



Lezione 02

Definizioni e concetti di base

Giuseppe Pelosi - Stefano Selleri
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni
Università di Firenze



Sommario della Lezione

- ❖ Definizioni
- ❖ Cause di interferenza EM e percorsi di accoppiamento
- ❖ Unità di Misura
- ❖ Requisiti EMC



Definizioni

Un sistema elettrico o elettronico è detto **elettromagneticamente compatibile** se:

- Non causa interferenza con altri sistemi.
- Non è suscettibile alle emissioni di altri sistemi.
- Non causa interferenza con se stesso.

La **compatibilità elettromagnetica** (*Electromagnetic Compatibility* – EMC) è la situazione ideale in cui tutti i sistemi elettrici ed elettronici funzionano come da specifiche di progetto, sia isolati che nel loro ambiente operativo ed in presenza gli uni degli altri.

Si dice **interferenza elettromagnetica** (*Electromagnetic Interference* – EMI) la condizione per cui esistono tensioni o correnti spurie che influenzano negativamente le prestazioni di un sistema o di un dispositivo.

Il processo che porta a variazioni di progetto o ad aggiustamenti dei livelli di segnale o di rumore allo scopo di garantire il corretto funzionamento di un'apparecchiatura prende il nome di **controllo dell'interferenza elettromagnetica** (*Electromagnetic Interference Control* – EMIC).



Cause di interferenza elettromagnetica

Le cause che producono interferenza elettromagnetica possono essere:

- Localizzate nello stesso sistema (*intrasystem problem*).
- Prodotte da cause esterne (*intersystem problem*).

Il **sistema** dal punto di vista EMI è definito come il complesso di dispositivi su cui viene esercitato un controllo in fase di progetto o di gestione.

Si dice **emettitore** (*emitter*) una sorgente di energia elettromagnetica.

Si dice **suscettore** (*susceptor*) un dispositivo che è sensibile all'energia elettromagnetica.

Una causa molto comune di interferenza interna o esterna al sistema è dovuta ad un segnale che, pur generato appositamente per un determinato circuito, raggiunge anche uno o più circuiti a cui non era dedicato



Interferenza Intrasystem

EMETTITORE

- Sistema accensione motore a scoppio
- Generatori di potenza
- Lampade fluorescenti
- Calcolatori
- Trasmettitori radar
- Trasmettitori radio
- Alimentatori switching

SUSCETTORE

Display elettronici

Relay

Strumenti di navigazione

Calcolatori

Ricevitori radar

Ricevitori radio



Interferenza Intersystem

EMETTITORE

- Trasmettitori radio
- Trasmettitori radar
- Linee elettriche
- Fulmine
- Motori
- Lampade fluorescenti

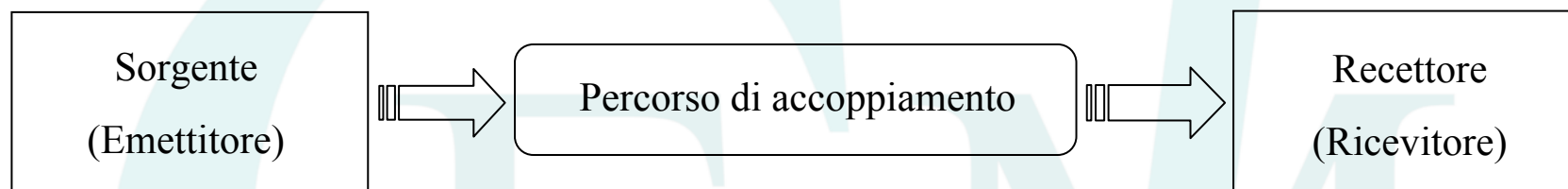
SUSCETTORE

- Ricevitori radio
- Ricevitori radar
- Calcolatori
- Pace maker
- Strumenti di navigazione
- Controllori di processi industriali



Cause di interferenza elettromagnetica

L'EMI sorge per la combinazione dei tre fattori riportati in figura, sorgente, percorso di accoppiamento e ricevitore, di cui almeno uno è imprevisto.



Per prevenire l'interferenza occorre quindi operare le seguenti azioni:

- Ridurre il più possibile l'emissione della sorgente.
- Rendere il percorso di trasmissione il più inefficiente possibile
- Rendere il ricevitore meno suscettibile alle emissioni



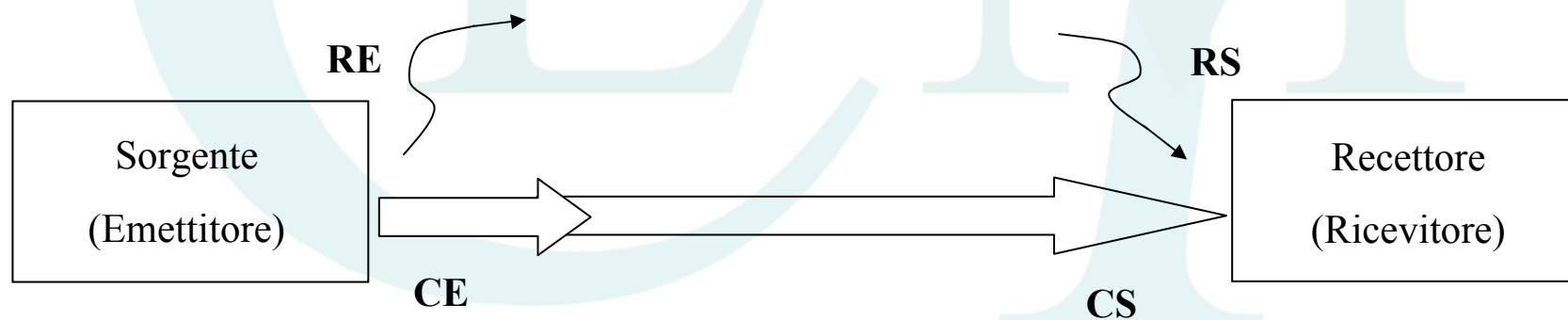
Percorsi di trasmissione (accoppiamento)

Distinguiamo due modalità di trasmissione di un disturbo:

- **Conduzione**: avviene attraverso parti metalliche e gli elementi a costanti concentrate (condensatori, trasformatori).
- **Irradiazione**: avviene attraverso la propagazione nello spazio libero. Quando i sistemi sono vicini occorre considerare le condizioni di campo vicino.

Le caratteristiche di un emettitore possono essere definite in termini di **Emissione condotta (CE)** ed **Emissione radiata (RE)**.

Le caratteristiche di un suscettore possono essere definite in termini di **Suscettibilità condotta (CS)** e **Suscettibilità radiata (RS)**.



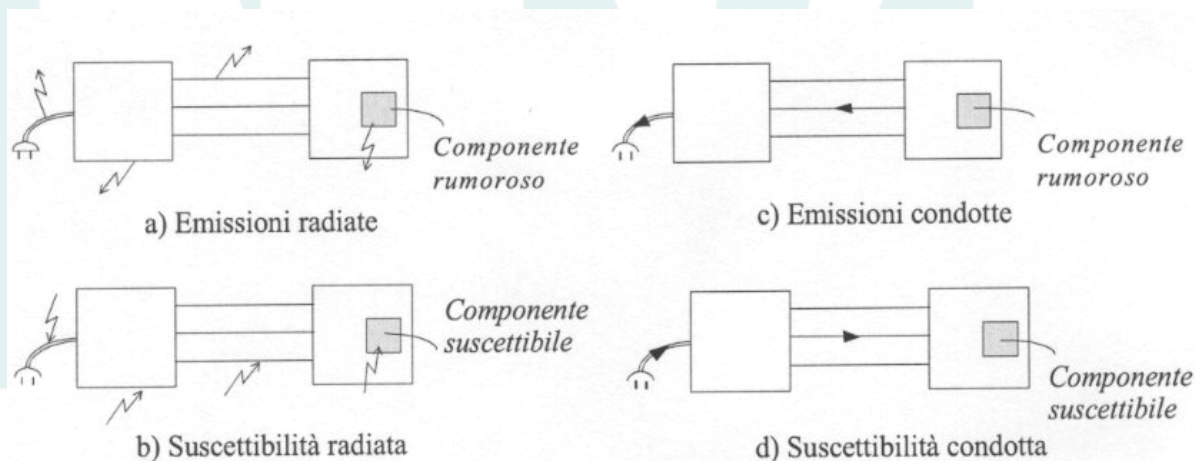


Cammini elettromagnetici

Per studiare un problema di compatibilità elettromagnetica è possibile classificare inizialmente il collegamento tra la sorgente e il dispositivo suscettibile come cammino condotto, radiato o una combinazione dei due.

