causato da un determinato disturbo elettromagnetico. Si parla di suscettibilità radiata quando il sistema è sensibile alle emissioni radiate, cioè ai disturbi elettromagnetici che si propagano attraverso l'aria, come indicato in Figura 6.16 (b).

Il grado di suscettività di un sistema elettrico/elettronico ad un campo irradiato da un altro sistema, è un aspetto della compatibilità elettromagnetica che permette di costruire prodotti di qualità, affidabili ed efficienti.

- *Emissioni condotte*

Un'emissione si dice condotta se, generata da un certo sistema, si propaga lungo conduttori metallici (cavi di alimentazione elettrica, cavi per i collegamenti di controllo e segnalazione), sottoforma di tensione e/o corrente, causando interferenze con altri sistemi, come suggerito in Figura 6.16 (c). Generalmente questa tipologia d'accoppiamento è più efficiente di quella che si ha per effetto della propagazione in aria; di conseguenza, chi progetta sistemi elettrici e/o elettronici pone intenzionalmente barriere, per esempio filtri, lungo il percorso d'accoppiamento, in modo da bloccare la trasmissione d'energia non desiderata. È importante capire che il problema dell'interferenza spesso può andare ben oltre i confini mostrati nella Figura 6.16. Per esempio, le correnti che fluiscono in un cavo d'alimentazione, spesso vengono anche iniettate sulla rete di distribuzione dell'energia. Il sistema di distribuzione dell'energia elettrica, è costituito da un vasto insieme di fili interconnessi che collegano le diverse prese di corrente da cui i sistemi elettrici/elettronici ricevono l'alimentazione in corrente alternata. Essa, quindi, rappresenta un grande *sistema di antenne* dal quale le emissioni condotte sono in grado di irradiare con grande efficienza, causando interferenze negli altri sistemi dell'impianto. Pertanto, le emissioni

condotte possono essere la causa di emissioni radiate e quindi causa d'interferenze. Di conseguenza, i limiti imposti dagli enti normativi sulle emissioni condotte, hanno lo scopo di limitare le interferenze delle emissioni radiate dovute alle correnti di disturbo presenti sulla rete di distribuzione dell'energia, a causa della loro fuoriuscita attraverso i cavi d'alimentazione di un dato sistema.

Se un sistema elettrico/elettronico non rispetta i limiti normativi sulle emissioni condotte, il soddisfacimento delle norme sulle emissioni radiate è un'inutile precauzione: *il contenimento delle emissioni condotte ha la stessa importanza di quelle irradiate.*

La principale sorgente d'emissioni condotte è rappresentata in genere dall'alimentatore di un'apparecchiatura elettronica. Esistono tuttavia alcune importanti eccezioni come la disposizione dei fili destinati a portare segnali digitali di temporizzazione o di dati vicino ai fili d'alimentazione, che comportano l'accoppiamento dei segnali digitali con il cavo d'alimentazione.

Nella pratica, non esiste alcun prodotto elettronico che sia in grado di soddisfare le norme sulle emissioni condotte senza dover utilizzare filtri posti sul cordone d'alimentazione in prossimità della sua uscita dal prodotto.

- *Suscettibilità condotta*

La suscettibilità condotta di un sistema è la sensibilità dello stesso alle emissioni condotte, cioè ai disturbi elettromagnetici che si propagano attraverso i cavi, come schematizzato in Figura 6.16 (d).

I sistemi elettrici/elettronici, possono essere suscettibili a molte interferenze che sfruttano come via d'accesso i cavi d'alimentazione e/o i collegamenti di controllo e segnalazione. Un esempio ovvio è quello dei transistori indotti dai fulmini che colpiscono le linee di trasmissione dell'energia elettrica generando

sovratensioni, e quindi sovracorrenti, che si propagano lungo la linea, investendo tutti i sistemi che si trovano collegati ad essa.

6.5 Prevenzione dei fenomeni d'interferenza

Nell'ambito EMC, per prevenire i fenomeni d'interferenza esistono tre possibili soluzioni:

- 1. sopprimere l'emissione alla sorgente;*
- 2. rendere il fenomeno di accoppiamento il meno efficiente possibile;*
- 3. rendere il ricevitore (elemento sensibile) meno suscettibile all'interferenza.*

È opportuno evidenziare che la gerarchia va rispettata poiché diventa sempre più costoso passare da una linea di difesa alla successiva.

1. Sopprimere l'emissione alla sorgente

La prima “linea di difesa” per combattere le interferenze elettromagnetiche, è costituita dal sopprimere, per quanto sia possibile, l'emissione alla sorgente. In particolare si ricorda che, restringendo lo spettro delle emissioni, si riduce di conseguenza l'efficienza del fenomeno d'accoppiamento e quindi anche il livello del segnale captato al ricevitore (elemento sensibile). Un modo di procedere può essere quello di aggiungere, al sistema emettitore, componenti che riducano il livello delle emissioni radiate e condotte, anche se ciò comporta un costo aggiuntivo che va sommato al costo di produzione del prodotto stesso. Per esempio, i condensatori (di tipo ceramico o elettrolitico) vengono utilizzati per deviare (cortocircuitare) le componenti in alta frequenza di un segnale in

modo da evitare la propagazione su cavi o, in generale, su strutture che le irradierebbero in modo molto efficiente. Gli induttori, invece, vengono impiegati per sfruttare il loro *effetto di blocco* nei confronti delle correnti di disturbo.

Precedentemente è stato evidenziato che uno dei concetti più importanti circa le emissioni irradiate è quello che coinvolge le *correnti di modo comune* e le *correnti di modo differenziale*. Per ridurre il livello dell'irradiazione dovuta alle correnti di modo differenziale, ad una frequenza data, è possibile adottare i seguenti rimedi:

- ridurre l'intensità della corrente;
- ridurre l'area del circuito;

mentre per ridurre il livello di irradiazione dovuta alle correnti di modo comune, a una frequenza data è possibile adottare i seguenti rimedi:

- **ridurre l'intensità della corrente;**
- **ridurre la lunghezza della linea.**

2. *Rendere il fenomeno d'accoppiamento il meno efficiente possibile*

Per ridurre l'efficienza di un fenomeno d'accoppiamento, si possono evidenziare diversi metodi "di forza bruta", primo tra questi è la *schermatura*.

Il termine *schermo* si riferisce a contenitori metallici che racchiudono completamente un sistema elettrico/elettronico o una sua parte. I compiti di uno schermo sono due, così com'è illustrato nella Figura 6.19. Il primo, come descritto nella Figura 6.19 (a), è di impedire alle emissioni dei dispositivi elettronici dell'apparecchiatura o di una sua parte di irradiarsi all'esterno del

contenitore dell'apparecchiatura stessa. In questo caso la motivazione è di impedire che queste emissioni possano compromettere il soddisfacimento delle norme sulle emissioni irradiate oppure di impedire all'apparecchiatura di causare interferenze con altri apparecchi elettronici. Il secondo compito di uno schermo, illustrato nella Figura 6.19 (b), è di impedire alle emissioni irradiate esterne all'apparecchiatura di accoppiarsi con i dispositivi elettronici interni, causando interferenze al loro funzionamento.