E' possibile suddividere le interazioni elettromagnetiche che causano interferenza in quattro gruppi:

- Emissioni radiate
- Emissioni condotte
- Suscettibilità radiata
- Suscettibilità condotta





Unità di Misura

Misure di emissione e di suscettibilità condotta sono effettuate in termini di tensioni e correnti le cui unità di misura sono:

- Volt [V]
- Ampere [A]

Misure di emissione radiata e suscettibilità radiata vengono espresse in termini di campi elettrici e induzioni magnetiche:

- V/m, dBV/m, dB μ V/m
- Tesla (T), dBpT

[Il tesla è l'unità di flusso del vettore induzione magnetica, è la concatenazione di flusso che $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$]

Associate a queste vi sono potenza e densità di potenza::

- Watt [W]
- Watt al metro quadro [W/m^2]

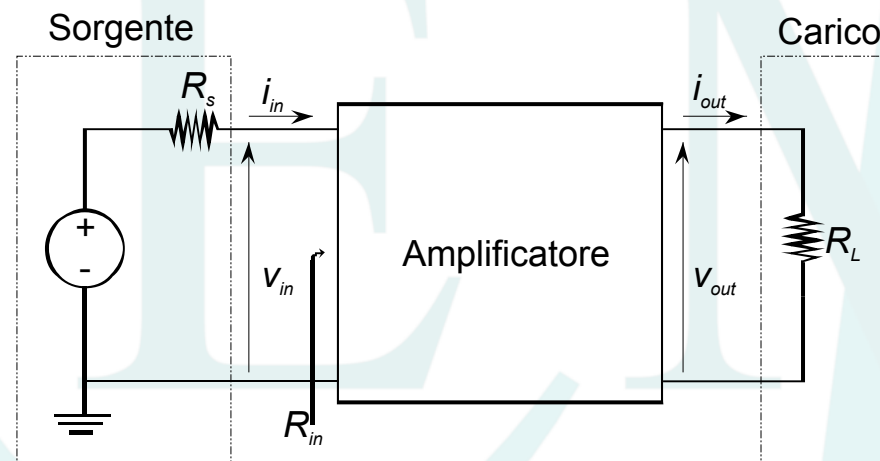


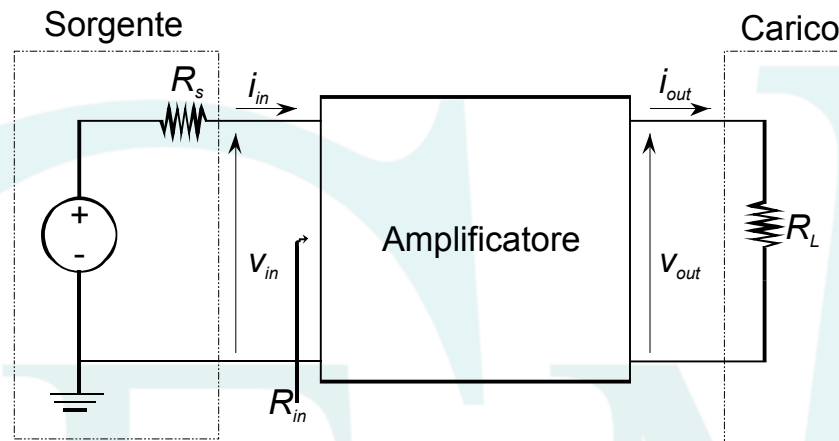
Unità di Misura

La *range* di variazione di queste quantità è notevole. Il campo elettrico, per esempio, può variare tra $1 \mu\text{V/m}$ e 200 V/m , con una dinamica pari a 10^8

Questa dinamica si presta male ad una rappresentazione lineare. Risulta preferibile una rappresentazione logaritmica che comprime la dinamica.

Supponiamo di avere il circuito in figura





$$P_{in} = v_{in} i_{in} = \frac{v_{in}^2}{R_{in}}$$

$$P_{out} = v_{out} i_{out} = \frac{v_{out}^2}{R_L}$$



$$\text{Guadagno di potenza} \equiv \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{v_{out}^2}{v_{in}^2} \frac{R_{in}}{R_L}$$



$$\text{Guadagno di potenza [dB]} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$



se $R_{in} = R_L$

$$\text{Guadagno di potenza [dB]} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{v_{out}^2}{v_{in}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{v_{out}}{v_{in}} \right) \equiv \text{Guadagno in tensione [dB]}$$



Unità di Misura

Le grandezze in dB sono sempre adimensionali e sono sempre il rapporto fra quantità omogenee.

$$\text{Potenza} \rightarrow \text{dB} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$\text{Tensione} \rightarrow \text{dB} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$$

$$\text{Corrente} \rightarrow \text{dB} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{i_2}{i_1} \right)$$

Valori assoluti di grandezze possono essere ottenuti solo definendo un livello di riferimento.

$$\text{Potenza} \rightarrow \text{dBW} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1W} \right); \quad \text{dBmW} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1mW} \right); \quad \text{dB}\mu\text{W} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1\mu W} \right)$$

$$\text{Tensione} \rightarrow \text{dBV} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{v}{1V} \right); \quad \text{dBmV} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{v}{1mV} \right); \quad \text{dB}\mu\text{V} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{v}{1\mu V} \right)$$

$$\text{Potenza} \rightarrow \text{dBA} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{i}{1A} \right); \quad \text{dBmA} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{i}{1mA} \right); \quad \text{dB}\mu\text{A} \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{i}{1\mu A} \right)$$



Unità di Misura

Esempi

$$1\text{V} \equiv 20\log_{10}\left(\frac{1\text{V}}{1\mu\text{V}}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{1\text{V}}{10^{-6}\text{V}}\right) = 20\log_{10}(10^6) = 120\text{dB}\mu\text{V}$$

$$15\text{mV} = 15000\mu\text{V}$$
$$83.52\text{dB}\mu\text{V}$$

$$630\text{mA} = 630000\mu\text{A}$$
$$115.99\text{dB}\mu\text{A}$$
$$55.99\text{dBmA}$$

$$250\text{mW} = 250000\mu\text{W}$$
$$53.98\text{dB}\mu\text{W}$$
$$23.98\text{dBm}$$

Per le quantità radiate...

$$\text{dBV/m} \equiv 20\log_{10}\left(\frac{E}{1\text{V/m}}\right); \quad [\text{dBmV/m}, \text{dB}\mu\text{V/m}]$$

$$\text{dBA/m} \equiv 20\log_{10}\left(\frac{H}{1\text{A/m}}\right); \quad [\text{dBmA/m}, \text{dB}\mu\text{A/m}]$$

$$\text{dBW/m}^2 \equiv 10\log_{10}\left(\frac{S}{1\text{W/m}^2}\right); \quad [\text{dBmW/m}^2, \text{dB}\mu\text{W/m}^2]$$

Il dBmW è
comunemente
denominato, per brevità,
semplicemente dBm



Unità di Misura

Il passaggio inverso....

$$\begin{aligned}\text{Volts} &= 10^{\frac{\text{dBV}}{20}} \quad 10^{\frac{\text{dBmV}}{20}} \times 10^{-3} \quad 10^{\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{20}} \times 10^{-6} \\ \text{Amperes} &= 10^{\frac{\text{dBA}}{20}} \quad 10^{\frac{\text{dBmA}}{20}} \times 10^{-3} \quad 10^{\frac{\text{dB}\mu\text{A}}{20}} \times 10^{-6} \\ \text{Watts} &= 10^{\frac{\text{dBW}}{10}} \quad 10^{\frac{\text{dBmW}}{10}} \times 10^{-3} \quad 10^{\frac{\text{dB}\mu\text{W}}{10}} \times 10^{-6}\end{aligned}$$