Uno schermo è, quindi, concettualmente, una barriera alla trasmissione dei campi elettromagnetici. Purtroppo, però, *la schermatura è efficiente solo se lo schermo racchiude completamente i dispositivi elettronici e non presenta vie d'accesso verso l'esterno come aperture, giunture, fessure o cavi. Qualsiasi via d'accesso attraverso uno schermo, se non adeguatamente trattata, può ridurre drasticamente l'efficienza dello stesso.*

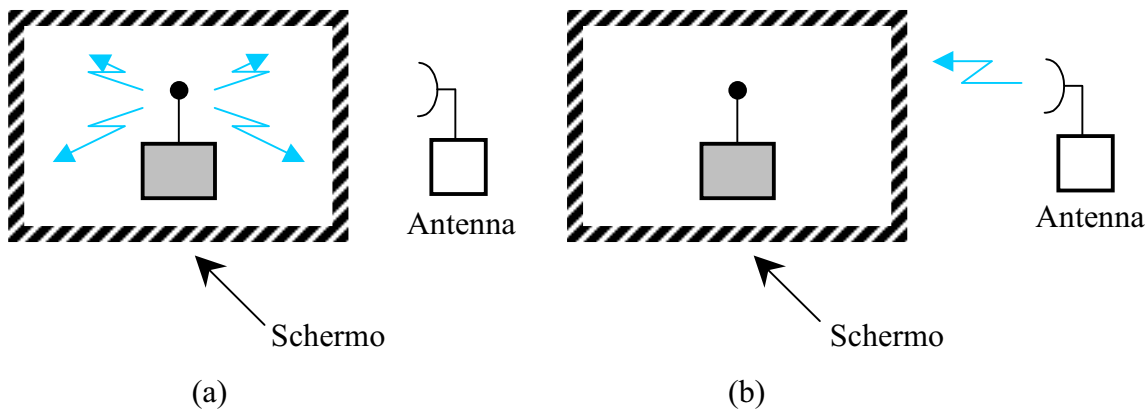


Figura 6.19: Illustrazione dell'utilizzo di un contenitore schermato:

(a) per impedire l'uscita delle emissioni irradiate;

(b) per impedire l'ingresso delle emissioni irradiate.

Il fenomeno dell'accoppiamento elettromagnetico non voluto tra fili e piste dei circuiti stampati che si trovano vicini tra loro è denominato *diafonia*. La diafonia

rappresenta un fenomeno di interferenza interna di un sistema: la sorgente dell'emissione elettromagnetica e il ricevitore di questa emissione, appartengono allo stesso sistema. Risulta importante sottolineare che, affinché si verifichi diafonia, occorre la presenza di almeno tre conduttori: in una linea di trasmissione a due conduttori non esiste il fenomeno della diafonia.

La diafonia può influenzare sia le emissioni radiate e/o condotte di una apparecchiatura, sia la suscettività di un apparato alle emissioni di un altro. Le emissioni di un certo sistema si possono accoppiare sul cavo d'alimentazione di un secondo sistema, da cui possono ulteriormente accoppiarsi internamente per diafonia a qualche altro cavo, e ciò rappresenta un aumento della suscettività al segnale esterno da parte del sistema. Per linee (senza perdite, perfettamente conduttrici, circondate da un mezzo senza perdite) elettricamente corte e debolmente accoppiate, l'accoppiamento è la sovrapposizione di due componenti, una dovuta alla mutua induttanza fra i due circuiti (accoppiamento induttivo) e l'altra dovuta alla mutua capacità fra i due circuiti (accoppiamento capacitivo). La componente di accoppiamento induttivo è dominante per carichi a bassa impedenza (correnti elevate, tensioni basse) mentre, la componente di accoppiamento capacitivo, è dominante per carichi ad alta impedenza (correnti basse, tensioni elevate). I contributi di accoppiamento induttivo e capacitivo sono funzioni dirette della frequenza di eccitazione e aumentano linearmente con essa.

In precedenza si è ipotizzata una linea senza perdite, perfettamente conduttrice e circondata da un mezzo senza perdite. L'ipotesi di un mezzo senza perdite è in genere un'ipotesi valida per frequenze sotto i GHz. I conduttori non perfetti possono, invece, causare una diafonia significativa a frequenze più basse. Questo fenomeno è detto *accoppiamento tramite l'impedenza di modo comune* e produce, alle basse frequenze, una diafonia di fondo praticamente indipendente dalla frequenza. L'accoppiamento totale è approssimativamente la somma degli accoppiamenti induttivo, capacitivo e tramite l'impedenza di modo comune.

Esistono due metodi comuni per ridurre la diafonia: sostituire il conduttore del circuito generatore e/o del circuito ricevitore con un conduttore schermato o con uno intrecciato. Se lo schermo è collegato a massa ad almeno un'estremità, il contributo dell'accoppiamento capacitivo è zero, mentre l'accoppiamento induttivo risente della presenza dello schermo, soltanto se è collegato a massa ad entrambe le estremità e la frequenza è maggiore dell'inverso della costante di tempo dello schermo. Sostituendo il filo del circuito ricevitore con una coppia di fili intrecciati e utilizzando uno di essi come conduttore di ritorno del circuito ricevitore, si riduce automaticamente l'accoppiamento induttivo (relativo al campo magnetico) semplicemente grazie all'intreccio. La coppia di fili intrecciati riduce l'accoppiamento capacitivo solo se i carichi terminali, ad entrambe le estremità, sono bilanciati rispetto al conduttore di riferimento.

3. *Rendere il ricevitore (elemento sensibile) meno suscettibile all'interferenza*

Ridurre la vulnerabilità del ricevitore nei confronti delle emissioni, risulta nella pratica molto difficile da realizzare poiché si rischia di non preservare le funzioni proprie del dispositivo. Si può, in ogni modo, ricordare, come esempio dell'utilizzo di questa tecnica, l'uso di codici in grado di correggere gli errori dovuti ad interferenze in un ricevitore.

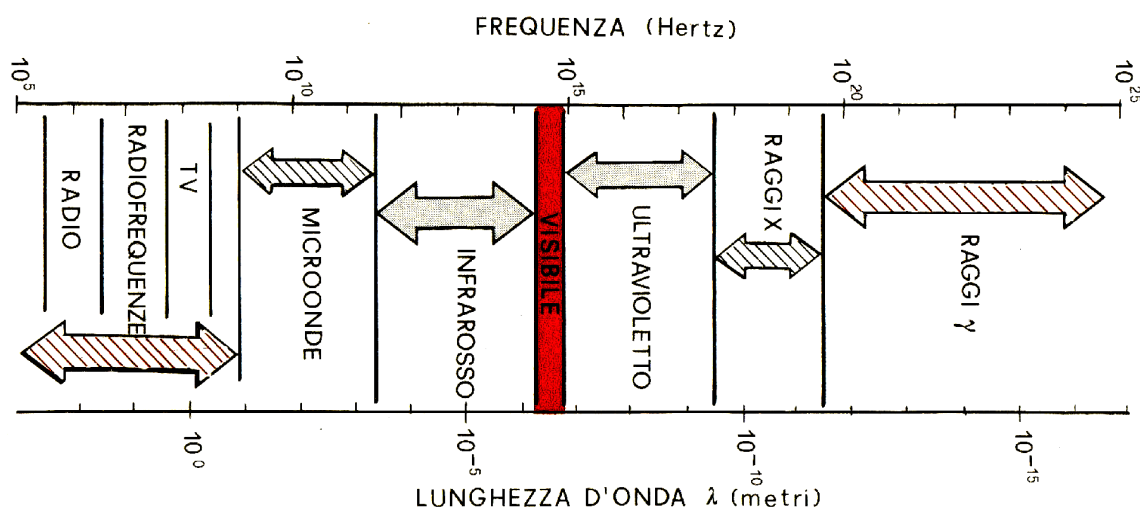


Figura 6.20: Spettro di frequenze

6.6 Sorgenti di disturbi elettromagnetici

Le sorgenti di disturbi elettromagnetici possono essere *naturali*, *artificiali intenzionali* o *artificiali non intenzionali*.