Il passaggio da lineare a dB non solo riduce la dinamica ma permette di manipolare le quantità facilmente tramite le proprietà dei logaritmi:

$$\log_m(AB) = \log_m(A) + \log_m(B)$$

$$\log_m(A^k) = k \log_m(A)$$

$$\log_m\left(\frac{A}{B}\right) = \log_m(A) - \log_m(B)$$



Unità di Misura

Memorizzando pochi valore chiave è possibile convertire da lineare a dB e viceversa.

$$25 \rightarrow 20\log_{10}(25) \left\{ \begin{array}{l} = 20\log_{10}(5^2) = 2 \times (20\log_{10}(5)) \\ = 2 \times 14 \\ = 28\text{dB} \\ \approx 20\log_{10}(24) = 20\log_{10}(3 \times 2 \times 2 \times 2) \\ = 10 + 6 + 6 + 6 \\ = 28\text{dB} \end{array} \right.$$

Rapporto	V o I [dB]	P [dB]
10^6	120	60
10^5	100	50
10^4	80	40
10^3	60	30
10^2	40	20
10	20	10
9	19.08	9.54
8	18.06	9.03
7	16.9	8.45
6	15.56	7.78
5	13.98	6.99
4	12.04	6.02
3	9.54	4.77
2	6.02	3.01
1	0	0
10^{-1}	-20	-10
10^{-2}	-40	-20
10^{-3}	-60	-30



Requisiti EMC

Per la verifica dell'EMC e il controllo dell'EMI un dispositivo deve soddisfare una serie di requisiti. Questi possono essere divisi in due classi:

- Requisiti emanati dal governo o dalle sue agenzie.
- Requisiti emanati dal costruttore.

I primi hanno ovviamente carattere **legale** e non possono essere aggirati, essi sono pensati per limitare l'EMI generata dai prodotti delle aziende. Il soddisfacimento di questi requisiti **NON** garantisce che l'apparato funzionerà

Il soddisfacimento di tali requisiti permette al Paese di controllare il livello di “**inquinamento elettromagnetico**” sul proprio territorio. Un apparato che soddisfi tali requisiti può essere commercializzato in uno stato.

Un apparecchio perfettamente funzionante che non può essere commercializzato è inutile!

D'altro canto i requisiti che un produttore impone a se stesso sono rivolti alla soddisfazione del cliente.

Essi sono mirati ad ottenere un'alta affidabilità del prodotto .



Requisiti EMC emanati dal Governo

Ogni governo di ogni paese emana le proprie direttive in merito alla EMC/EMI.

Con l'attuale mercato globale è essenziale che un apparato sia conforme a tutte i requisiti emanati da tutti i paesi.

Fortunatamente:

- I paesi che effettivamente emanano proprie direttive sono pochi (USA, UE, Giappone)
- Gli altri paesi si adeguano ai paesi summenzionati

In particolare si ha:

- **USA:** Federal Communications Commission (FCC)
- **Europa:** EMC directive 89/336/EEC e successiva 2004/108/EC. Queste recepiscono le direttive *Comité international spécial des perturbations radioélectriques* (CISPR)
- **Giappone:** recepisce principalmente le norme dell'International Organization for Standardization (ISO)



La FCC stabilisce, nel Titolo 47 del *Code of Federal Regulations* diverse regole per i dispositivi elettronici. La parte del Titolo 47 che maggiormente ci interessa è la 15, che si applica ai dispositivi a radiofrequenza.

- La FCC definisce *radiofrequenza* la banda 9kHz – 3000GHz.
- Un *dispositivo a radiofrequenza* è un qualunque oggetto capace di emettere energia a radiofrequenza, sia per radiazione, conduzione o altro, sia intenzionalmente che non intenzionalmente.

La parte 15 è dedicata a trasmettitori non intenzionali ed intenzionali privi di licenza. Le stazioni trasmettenti vere e proprie, con licenza governativa, sono coperte da un'altra parte.

In questa accezione rientrano nella parte 15 i motori elettrici (per le scintille delle spazzole), i calcolatori i cui clock sono compresi nella banda della radiofrequenza.

In particolare la FCC definisce *apparato digitale*

un radiatore non intenzionale che genera ed utilizza impulsi di clock a frequenza superiore a 9kHz



È bene notare come sia *illegale* commercializzare negli USA un dispositivo che non soddisfi i requisiti FCC.

La classe di dispositivi digitali è ulteriormente divisa in due classi:

Classe A: dispositivi digitali commercializzati per utilizzi commerciali e industriali.

Classe B: dispositivi digitali commercializzati per utilizzi privati o domestici

La classe B è più restrittiva della classe A per la ragionevole supposizione che i dispositivi commerciali/industriali siano sotto un più attento controllo durante l'utilizzo ed in mano a persone competenti laddove i dispositivi per uso domestico sono utilizzati da persone non esperte.

Inoltre i computer e accessori appartengono a una sottocategoria della classe B ove, oltre a rientrare nelle specifiche, è richiesta un'esplicita *certificazione* da parte dell'FCC.



Limiti per emissioni condotte

Le emissioni condotte sono quelle correnti che passano attraverso il cavo di alimentazione e si distribuiscono nella rete elettrica che assume un comportamento da “antenna” e può causare interferenze con altri dispositivi.

Il range di frequenze per le emissioni condotte si estende da 150kHz a 30MHz.

L'emissione condotta si misura tramite uno strumento (LISN) che viene inserito nel cavo di alimentazione del dispositivo in esame. I limiti di emissione condotta sono misurati in Volt, sebbene siano fisicamente delle correnti, poiché il LISN restituisce una tensione.

I limiti sono posti sia sulla tensione di quasi picco (QP), che su quella media (AV).

TABLE 2.2 FCC and CISPR 22 Conducted Emission Limits for Class A Digital Devices

Frequency (MHz)	$\mu\text{V QP (AV)}$	$\text{dB}\mu\text{V QP (AV)}$
0.15–0.5	8912.5 (1995)	79 (66)
0.5–30	4467 (1000)	73 (60)

TABLE 2.1 FCC and CISPR 22 Conducted Emission Limits for Class B Digital Devices

Frequency (MHz)	$\mu\text{V QP (AV)}$	$\text{dB}\mu\text{V QP (AV)}$
0.15	1995 (631)	66 (56)
0.5	631 (199.5)	56 (46)
0.5–5	631 (199.5)	56 (46)
5–30	1000 (316)	60 (50)