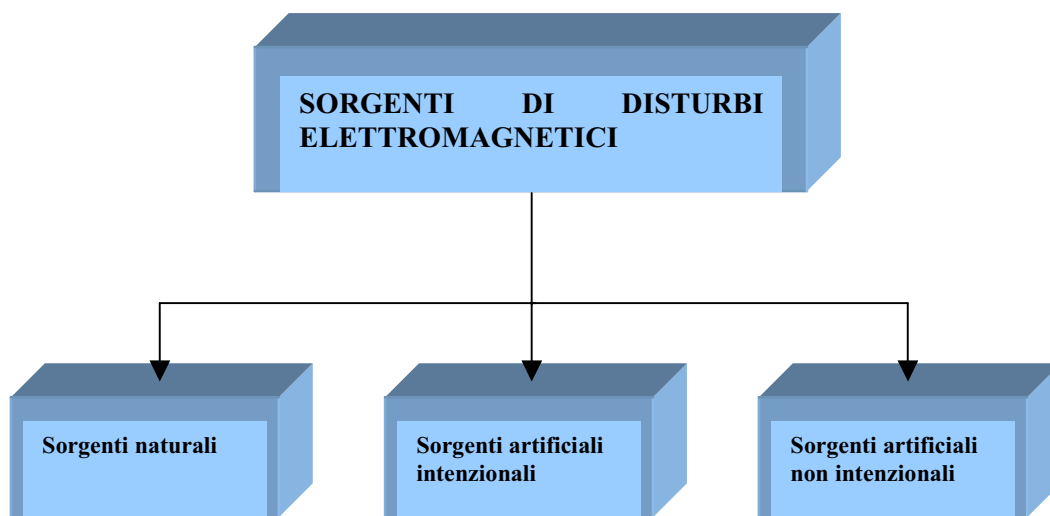


Figura 6.21: Sorgenti di disturbi elettromagnetici.

- **Sorgenti naturali di disturbi elettromagnetici**

Le sorgenti naturali più comuni di disturbi elettromagnetici sono brevemente classificate:

- **Sorgenti artificiali intenzionali di disturbi elettromagnetici**

Le sorgenti artificiali intenzionali di disturbi elettromagnetici più comuni nell'ambiente esterno sono:

- telefonia cellulare e cordless;
- emissioni radio e radiotelevisive;
- ponti radio;
- sistemi di radionavigazione, radars.

Nella tabella che segue sono elencate le frequenze d'emissione e la potenza tipica d'utilizzo di tali sorgenti.

Sorgenti artificiali intenzionali

SORGENTE	MHz	W
Telefono Cordless	46-60	0.1-1
Cellulare TACS	890-915	0.1-1
Cellulare GSM	890-915	0.1-1
Cellulare DualBand	1850-1900	0.1-1
Stazione radio base DECT	1850-1900	0.250-4
Stazione radiomobile fissa Tacs	935-960	120-2880
Stazione radiomobile fissa GSM 900	935-960	40-720
Stazione radiomobile fissa GSM 900-GSM 1800	935-960 1850-1900	80-1440
Stazione radiomobile fissa TACS-GSM 900	935-960 1850-1900	160-3600
Stazione radiomobile fissa TACS-GSM 900 GSM 1800	935-960 1850-1900	240-5000
TELEPASS	5700	0.1-0.5
Walkie Talkie	27	1-75
Impianto per il radioamatore	27	5-300

	164	
Stazione radio AM		
Onde lunghe	0.155-0.286	10000-5000000
onde medie	0.525-1.605	
Onde corte	3.950-21.100	
Stazione radio FM	87.5-108	500-200000
Stazione TV a frequenza VHF	47-230	500-5000000
Stazione TV a frequenza UHF	470-862	
Ponti radio	0.500-40000 più usate 450 3700-4200 5925-6425 10700-11700	0.5-1000
Parabole satellitari per la trasmissione da terra verso i satelliti	100-275000 più usate 1120-1760 5850-6650 14000-14500 27000-31000	50-3000
Radar civili per il controllo del traffico marittimo	3000-10000 più usate 3000-3246 5460-5650 9320-9500	50000-1000000 (5000-100000 di potenza media)
Radar civili per il controllo del traffico aereo	1000-10000	50000-1000000 (5000-100000 di potenza media)
Radar militari per la difesa aerea	10000-40000	50000-1000000 (5000-100000 di potenza media)

Tabella 6.1: sorgenti artificiali intenzionali.

- **Stazioni radio per la telefonia cellulare e mobile**

Sistema GSM

Il sistema GSM (*Global System for Mobile Communication*) è lo standard europeo per la trasmissione digitale per la telefonia cellulare. La banda di frequenza occupata da tale sistema va da 935 MHz a 960 MHz per la trasmissione dalla stazione radio base fissa al terminale mobile e da 890 MHz a 915 MHz per la trasmissione da terminale mobile a stazione radio base fissa. Questi intervalli di frequenze sono suddivisi in segmenti di banda con larghezza tipica di 200 kHz. Ognuno di questi intervalli, rappresenta un canale per la trasmissione dei dati.

Per ridurre le interferenze tra i canali di trasmissione adiacenti, la potenza di trasmissione dei canali di trasmissione, a disposizione della singola stazione radio base, viene continuamente regolata da essa. Il telefono cellulare irradia un segnale con le informazioni del livello e della qualità del segnale ricevuto. La stazione radio base comunica al cellulare, in funzione di queste informazioni, di diminuire la potenza di trasmissione, oltre che diminuire la propria, e di aumentarla quando il cellulare si allontana. Questo controllo dinamico della potenza si traduce in una riduzione del livello della potenza complessiva irradiata dalla stazione base. Un ulteriore controllo della potenza di trasmissione, è effettuata dalla modalità discontinua della trasmissione tra la stazione radio base ed il cellulare. Quando l'utente non parla, la potenza trasmessa dal cellulare diminuisce sensibilmente.

La localizzazione e la disposizione delle stazioni radio base, è determinata dal numero di utenti da servire di ciascun'area, dalle interferenze con le altre stazioni radio base dei diversi gestori, dall'orografia della zona e dalla presenza di ostacoli.

La potenza massima di trasmissione di un terminale mobile (cellulare) varia da 0.8 W a 20 W ed è suddivisa in cinque classi di potenza.

Il sistema GSM 1800 è il nuovo standard europeo per la trasmissione digitale per la telefonia cellulare. La banda di frequenza assegnata a tale sistema va da 1835 MHz a 1880 MHz per la trasmissione dalla stazione radio base fissa al terminale mobile, e da 1740 MHz a 1785 MHz per la trasmissione da terminale mobile a stazione radio base fissa. Anche in questo caso, questi intervalli di frequenze sono utilizzati suddividendoli in segmenti di banda con larghezza tipica di 200 kHz.

La potenza massima di trasmissione del singolo canale di una stazione radio base fissa è di circa 5-15 W, mentre la potenza massima di trasmissione di un terminale mobile, varia da 0.6 W a 10 W ed è suddivisa in quattro classi di potenza.