Limiti per emissioni condotte

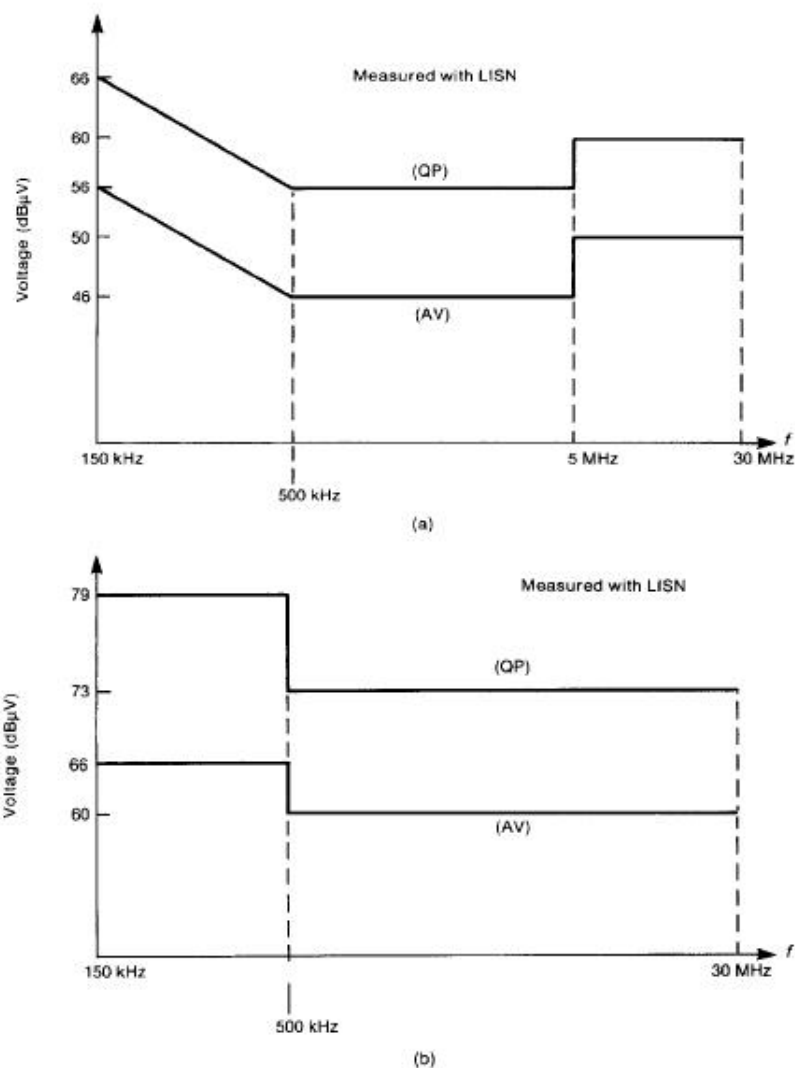


FIGURE 2.1 The FCC and CISPR 22 conducted emission limits: (a) Class B; (b) Class A.

Confronto tra i limiti per le emissioni condotte per dispositivi in classe A e B. Si nota come siano più stringenti i limiti per la classe B



Limiti per emissioni radiate

Il range di frequenze per le emissioni radiate si estende da 30MHz a 40GHz.

Il limite superiore di frequenza alla quale effettuare misure dipende dalla più alta frequenza in uso nel dispositivo ed è determinato attraverso la seguente tabella:

TABLE 2.3 Upper Limit of Measurement Frequency

Highest Frequency Generated or Used in the Device or on Which the Device Operates or Tunes (MHz)	Upper Frequency of Measurement Range (MHz)
<1.705	30
1.705–108	1000
108–500	2000
500–1000	5000
>1000	5th harmonic of highest frequency or 40 GHz, whichever is lower

Ad esempio, nel caso di un personal computer che lavora alla frequenza di clock di 3GHz, occorre misurare le emissioni fino a 15GHz (quinta armonica).



Limiti per emissioni radiate

L'emissione radiata si misura in una camera semianecoica o in campo aperto. Le misure vengono eseguite con l'antenna sia in polarizzazione verticale che orizzontale rispetto al terreno ed il dispositivo in esame deve rispettare i limiti in entrambi i casi.

Le misure vengono eseguite ad una distanza di 3m per dispositivi di classe B e di 10m per dispositivi di classe A.

TABLE 2.4 FCC Emission Limits for Class B Digital Devices

Frequency (MHz)	Measured at 3 m	
	$\mu\text{V}/\text{m}$	$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
30–88	100	40
88–216	150	43.5
216–960	200	46
>960	500	54
>1 GHz	500 (AV)	54 (AV)
	5000 (PK)	74 (PK)

TABLE 2.5 FCC Emission Limits for Class A Digital Devices

Frequency (MHz)	Measured at 10 m	
	$\mu\text{V}/\text{m}$	$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$
30–88	90	39
88–216	150	43.5
216–960	210	46.4
>960	300	49.5
>1 GHz	300 (AV)	49.5 (AV)
	3000 (PK)	69.5 (PK)

Per confrontare i livelli di emissione di dispositivi appartenenti a classi diverse, occorre scalare le misure per le differenti distanze alle quali sono eseguite. Un metodo abbastanza comune è il metodo dell'*inverso della distanza*. Secondo questo modello i campi decadono linearmente all'aumentare della distanza, quindi a 10m si sono ridotti di 3/10 rispetto a quelli rilevati a 3m e viceversa. Per traslare il limite per la classe A da una distanza da 10m a 3m, occorre sommare al limite $20\log(10/3) = 10\text{dB}$. Questo criterio è valido se i campi misurati sono campi lontani, cioè la distanza dal dispositivo è maggiore di tre lunghezze d'onda.



Limiti per emissioni radiate

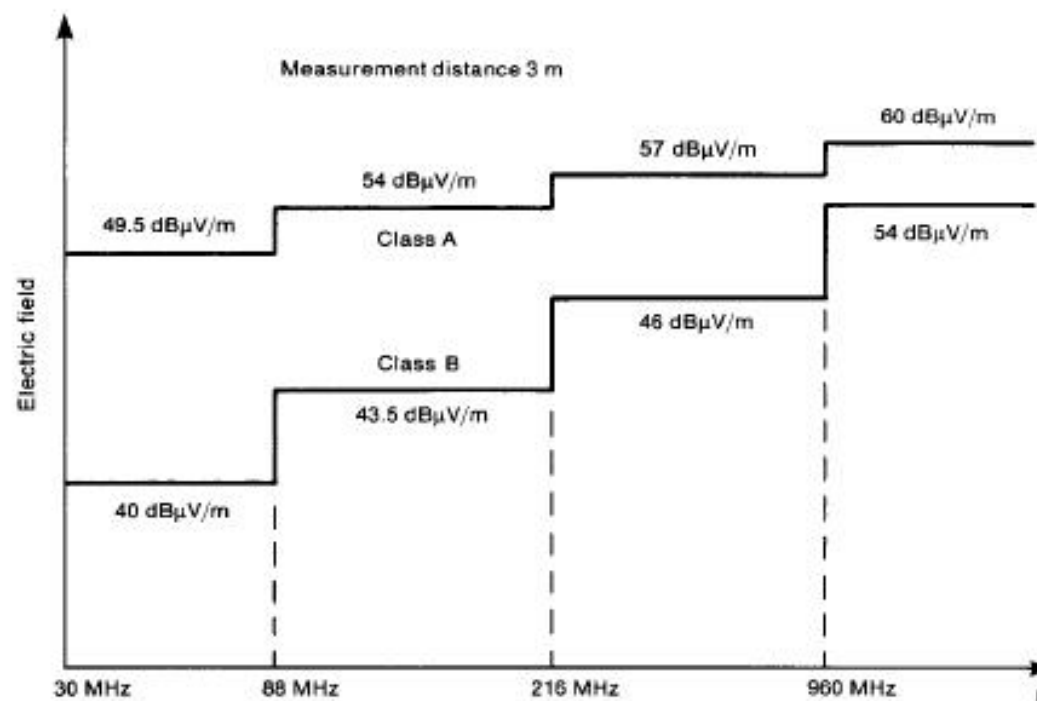


FIGURE 2.3 A comparison of the FCC Class A and FCC Class B radiated emission limits for a measurement distance of 3 m.

Confronto tra i limiti per le emissioni radiate per dispositivi in classe A e B entrambi riportati a 3m di distanza dal dispositivo. Si nota come siano più stringenti i limiti per la classe B



Lo standard CISPR 22 (EN 55022) pone limiti sulle emissioni radiate e condotte di sistemi digitali, analogamente alla FCC. Gli apparati sono divisi in sistemi di classe A e B con lo stesso significato visto fin'ora.

I limiti per le emissioni condotte sono analoghi a quelli FCC.

Le emissioni radiate devono essere misurate per entrambe le classi a 10m di distanza dal dispositivo. I limiti sono riportati in tabella.

TABLE 2.6 CISPR 22 Radiated Emission Limits for Class B ITE Equipment (10 m)

Frequency (MHz)	$\mu\text{V/m}$	$\text{dB}\mu\text{V/m}$
30–230	31.6	30
230–1000	70.8	37

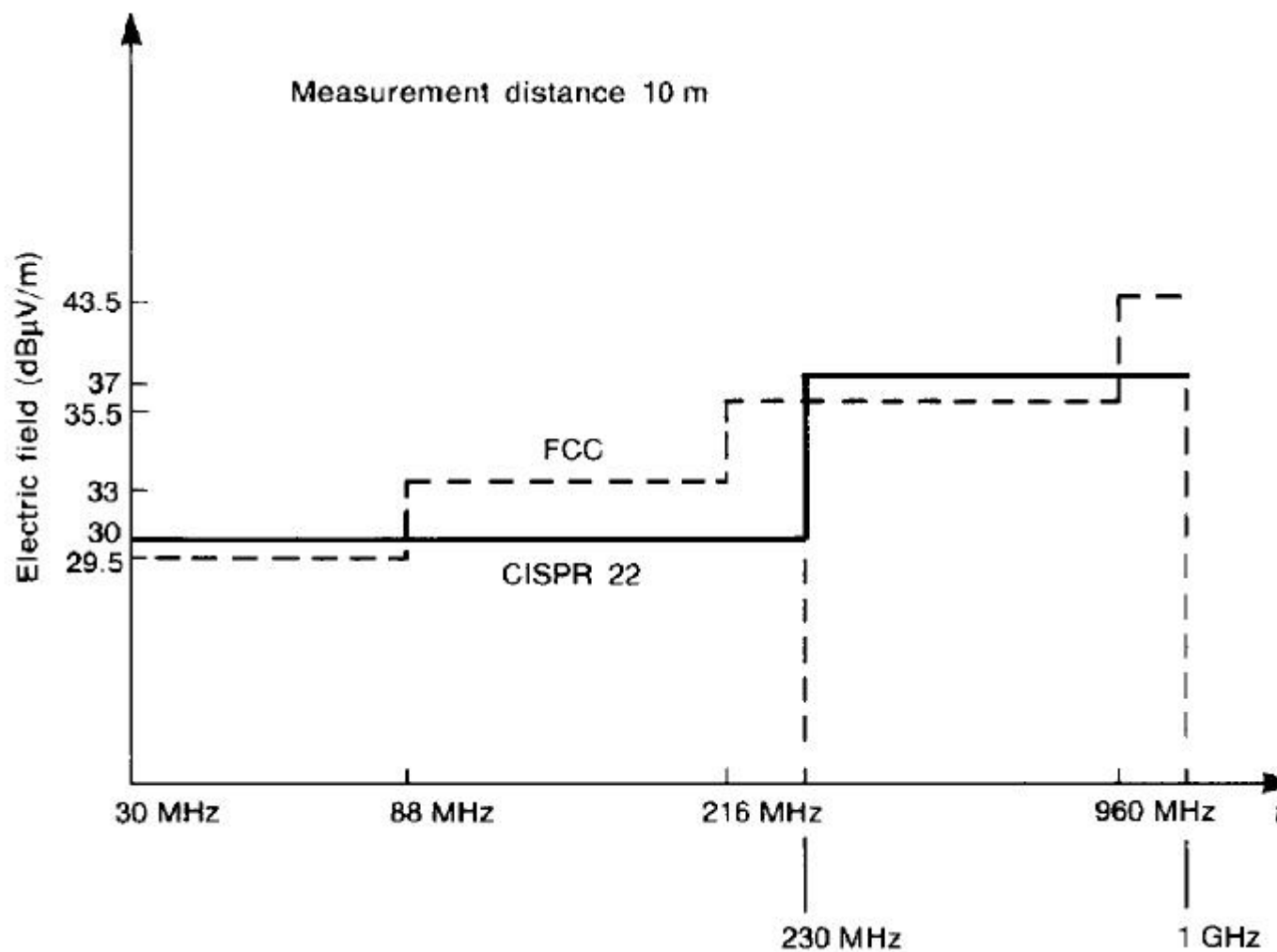
Lo standard CISPR 22 non prevede misure di emissione radiata oltre 1GHz.

TABLE 2.7 CISPR 22 Radiated Emission Limits for Class A ITE Equipment (10 m)

Frequency (MHz)	$\mu\text{V/m}$	$\text{dB}\mu\text{V/m}$
30–230	100	40
230–1000	224	47



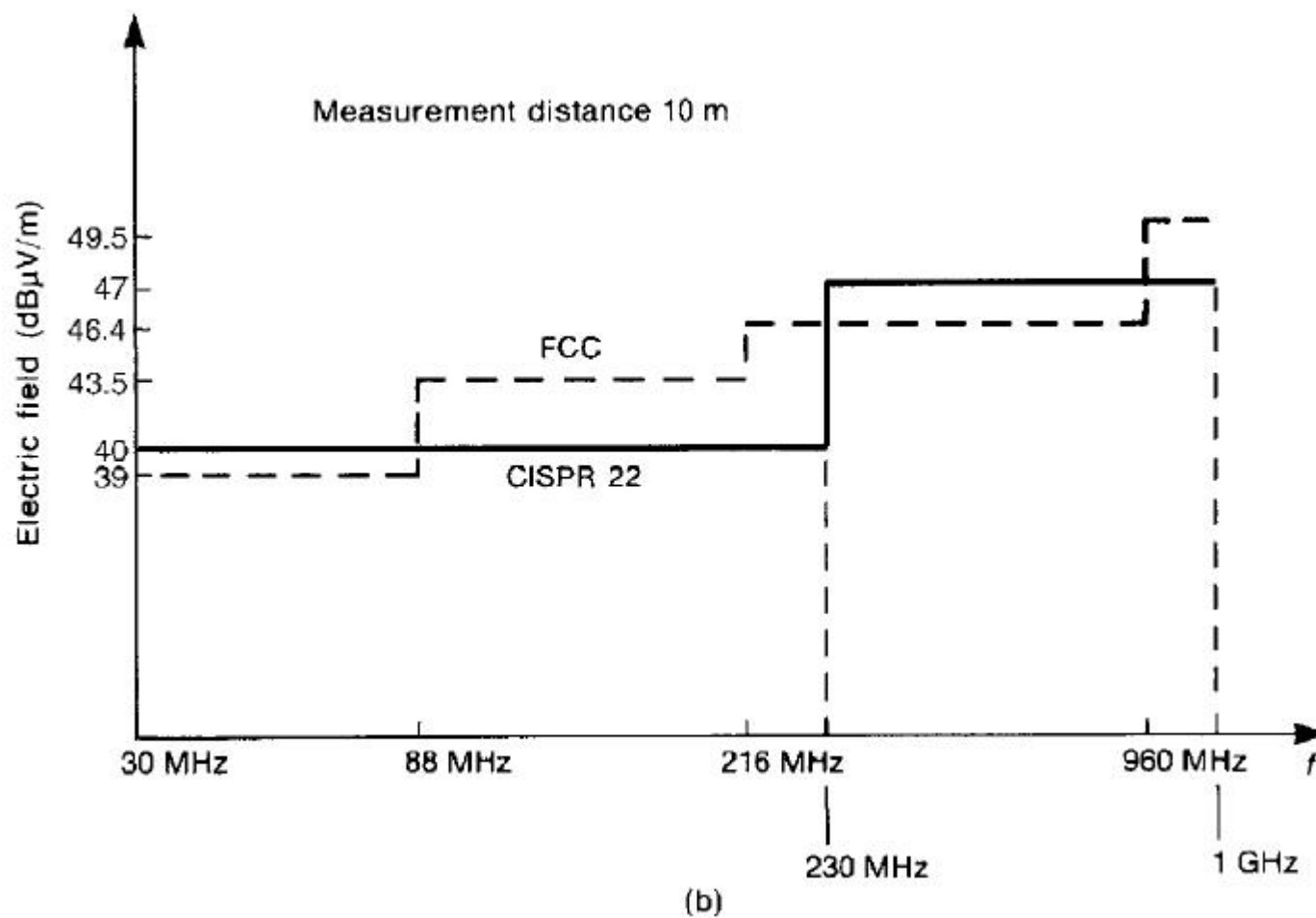
CISPR vs FCC



Confronto FCC, CISPR per le emissioni radiate, misurate a 10m, classe B



CISPR vs FCC



Confronto FCC, CISPR per le emissioni radiate, misurate a 10m, classe A



Suscettività

Uno degli aspetti più significativi per lo standard europeo è la misura della suscettività del prodotto alle emissioni condotte e radiate da altre sorgenti. Questo richiede che il prodotto sia testato con l'esposizione alle emissioni elettromagnetiche di sorgenti che simulano l'ambiente elettromagnetico e che le sue prestazioni non degradino.