Sistema TACS

Il sistema TACS utilizza il sistema di trasmissione analogica a divisione di frequenza FDMA (*Frequency Division Multiple Access*).

La banda di frequenza assegnata a tale sistema va da 935 MHz a 960 MHz per la trasmissione dalla stazione radio base fissa al terminale mobile, e da 890 MHz a 915 MHz per la trasmissione da terminale mobile a stazione radio base fissa. Questi intervalli di frequenza sono suddivisi in segmenti di banda con larghezza tipica pari a 25 kHz. Ognuno di questi intervalli rappresenta un canale per la trasmissione dei dati.

La potenza massima all'antenna di trasmissione del singolo canale di una stazione radio base fissa è di circa 20 W. La potenza massima di trasmissione del terminale mobile varia da 0.6 W a 10 W ed è suddivisa in quattro classi potenza.

Sistema DECT

Il sistema DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunication*) è costituito da una rete di stazioni fisse (RFP), emittenti a radiofrequenza, per la comunicazione pubblica mediante telefoni portatili denominati *cordless*.

Le stazioni fisse sono costituite, generalmente, da un piccolo contenitore in vetroresina contenente gli apparati di ricetrasmissione collegati alle antenne mediante cavo di trasmissione o fissate direttamente all'estremità degli stessi.

Le unità mobili provvedono periodicamente a localizzare la stazione DECT fissa più vicina.

La potenza nominale tipica di trasmissione di ogni stazione fissa è pari a 250 mW e ad ogni canale (portante) viene trasmessa una potenza nominale di circa 25 mW. Chiaramente, la potenza media trasmessa dalla stazione fissa dipende dal numero di portanti attive che varia in funzione del numero di utenti collegati alla stazione fissa.

• Sistemi di trasmissione radiotelevisiva

Antenne radiotelevisive

I sistemi di trasmissione radiotelevisiva sono costituiti da impianti di varia grandezza e potenza. La potenza può anche arrivare a centinaia di chilowatt per gli impianti di trasmissione a copertura nazionale o internazionale.

Gli impianti sono normalmente installati su tralicci metallici posti ad una certa altezza dal suolo o, più raramente, sui tetti di edifici (televisioni e radio private).

Per il servizio radiofonico, possono essere utilizzate le seguenti bande di frequenza:

0.155-0.286 MHz	(onde lunghe)	}
	530	

0.525-1.605 MHz (onde medie) AM;

3.950-21.100 MHz (onde corte)

87.5-108 MHz FM.

Il servizio televisivo è invece trasmesso nelle seguenti bande di frequenze:

➤ Banda I e III: 47-230 MHz (VHF);

➤ Banda IV e V: 470-862 MHz (UHF).

La trasmissione a frequenze all'interno delle bande LF e MF (da 30 kHz a 3 MHz) avviene nelle ore diurne mediante la normale diffusione di onde di terra mentre nelle ore notturne, è possibile sfruttare la riflessione delle onde nella ionosfera (zona alta dell'atmosfera terrestre) per la propagazione a lunga distanza (anche 2000 Km) con una bassa attenuazione.

Per gli impianti a basse frequenze di trasmissione è importante che la stazione abbia a disposizione del terreno libero da ostacoli, per avere una buona propagazione delle onde di terra.

Parabole di trasmissione dati satellitari

I sistemi di trasmissione via satellite sono usati principalmente per la trasmissione di dati e d'immagini televisive in digitale, il telerilevamento da satellite e la gestione di satelliti commerciali e militari.

La banda di frequenze di trasmissione a disposizione è tra 100 MHz e 275 GHz.

Le bande di frequenza maggiormente utilizzate sono:

- 1.12-1.76 GHz Banda L;
- 5.85-6.65 GHz Banda C;
- 14.0-14.5 GHz Banda Ku;
- 27-31 GHz Banda Ka.

Le antenne utilizzate per le stazioni di ricezione terrestre sono costituite da un riflettore parabolico circolare con diametro tanto più elevato quanto più è elevata la distanza da coprire fino al satellite. I livelli dei campi elettromagnetici sono molto bassi nelle aree adiacenti l'antenna a causa dell'alto guadagno e dell'alta direttività del fascio emesso. Solo i punti più vicini alla parabola sono caratterizzati da intensità dei campi elevate.

Ponti radio

I ponti radio hanno lo scopo di collegare due punti lontani tra di loro a distanza visiva e senza ostacoli intermedi. Sono utilizzabili in alternativa alla posa di cavi per la trasmissione di dati e fonia. In generale, i sistemi sono unidirezionali: un'antenna trasmette i segnali verso la seconda antenna che ha il solo compito di ricevere tali dati. Esistono anche sistemi bidirezionali quali, ad esempio, quelli utilizzati per l'automazione, il monitoraggio ed il controllo a distanza degli impianti.

Per ridurre le interferenze dovute alla stessa frequenza, si adotta l'accorgimento di polarizzare diversamente le onde in trasmissione all'unica antenna ricevente e trasmittente per poterle facilmente separare in ricezione.

I livelli di potenza in trasmissione variano, a seconda dell'impianto, da pochi watt ad alcune centinaia di watt complessivi suddivisi in un o più canali di trasmissione. I livelli di campo elettromagnetico sono in generale bassi a causa dell'elevato guadagno delle antenne, dell'alta direttività e delle limitazioni imposte dal Ministero delle Poste e Telecomunicazioni al raggio dell'area servita dal fascio emesso. Le intensità dei campi aumentano solo per gli edifici posti nelle immediate vicinanze dell'antenna e nella direzione d'orientamento del ponte radio.

Impianti per radioamatori

Si tratta d'impianti per la trasmissione amatoriale mediante apparati di trasmissione di piccola potenza. Le licenze sono di tre classi corrispondenti alle potenze massime di alimentazione anodica dello stadio finale del trasmettitore consentite rispettivamente per 75, 150, 300 W.

Gli impianti delle stazioni di radioamatori, per quanto si riferisce alle installazioni delle radioapparecchiature, devono essere conformi alle norme di buona tecnica del Comitato Elettrotecnico Italiano.

Le bande di frequenza assegnate per l'esercizio di stazioni di radioamatore, nonché le classi di emissione permesse su ciascuna Banda, sono le seguenti:

- 3.613-3.627 MHz in modulazione di ampiezza;
- 3.647-3.667 MHz in modulazione di ampiezza;
- 7.000-7.100 MHz in modulazione di ampiezza;
- 14.000-14,350 MHz in modulazione di ampiezza;

- 21.000-21.450 MHz in modulazione di ampiezza o frequenza;
- 28.000-29.700 MHz in modulazione di ampiezza o frequenza;
- 144-146 MHz in modulazione di ampiezza o frequenza o di impulsi.

Radar

Le frequenze normalmente utilizzate per i radar di controllo aereo, navale, veicolare e di difesa aerea sono determinate dalla risoluzione spaziale dell'oggetto di cui si vuole conoscere la posizione e la velocità. I radar militari sono generalmente caratterizzati da una frequenza particolarmente elevata dell'ordine di varie decine di gigahertz. Le bande di frequenza utilizzate per tali radar sono la banda S (UHF e SHF da 1550 a 5200 MHz), la banda C (SHF da 3900 a 6200), la banda X (SHF da 5200 a 10900 MHz), la banda J (SHF da 10900 a 18000 MHz), la banda K (SHF e EHF da 18000 a 36000 MHz) e la banda Q (EHF da 36000 a 47000 MHz).

Poiché le dimensioni delle navi sono abbastanza elevate, i radar utilizzati per il controllo della navigazione marittima civile e mercantile, operano generalmente nella banda S a frequenze variabili da 3000 a 3246 MHz, e nella banda X a frequenze variabili da 5460 a 5650 MHz e da 9320 a 9500 MHz.

Le potenze utilizzate per il trasmettitore sono in generale considerevoli (anche dell'ordine dei megawatt), ma tale potenza viene utilizzata per l'emissione di impulsi di breve durata e pertanto la potenza media irradiata da un radar in generale è di mille volte inferiore alla potenza nominale dell'antenna trasmittente. Inoltre, deve essere considerata la rotazione dell'antenna del radar che riduce ulteriormente la potenza media irradiata in un punto.

I radar utilizzati per la meteorologia sono in generale utilizzati a frequenze più basse ed in particolare nella banda P (VHF da 220 a 390 MHz), nella banda L (UHF da 390 a 1550 MHz) e nella banda X (SHF da 5200 a 10900 MHz).

6.7 Sorgenti artificiali non intenzionali di disturbi elettromagnetici

Qualunque circuito elettrico percorso da corrente variabile nel tempo emette disturbi elettromagnetici. Tra i disturbi artificiali non intenzionali rientrano le emissioni dovute a:

- sistemi elettromeccanici;
- alimentatori a commutazione;
- brusca interruzione di correnti su carichi induttivi;
- circuiti di clock, all'attività dei BUS e delle schede digitali;
- scariche nei gas;
- linee di trasporto dell'energia elettrica.

In genere l'entità del disturbo artificiale cresce con la rapidità della variazione della corrente o della tensione che lo ha generato. Le norme prevedono una serie di prove sia per verificare l'entità dei disturbi artificiali emessi, sia per testare la suscettibilità degli apparati e dei sistemi alle diverse tipologie di disturbo. Tra le sorgenti artificiali di disturbi elettromagnetici, rientrano anche le onde elettromagnetiche di forte intensità create dalla separazione e dal movimento di cariche durante un'esplosione nucleare (NEMP).

- **Sistemi elettromeccanici**

Motori in corrente continua

I motori in c.c. sono macchine elettriche impiegate per generare movimento di tipo rotatorio. Dal punto di vista costruttivo, il motore è costituito da uno *statore* (parte fissa del motore) contenente gli avvolgimenti d'eccitazione, da un *rotore* (parte mobile) contenente gli avvolgimenti d'armatura, e da un *commutatore* (collettore), costituito da lamelle metalliche elettricamente isolate, che consente di trasferire, con l'ausilio di opportune spazzole di carbone striscianti su esso, la corrente continua a opportuni avvolgimenti del rotore.

Il principio di funzionamento di tali macchine, si basa sull'azione elettrodinamica che si sviluppa tra gli avvolgimenti statorici e rotorici, entrambe percorsi da corrente continua proveniente da una sorgente esterna, originando una coppia motrice. A ogni connessione o interruzione tra le spazzole e il collettore, si generano archi elettrici dovuti al fatto che la corrente continua, che s'intende trasferire agli avvolgimenti del rotore, viene periodicamente interrotta. Questo fenomeno genera segnali con componenti spettrali a frequenze molto elevate, per cui si possono avere problemi di emissioni radiate nella banda presa in considerazione dalla normativa e che va da 200 MHz a 1 GHz.

Un'altra sorgente di rumore, con componenti spettrali a elevate frequenze, che è potenziale causa di problemi d'emissioni radiate ed emissioni condotte, è localizzata nel *circuito di azionamento* del motore stesso. Il suo compito è quello di comandare e controllare il senso di rotazione e la velocità del motore. La corrente che viene fornita al motore da tale circuito, pur dovendo essere idealmente costante, solitamente contiene impulsi con tempi di salita molto brevi dovuti alle continue interruzioni che la corrente, che percorre il circuito di azionamento e gli avvolgimenti sul rotore, subisce per opera del collettore. Tali impulsi raggiungono il telaio del motore e le loro componenti a frequenze estremamente elevate, sono in grado di accoppiarsi con altre parti del sistema, generando così problemi d'emissioni radiate. Inoltre, l'area del circuito

costituito dalle terminazioni (i fili di collegamento) e dal conduttore di ritorno (il telaio del motore) tende ad essere piuttosto grande e la tendenza di un circuito ad irradiare risulta essere direttamente proporzionale all'area del circuito stesso. Infatti maggiore è l'area descritta dalla corrente nel suo percorso chiuso, maggiori sono i livelli delle emissioni radiate.

Motori in corrente alternata

L'assenza delle spazzole e del conseguente fenomeno di arco elettrico, tipico dei motori a collettore, rendono i motori in corrente alternata potenzialmente meno critici nei confronti della generazione di rumore elettromagnetico. Tuttavia, poiché il rotore e lo statore di questo tipo di motore, sono costituiti da induttori tra loro molto ravvicinati, si generano, tra queste parti, capacità parassite d'elevato valore. Quindi, nel caso in cui il telaio del motore sia collegato ad altre parti meccaniche del sistema in cui si trova ad operare, esiste la possibilità che correnti di modo comune presenti sulla rete di alimentazione, raggiungano tutte le parti del sistema e viceversa. Per esempio, se sono presenti disturbi ad elevata frequenza sulla corrente sinusoidale in ingresso (lo statore è ancorato sul telaio), allora è molto probabile che tali disturbi si trasferiscano al telaio dove l'efficienza di irradiazione è sicuramente superiore.

Interruttori di tipo elettromeccanico

I problemi di compatibilità elettromagnetica che si possono presentare alla commutazione di un interruttore, sono diversi e dipendono pesantemente dal carico del circuito che subisce la commutazione.

La causa principale d'interferenza è l'arco elettrico che si forma in corrispondenza dei suoi contatti: la forma d'onda dell'arco può contenere componenti spettrali di grande ampiezza a frequenze estremamente elevate.

- **Dispositivi digitali**

Il crescente successo dei circuiti digitali è dovuto sia alle loro sempre maggiori potenzialità di elaborazione dei dati, sia all'intrinseca immunità ai disturbi. Nonostante tali caratteristiche, i dispositivi digitali sono soggetti a problemi di compatibilità elettromagnetica.

In questa categoria di circuiti, i dati vengono rappresentati, trasmessi ed elaborati sottoforma di impulsi le cui transizioni (tempi di salita e di discesa) sono estremamente brevi (dell'ordine di 1-20 ns). A transizioni così rapide corrispondono componenti spettrali a frequenze molto elevate che contribuiscono alle emissioni radiate e condotte del dispositivo.

Il contenuto in frequenza, o spettro, dei segnali presenti in un sistema elettronico, è forse l'aspetto più importante della capacità del sistema non soltanto di soddisfare le norme, ma anche di essere compatibile con altri sistemi elettronici. I segnali più importanti che contribuiscono direttamente alle emissioni radiate e condotte dei sistemi elettronici digitali sono segnali periodici. Questi tipi di forme d'onda sono rappresentativi dei segnali di temporizzazione (per esempio il clock di un computer) e delle sequenze di dati necessari per il corretto funzionamento del sistema.

- **Conduttori**

Si dimentica spesso di considerare i conduttori di un sistema (cavi e piste dei circuiti stampati) come componenti del sistema stesso. Essi possono trasportare segnali di potenza e informativi.