La normativa è dello standard EN 61000-4 e copre varie situazioni, come la scarica elettrostatica (ESD), campi elettromagnetici radiati da una sorgente esterna, transitorio elettrico, impulso, brevi interruzioni in correnti alternate.



MIL-STD-461E

Nei dispositivi per applicazioni militari le specifiche sui limiti di emissione sono più stringenti di quelle per il settore commerciale perché:

- Le interferenze possono influenzare la riuscita delle missioni
- E' necessario controllare l'immunità dei dispositivi elettronici del sistema da altre sorgenti come ad esempio i radar in alta potenza.

La normativa per sistemi militari prodotti negli USA è contenuta nello standard MIL-STD-461E.

A differenza dei dispositivi commerciali, la normativa militare prevede che in certi casi i dispositivi possano non rispettare le specifiche di compatibilità o che le specifiche stesse si possano adattare al particolare caso.



MIL-STD-461E

TABLE 2.8 Emission and Susceptibility Requirements of MIL-STD-461E

Requirement	Description
CE101	Conducted emissions, power leads, 30 Hz–10 kHz
CE102	Conducted emissions, power leads, 10 kHz–10 MHz
CE106	Conducted emissions, antenna terminal, 10 kHz–40 GHz
CS101	Conducted susceptibility, power leads, 30 Hz–150 kHz
CS103	Conducted susceptibility, antenna port, intermodulation, 15 kHz–10 GHz
CS104	Conducted susceptibility, antenna port, rejection of undesired signals, 30 Hz–20 GHz
CS105	Conducted susceptibility, antenna port, cross-modulation, 30 Hz–20 GHz
CS109	Conducted susceptibility, structure current, 60 Hz–100 kHz
CS114	Conducted susceptibility, bulk cable injection, 10 kHz–200 MHz
CS115	Conducted susceptibility, bulk cable injection, impulse excitation
CS116	Conducted susceptibility, damped sinusoidal transients, cables and power leads, 10 kHz–100 MHz
RE101	Radiated emissions, magnetic field, 30 Hz–100 kHz
RE102	Radiated emissions, electric field, 10 kHz–18 GHz
RE103	Radiated emissions, antenna spurious and harmonic outputs, 10 kHz–40 GHz
RS101	Radiated susceptibility, magnetic field, 30 Hz–100 kHz
RS103	Radiated susceptibility, electric field, 2 MHz–40 GHz
RS105	Radiated susceptibility, transient electromagnetic field

Descrizione dei requisiti di emissione e suscettività per lo standard militare.

TABLE 2.9 Requirement Matrix of MIL-STD-461E^a

Equipment and Subsystems Installed in, on, or Launched from the Following Platforms or Installations	Requirement Applicability																
	CE101	CE102	CE106	CS101	CS103	CS104	CS105	CS109	CS114	CS115	CS116	RE101	RE102	RE103	RS101	RS103	RS105
Surface ships		A	L	A	S	S	S		A	L	A	A	A	L	A	A	L
Submarines	A	A	L	A	S	S	S	L	A	L	A	A	A	L	A	A	L
Aircraft, army, including flight line	A	A	L	A	S	S	S		A	A	A	A	A	L	A	A	L
Aircraft, navy	L	A	L	A	S	S	S		A	A	A	L	A	L	L	A	L
Aircraft, air force		A	L	A	S	S	S		A	A	A		A	L		A	
Space systems, including launch vehicles		A	L	A	S	S	S		A	A	A		A	L		A	
Ground, army		A	L	A	S	S	S		A	A	A		A	L	L	A	
Ground, navy		A	L	A	S	S	S		A	A	A		A	L	A	A	L
Ground, air force		A	L	A	S	S	S		A	A	A		A	L		A	

^aLegend: A—applicable; L—limited as specified in the individual sections of this standard; S—procuring activity must specify in procurement documentation.

Si applicano a tutti i dispositivi i limiti:

- CE102 per le emissioni condotte
- CS101, CS114, CS116 per la suscettività condotta
- RE102 per le emissioni radiate
- RS103 per la suscettività radiata

TABLE 2.10 RS103 Limits^a

Frequency Range	Platform	Limit Level (V/m) ^a							
		Aircraft (External or Safety-Critical)	Aircraft Internal	All Ships (above Decks) and Submarines (External) ^b	Ships (Metallic) (below Decks)	Ships (Nonmetallic) (below Decks)	Submarines (Internal)	Ground	Space
2–30 MHz	A	200	200	200	10	50	5	50	20
	N	200	200	200	10	50	5	10	20
	AF	200	20	—	—	—	—	10	20
30 MHz–1 GHz	A	200	200	200	10	10	10	50	20
	N	200	200	200	10	10	10	10	20
	AF	200	20	—	—	—	—	10	20
1–18 GHz	A	200	200	200	10	10	10	50	20
	N	200	200	200	10	10	10	50	20
	AF	200	60	—	—	—	—	50	20
18–40 GHz	A	200	200	200	10	10	10	50	20
	N	200	60	200	10	10	10	50	20
	AF	200	60	—	—	—	—	50	20

^aKey: A = Army; N = Navy; AF = Air Force.

^bFor equipment located external to the pressure hull of a submarine but within the superstructure, use “Ships (Metallic) (below Decks).”

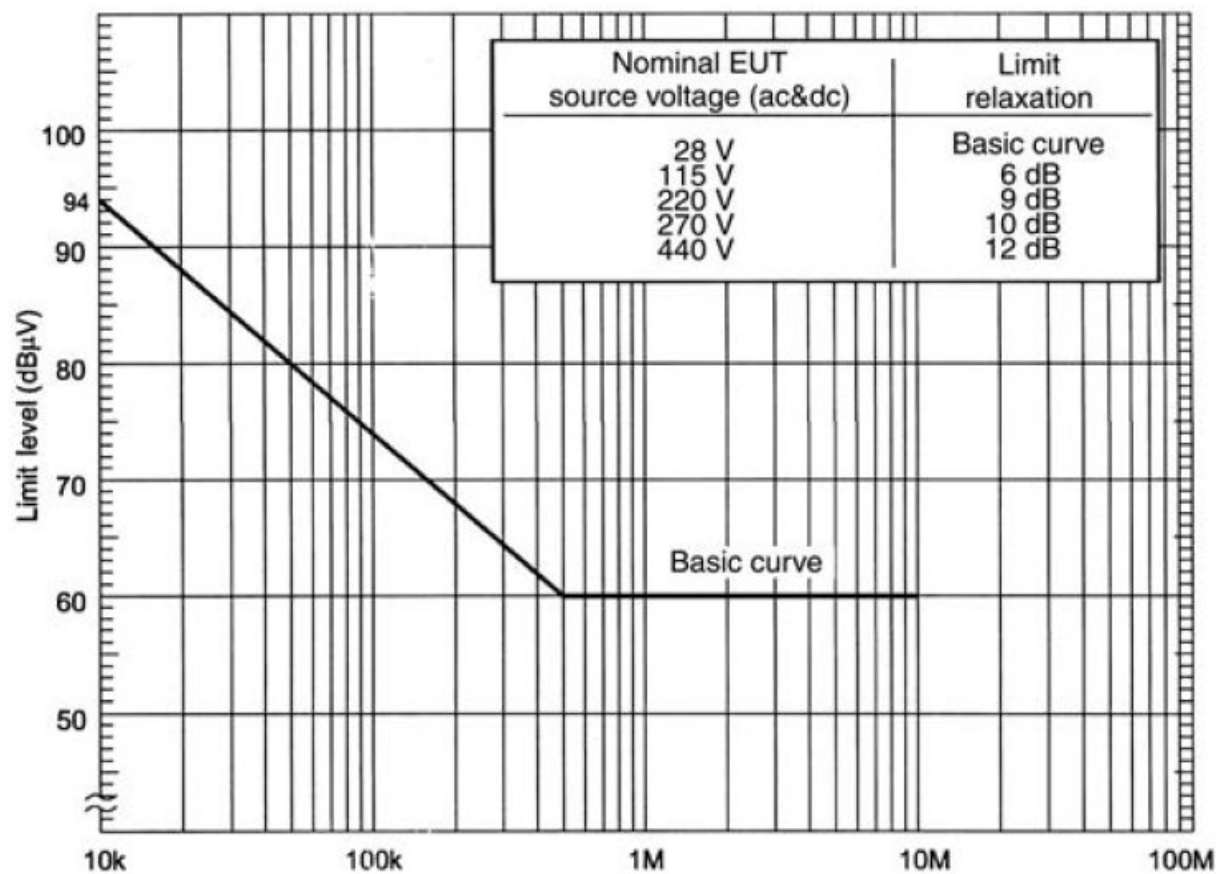


FIGURE 2.5 MIL-STD-461E CE102 limit (EUT power leads, ac and dc) for all applications [5].