L'errore frequente che si commette è supporre che i cavi trasportino solo segnali intenzionali. Il comportamento di questi elementi, nell'intervallo di frequenze regolamentato dalle norme, è tutt'altro che ideale, sia per quanto riguarda le

emissioni radiate (30 MHz - 40 GHz) sia per quelle condotte (150 kHz - 30 MHz). Occorre ricordare che l'emissione dei cavi aumenta con la lunghezza e, per il teorema di reciprocità, la loro suscettività aumenta anch'essa con la lunghezza.

- **Alimentatori a commutazione**

La principale sorgente di emissioni condotte è rappresentata in genere dall'alimentatore di un'apparecchiatura elettronica. La funzione primaria di un alimentatore consiste nel convertire la tensione alternata di 220 V / 50 Hz, distribuita dalla rete di alimentazione commerciale, nei livelli di tensione continua richiesta dai vari componenti di una apparecchiatura e nel mantenerli costanti al variare delle condizioni di carico. Alcuni alimentatori, come quelli a commutazione (*Switched-Mode Power Supply*) basano il loro funzionamento su impulsi con fronti di salita e di discesa rapidi, per contenere le perdite di potenza. Tali impulsi hanno un contenuto spettrale significativo alle alte frequenze e rappresentano la principale fonte di disturbo (emissione condotta e irradiata) di un alimentatore a commutazione. Un altro inconveniente degli alimentatori a commutazione riguarda le armoniche del segnale di commutazione che, uscendo direttamente dal cordone di alimentazione, "inquinano" la rete di distribuzione dell'energia.

- **Linee di trasporto dell'energia elettrica**

In Italia il trasporto dell'energia elettrica avviene a tensione alternata e mediante linee aeree: l'energia viene trasportata, alla frequenza nominale di 50 Hz, attraverso terne di conduttori nudi in alluminio-acciaio, sostenuti da tralicci metallici.

Le distribuzioni del campo elettrico e del campo magnetico nello spazio circostante la linea elettrica non sono correlate tra loro, essendo a basse frequenze, e assumono valori diversi in funzione delle caratteristiche della linea. L'intensità del campo elettrico dipende principalmente dalla tensione presente nel conduttore elettrico che lo genera: aumenta all'aumentare della tensione nominale della linea e si mantiene sostanzialmente costante nel tempo. Il valore del campo elettrico in un punto adiacente alla linea, dipende principalmente dalla distanza in cui esso si trova: l'intensità diminuisce con legge quadratica, cioè, raddoppiando la distanza, il valore del campo elettrico si riduce di 4 volte.

L'intensità del campo magnetico, invece, dipende principalmente dall'intensità della corrente che percorre il conduttore. Pertanto, durante la giornata, il campo magnetico varia considerevolmente in relazione alla particolare richiesta d'energia elettrica nella zona servita dall'elettrodotto. In generale, il valore del campo magnetico raggiunge il minimo durante le ore notturne, quando la richiesta d'energia raggiunge i valori più bassi.

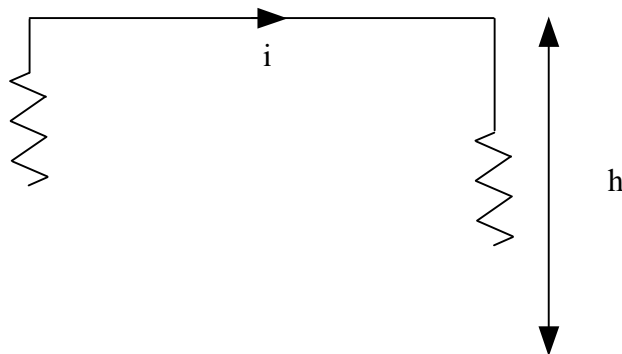
Il campo elettrico sostenuto dalle linee elettriche è fortemente influenzato dagli ostacoli ed in particolare dalle masse metalliche presenti nella zona d'influenza. È sufficiente una finestra chiusa o una parete in muratura per attenuare di un ordine di grandezza il campo elettrico. L'attenuazione è ancora maggiore quando s'interpone una lamina metallica o una rete metallica, con dimensione della maglia, inferiore alla lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche generate dall'elettrodotto.

La forma e l'intensità del campo magnetico nella zona adiacente l'elettrodotto sono anch'esse influenzate dagli ostacoli e dalle masse interposte; tuttavia, l'effetto schermante di questi ostacoli nei confronti del campo magnetico, è notevolmente inferiore. Solo gli ostacoli con elevata massa ed in particolare i materiali magnetizzabili (ferro) possono, se opportunamente sagomati, ridurre l'intensità del campo magnetico.

La coesistenza di reti di trasporto dell'energia e reti di telecomunicazione, tipicamente parallele alle prime, dà origine a problemi di compatibilità elettromagnetica di vario genere. Dal punto di vista fisico, l'origine dei problemi EMC, risiede nell'accoppiamento *induttivo*, *capacitivo* e *resistivo*, che si realizza tra i due tipi di reti.

6.8 Meccanismi d'emissione, suscettibilità ed accoppiamento elettromagnetico

- Interferenze irradiate nel caso di un anello



Il campo E è proporzionale all'area dell'anello,
è proporzionale alla corrente I e al quadrato
della frequenza, e decresce con la distanza r .

Figura 6.22: Circuito percorso da corrente.

Qualunque circuito percorso da una corrente variabile nel tempo irradia segnali elettromagnetici. Quanto viene affermato e mostrato nella Figura 12 vale in condizioni di *campo lontano*, cioè per un misuratore posto ad una distanza dal circuito irradiante sufficientemente grande rispetto alla lunghezza d'onda ed alle dimensioni lineari del circuito. In caso contrario, il campo irradiato dipende anche dall'impedenza del circuito irradiante, ed è valutabile con relazioni più complesse. Per valutare il campo irradiato occorre in ogni caso conoscere lo spettro di frequenza del segnale che è presente nel circuito, e l'irradiazione sarà tanto più efficace quanto più lo spettro conterrà frequenze elevate.

- **Dipolo elettrico**



Figura 6.23: Dipolo elettrico.

Un altro meccanismo di emissione è di seguito riassunto.

Se due conduttori (o un conduttore rispetto ad un'ampia superficie metallica) sono mantenuti ad una differenza di potenziale che varia nel tempo, nello spazio circostante si crea un campo elettrico che varia anch'esso nel tempo, e che si propaga come irradiazione elettromagnetica. Questo effetto è particolarmente sentito quando non si riesce a mantenere equipotenziali tutti i conduttori considerati a 0 V. Se, infatti, il piano di 0 V di una scheda non è equipotenziale con quello di un'altra scheda, o con il contenitore metallico dell'apparato, si creano dei dipoli elettrici che, purtroppo, sono molto efficaci nell'irradiare lo spazio circostante. Questo tipo d'emissione, molto frequente nelle realizzazioni pratiche, è uno dei meccanismi di "emissione di modo comune". Tutti i circuiti e i dipoli possono, dualmente, funzionare anche con altrettanta efficacia da antenne riceventi e quindi essere causa di suscettibilità ai disturbi irradiati.