RE102

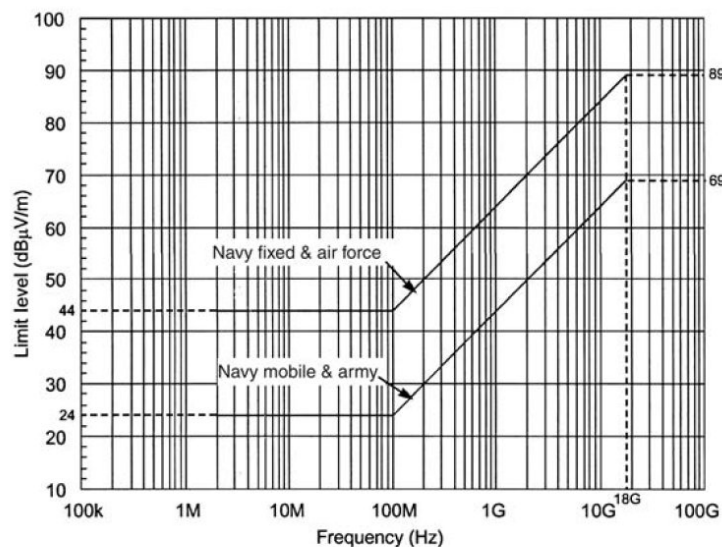
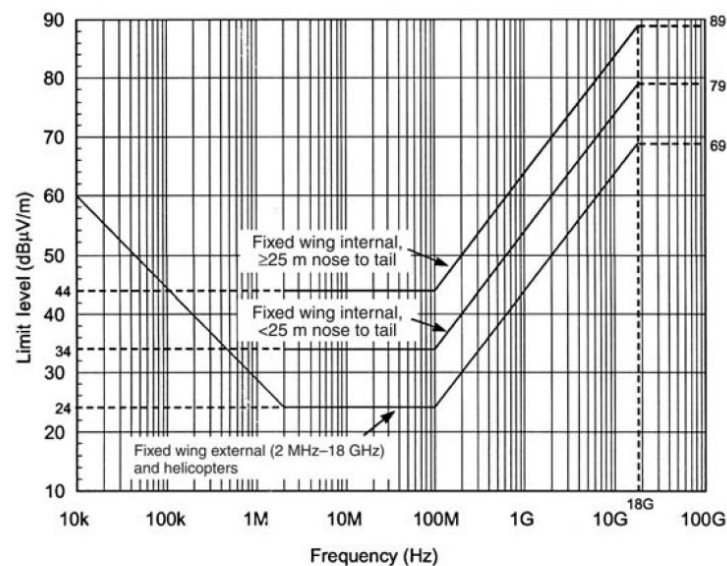


FIGURE 2.6 (a) MIL-STD-461E RE102 limit for aircraft and space system applications; (b) MIL-STD-461E RE102 limit for ground applications [5].

In figura i limiti RE102 per il campo radiato. Da notare che i limiti sono misurati ad 1m dalla sorgente e sono diversificati per:

- Aerei ed Applicazioni Spaziali
- Applicazioni terrestri



Misura delle emissioni per la verifica di conformità

Una volta definite le specifiche è necessario determinare come misurare le emissioni di un dispositivo in modo che queste misure siano univoche.

Questo implica la determinazione:

- Delle procedure di test
- Della strumentazione
- Della larghezza di banda
- Delle antenne di misura

Si garantisce in questo modo che le emissioni misurate in siti diversi siano le stesse e che se il dispositivo è conforme alle specifiche in un determinato sito, lo è anche in qualsiasi altro.

- Le procedure di misura per la FCC sono contenute nello standard ANSI C63.4-2003.
- Le procedure per il CISPR22 e il MIL-STD-461E sono contenute nello standard stesso.



Emissioni radiate: camera semianecoica

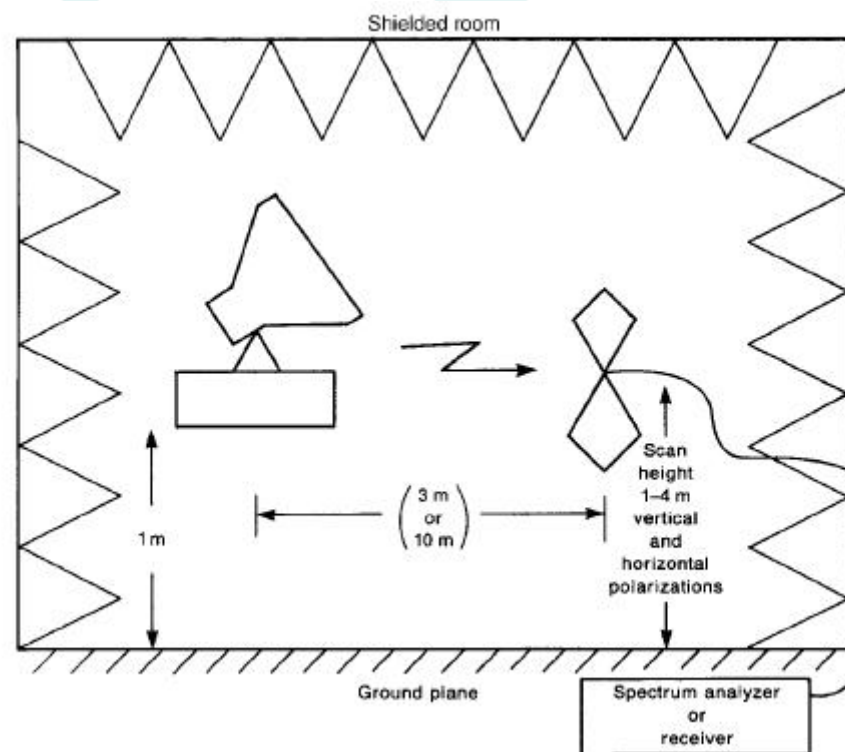
Le emissioni radiate possono essere misurate:

- In campo aperto (OATS - Open Area Test Site)
- In camera semianecoica (SAC – Semi Anechoic Chambre)

Una **camera semianecoica** è una stanza schermata che ha le pareti rivestite di materiale in grado di assorbire radiazioni a radiofrequenza. Il pavimento è un piano di massa non assorbente che introduce quindi riflessioni (multipath) .

La camera semianecoica deve avere due requisiti:

- Protezione contro emissioni elettromagnetiche esterne che possono contaminare le misure. Questa protezione è garantita dalla schermatura.
- Protezione contro le riflessioni dovute alle pareti in modo da simulare lo spazio libero. Questa protezione è garantita dal materiale radio-assorbente.





Misura emissioni radiate (FCC, CISPR22)

Il ricevitore usa un rivelatore di picco (standard militare) oppure un rivelatore di quasi picco (FCC, CISPR22).

Il prodotto deve essere posizionato 1m sopra il terreno.

La distanza di misura deve essere:

- 3m per lo standard FCC per dispositivi in classe B.
- 10m per lo standard FCC e dispositivi in classe A e per lo standard CISPR22.

Le antenne per le misurazioni possono essere (CISPR22, FCC):

- Dipolo a mezz'onda risonante. La difficoltà nell'utilizzo di questa antenna risiede nel fatto che è a banda stretta, quindi deve essere continuamente accordata al variare della frequenza alla quale si effettuano le misure.
- Antenne a banda larga

Antenna biconica (30-200MHz)

Antenna log-periodica (200MHz-1GHz)

Devono essere effettuate misure con l'antenna posizionata ad una altezza dal terreno che varia da 1 a 4m e deve essere registrato il valore massimo rilevato.