- Problemi di “Grounding”

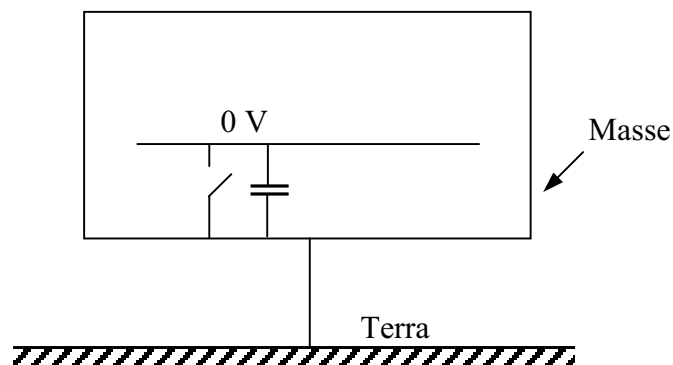


Figura 6.24: Grounding.

Purtroppo, nella pratica comune, si è soliti chiamare con il nome di “massa” o di “terra” indifferentemente molte strutture che invece hanno significato ben diverso l’una dall’altra e che è bene non siano confuse.

Riferimento di tensione a 0 V: i circuiti, per scambiarsi informazioni, devono misurare le tensioni rispetto ad un riferimento comune che si definisce a 0 V. Questo riferimento è costituito da una rete di conduttori che si diffonde in tutto l’apparato, e che dovrebbe essere equipotenziale. Purtroppo, le cadute di potenziale dovute all’impedenza dei conduttori, e alle correnti che li percorrono, rendono non equipotenziale il riferimento.

Masse: tutti gli oggetti metallici presenti (contenitori, dissipatori di calore) che non hanno funzione elettrica ma che possono presentare accoppiamenti parassiti con i circuiti dell’apparato sono definite masse.

Terra: Tutte le masse accessibili da un utente, per ragioni di sicurezza, devono essere riferite alla terra dell’edificio o dell’impianto.

In ogni apparato, poi, non esiste in genere un solo riferimento a 0 V, ma più alimentazioni e quindi diversi sistemi di riferimento. I sistemi di riferimento a 0 V, e la loro interconnessione, devono essere realizzati in modo da essere quanto più equipotenziali possibile, per evitare da un lato errori nella trasmissione di segnali e diafonie, dall'altro irradiazioni di modo comune. Inoltre, occorre chiedersi di caso in caso se conviene che le masse siano connesse allo 0 V (e nel caso in quali punti), e se il collegamento debba essere in continua o tramite un condensatore. La presenza simbolica dell'interruttore in Figura 14 vuole proprio indicare questo dilemma. In ogni caso, anche se si lasciano masse flottanti, occorre ricordare che, data l'estensione delle superfici interessate, vi sarà una capacità parassita non trascurabile alle alte frequenze tra masse e 0 V.

La scelta della miglior realizzazione del “grounding” è fondamentale per quanto riguarda il comportamento di sistemi ed apparati all'EMC.

- **Vie d'accoppiamento tra apparato e ambiente EM**

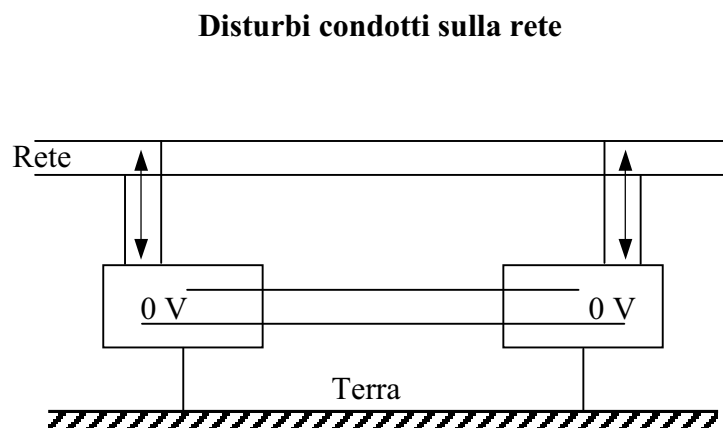


Figura 6.25: Disturbi condotti sulla rete.

Si prendono ora in esame i principali meccanismi di accoppiamento tra ambiente e sistema, ipotizzando di avere due apparati, (o due parti dello stesso apparato) che devono scambiarsi informazioni. Nella Figura 6.25, sono evidenziati in modo schematico, il riferimento di tensione, le masse e la terra, nonché le connessioni.

Gli apparati e i sistemi, se non alimentati da batteria interna, ricevono l'alimentazione da una fonte esterna di potenza che serve anche agli utilizzatori. Da un lato, durante il suo funzionamento, l'apparato non deve emettere su questi conduttori segnali non voluti di entità superiore a quanto ammesso dalle norme, dall'altro, pur in presenza di disturbi condotti sui cavi di alimentazione, dovuti all'attività degli altri utilizzatori o da fenomeni naturali (per esempio, fulmini) o dal non perfetto funzionamento dell'alimentatore dell'apparato, deve poter funzionare correttamente.

Disturbi condotti sulla terra

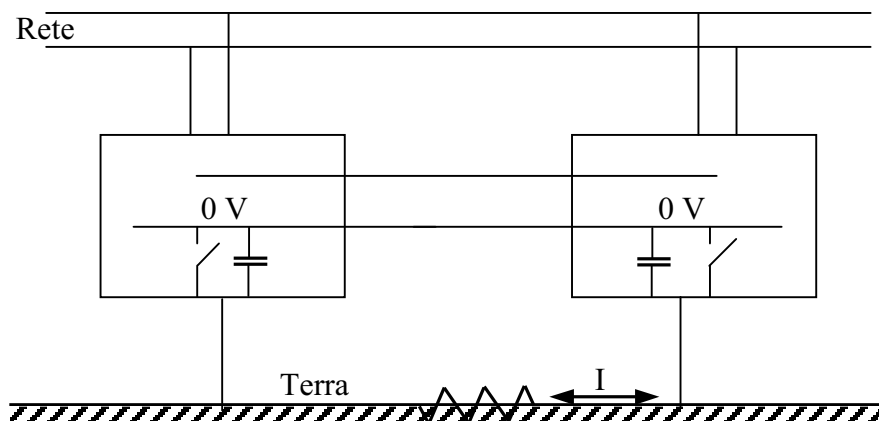


Figura 6.26: Disturbi condotti sulla terra.

Sull'impianto di terra circolano correnti dovute alle emissioni di modo comune di tutti gli apparati connessi allo stesso impianto. Poiché l'impedenza dei

conduttori di terra non è nulla, ma è significativa soprattutto alle alte frequenze (un tratto di conduttore presenta un'induttanza stimabile in circa 10 nH per ogni cm di lunghezza), le correnti che vi transitano, provocano cadute di potenziale che si presentano come tensioni di disturbo tra i riferimenti di tensione a 0 V degli apparati che devono scambiarsi segnali, con possibili errori o diafonie. Questo effetto è maggiormente sentito se le masse sono connesse ai riferimenti di tensione a tensione nulla. I segnali condotti sulla terra sono detti “segnali di modo comune”.

Disturbi condotti sulle interconnessioni

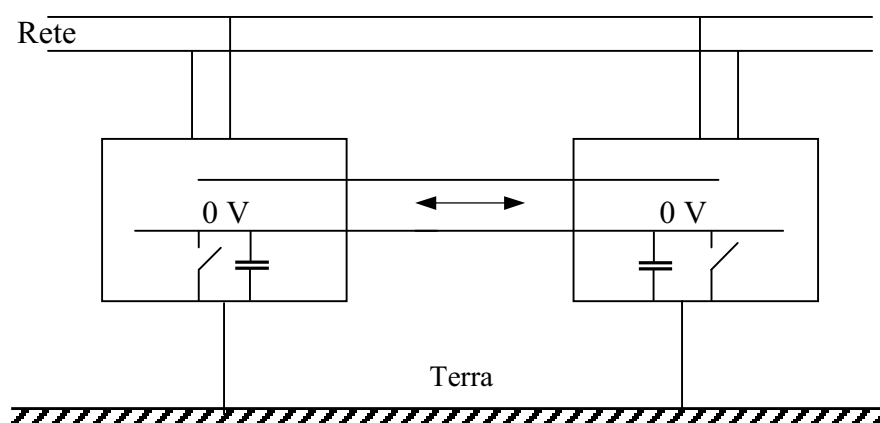


Figura 6.27: Disturbi condotti sulle interconnessioni.

Sulle linee di interconnessione viaggiano i segnali che gli apparati devono scambiarsi, sia sotto forma di informazione sia di regolazione di potenza. Purtroppo, però, possono essere presenti anche segnali non voluti, e quindi disturbi, dovuti a:

- accoppiamenti parassiti che avvengono all'interno degli apparati stessi, con circuiti molto emittenti (es. clock, circuiti PWM, alimentatori a commutazione, ecc);
- accoppiamenti parassiti di tipo induttivo o capacitivo con le linee di connessione, di altri sistemi o apparati, che viaggiano nelle vicinanze e che sono sedi di correnti o di tensioni fortemente variabili nel tempo.

Introducendo filtri passabasso all'ingresso di ogni apparato che limitano la banda passante a quella strettamente necessaria per il segnale utile, si riduce fortemente l'entità di tutti i disturbi che hanno componenti in frequenza al di fuori della banda passante del filtro.

Disturbi irradiati di modo differenziale

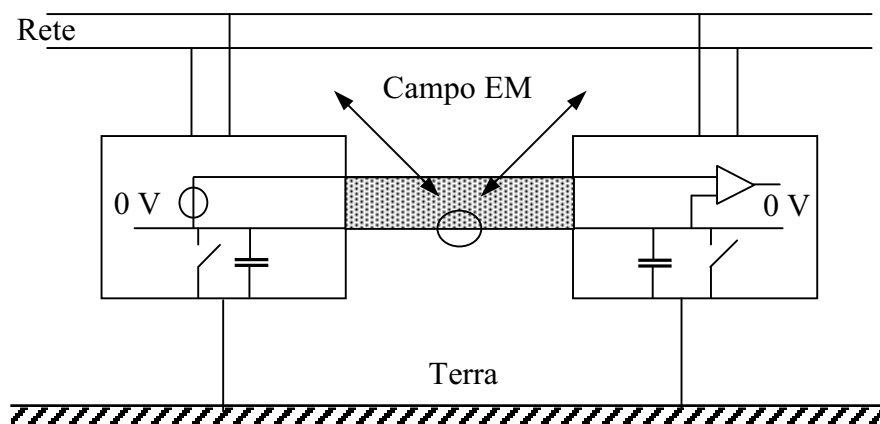


Figura 6.28: Disturbi irradiati di modo differenziale.

I disturbi elettromagnetici presenti nello spazio circostante possono accoppiarsi con le linee di interconnessione, che funzionano da antenne, e traducono questi segnali in equivalenti tensioni che, presentandosi come modo differenziale, sono del tutto indistinguibili dai segnali utili e quindi possono alterare il funzionamento degli apparati.

Inoltre, la presenza di segnali (sia voluti, sia non voluti) sottoforma di tensioni e correnti variabili sulle linee di interconnessione, comporta un segnale irradiato che costituisce l'emissione irradiata di modo differenziale. In prima approssimazione, e per segnali a frequenza non troppo elevata, l'accoppiamento cresce con la frequenza e con l'area della spira; è possibile ridurre drasticamente questo tipo di accoppiamento, rallentando i fronti di commutazione e soprattutto intrecciando tra loro i fili di connessione.

Disturbi irradiati di modo comune

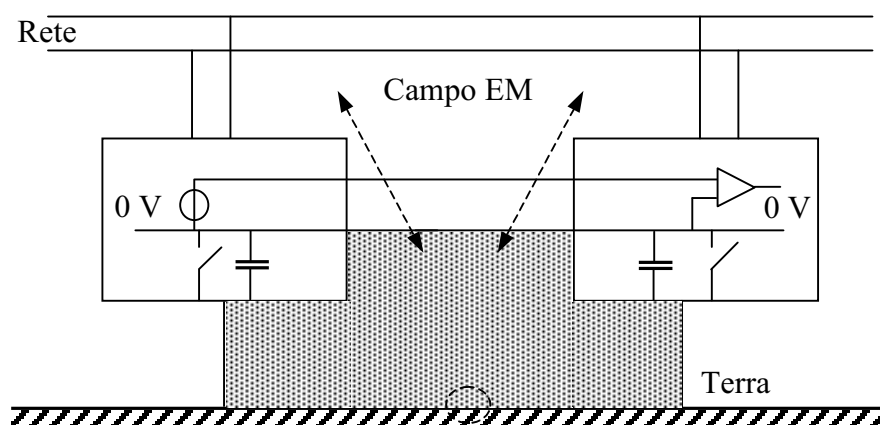


Figura 6.29: Disturbi irradiati di modo comune.

Esiste, però, un altro anello, in genere d'area molto più grande dei precedenti, costituito dalla linea di connessione del riferimento di tensione a 0 V e dalle masse e dalla terra. Un campo elettromagnetico di disturbo può concatenarsi con tale circuito, inducendo un segnale elettrico che si ritroverà come modo comune tra i due riferimenti di tensione degli apparati che devono scambiarsi informazioni.

Dualmente, in presenza di una corrente di modo comune che circoli sull'impianto di terra, l'anello di cui sopra può divenire un'antenna trasmittente che emette segnali irradiati.

Questo tipo di accoppiamento, a causa della notevole area dell'anello, è in genere molto efficace, soprattutto alle frequenze meno elevate, ed è una delle cause più importanti sia di emissioni che di suscettibilità.

In conclusione, per quanto riguarda le emissioni, i rischi maggiori si hanno per gli apparati che presentano tensioni e correnti con elevate velocità di variazione nel tempo. I rischi crescono con il crescere dell'area dei circuiti interessati da questi segnali. In sede di progetto è necessario rallentare, per quanto consentito, i fronti d'onda, e rendere minima l'area dei circuiti più suscettibili e più emittenti, adottando la tecnologia più opportuna per la realizzazione delle schede e delle interconnessioni.

Per quanto riguarda l'immunità, i circuiti analogici sono in genere i più suscettibili.

La scelta della filosofia di *grounding* è fondamentale.

Tecniche di *filtraggio* (passabasso) consentono di ridurre i disturbi condotti che hanno frequenza al di fuori della banda passante del filtro.

Solo quando i provvedimenti di tipo progettuale si rivelano insufficienti, occorre ricorrere a tecniche di *schermatura*. L'uso degli schermi è in genere costoso, di difficile applicazione ed è efficace solo se accompagnato da adeguato filtraggio su tutti i reofori che entrano nello schermo (si ricordi, infatti, la stretta relazione tra segnali condotti e segnali irradiati).

Occorre affrontare il problema EMC all'atto dell'impostazione e del progetto di un nuovo apparato, quando si ha il maggior numero di gradi di libertà. I costi di interventi a posteriori possono diventare proibitivi. In Azienda occorre che le

tematiche EMC siano ben presenti non solo ai progettisti, ma anche a chi ingegnerizza e realizza il prodotto.