Le misure devono essere effettuate sia in polarizzazione orizzontale che verticale e non devono superare in nessun caso i limiti imposti dallo standard.



Misura emissioni radiate (MIL – STD – 461E)

Le antenne per lo standard militare sono:

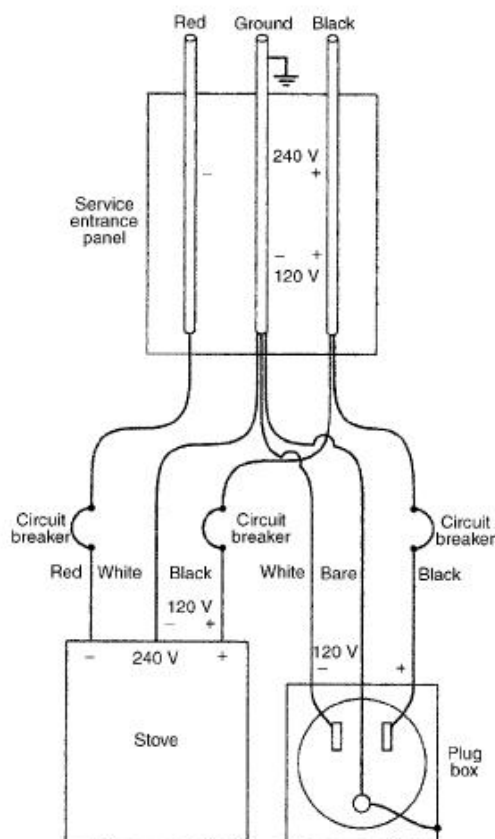
- Antenna a dipolo di 104cm (10kHz – 30MHz)
- Antenna biconica (30MHz – 200MHz)
- Double ridge horn (> 200MHz)



Emissioni condotte

Le emissioni condotte sono quelle correnti che passano attraverso il cavo di alimentazione e si distribuiscono nella rete elettrica che assume un comportamento da “antenna” e può causare interferenze con altri dispositivi.

Un esempio è il rumore generato dalle spazzole di un motore elettrico in un elettrodomestico, che si distribuisce nella rete di alimentazione dove irradia e può causare interferenza con altri apparecchi, quali il televisore, dove tipicamente compaiono delle strisce orizzontali.



Le linee di distribuzione della tensione sono costituite da tre fili: due conduttori di tensione (filo rosso e filo nero) ed un conduttore di massa collegato alla massa fisica della terra (bianco). La tensione tra i due conduttori è 240V e 60Hz negli USA e 400V e 50Hz in Italia, mentre la tensione tra ciascun conduttore e massa è 120V (USA) o 230V (Italia).

Nelle abitazioni tipicamente si ha un sistema monofase, cioè il gestore mette a disposizione un solo conduttore di tensione (fase, colore nero) e il filo di massa (neutro, colore bianco), ed un terzo filo di sicurezza (terra, colore giallo-verde) è disposto assieme agli altri due.

Le emissioni condotte devono essere misurate nei fili di fase e di neutro.



Emissioni condotte

Le emissioni condotte sono quelle correnti che passano attraverso il cavo di alimentazione e si distribuiscono nella rete elettrica che assume un comportamento da “antenna” e può causare interferenze con altri dispositivi.

Un esempio è il rumore generato dalle spazzole di un motore elettrico in un elettrodomestico, che si distribuisce nella rete di alimentazione dove irradia e può causare interferenza con altri apparecchi, quali il televisore, dove tipicamente compaiono delle strisce orizzontali.

Lo strumento di misura per le emissioni condotte è il **LISN** (Line Impedance Stabilization Network) che deve soddisfare ai due seguenti requisiti:

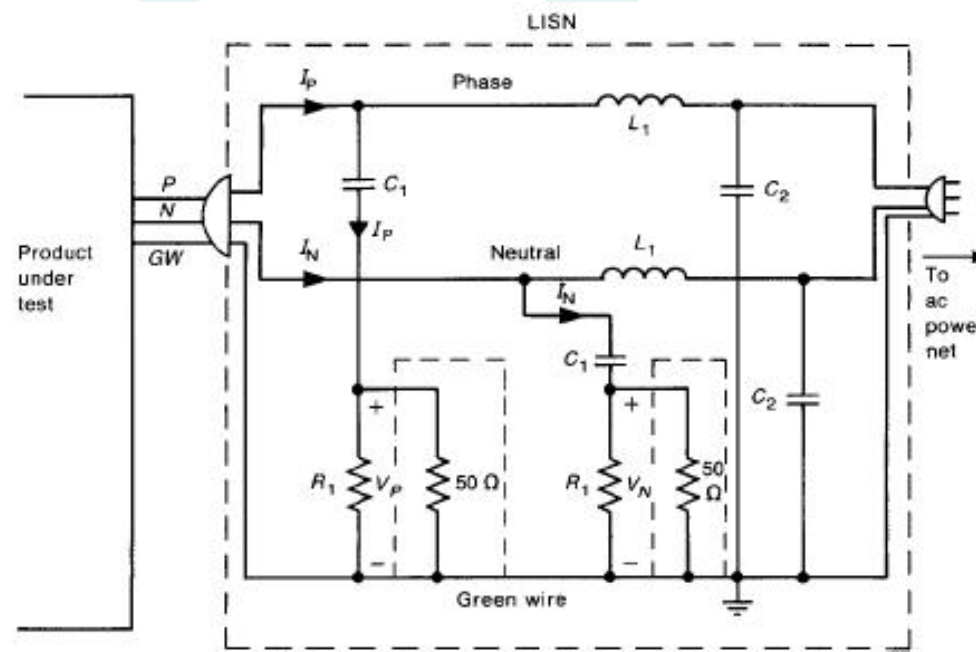
- Protezione contro il rumore esterno presente nella rete di alimentazione per non degradare le misure
- Impedenza costante in frequenza e al variare del sito di misura tra fase e massa e tra neutro e massa



LISN

La protezione dai disturbi esterni è garantita dalla presenza di L_1 e C_2 , l'induttore blocca il rumore mentre il condensatore lo cortocircuita a massa. Il valore dell'induttanza è di $50\mu\text{H}$, cui corrisponde un'impedenza nel range di frequenze in cui si effettuano le misure ($150\text{kHz} - 30\text{MHz}$) pari a $47 - 9425\Omega$. Il valore della capacità è invece di $1\mu\text{F}$ cui corrisponde un'impedenza pari a $1.06 - 0.005\Omega$. Questo filtro LC tuttavia è progettato per far passare inalterata la componente a frequenza di alimentazione. A 60Hz infatti l'impedenza di L_1 è pari a 0.019Ω e quella di C_2 2653Ω .

La uniformità di impedenza di ingresso è garantita dalla presenza di C_1 ($0.1\mu\text{F}$) e R_1 ($1\text{k}\Omega$). C_1 blocca le componenti continue della corrente, mentre presenta un'impedenza bassa per le componenti a frequenza tra 150kHz e 30MHz . La resistenza di 50Ω rappresenta l'impedenza di ingresso dell'analizzatore di spettro, molto più piccola di R_1 . L_1 e C_2 disaccoppiano il prodotto sotto test (EUT: Equipement Under Test) dalla rete di alimentazione a radio – frequenza.





In conclusione l'impedenza di ingresso è reale e pari a 50Ω nell'intervallo di frequenze di misura, indipendentemente da cosa ci sia nella rete di alimentazione a valle del LISN.

L'analizzatore di spettro (o altro ricevitore) misura la tensione ai capi della resistenza di 50Ω . Questa tensione deve soddisfare le specifiche dello standard ed è legata alla corrente di rumore dalla relazione seguente:

$$I_P = \frac{V_P}{50} ; \quad I_N = \frac{V_N}{50} \quad V_P : \text{tensione di fase}, \quad V_N : \text{tensione di neutro}$$

Ciascuna tensione deve essere misurata nell'intervallo di frequenze stabilito dalla normativa e non deve superare i limiti imposti dalla stessa.