



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA
Dipartimento di Ingegneria Industriale
Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica

Applicazioni di Ingegneria Elettrica (mod. Compatibilità Elettromagnetica Industriale)

A.A. 2007/2008

Ing. Antonio Faba

OBIETTIVI:

- Conoscere e comprendere le interazioni tra i campi elettromagnetici e i sistemi elettrici ed elettronici.
- Conoscere le principali tecniche di analisi e verifica.
- Conoscere le principali soluzioni progettuali.
- Conoscere i principali riferimenti normativi.

Compatibilità Elettromagnetica Industriale

CONTENUTI:

Unità didattica: Introduzione e definizioni.

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità. Unità di misura.

Unità didattica: Fenomeni elettromagnetici condotti.

Linee di trasmissione, impedenza caratteristica, coefficiente di riflessione e condizione di adattamento, perdita di potenza nei cavi. Determinazione sperimentale dell'impedenza caratteristica di un cavo. Comportamento reale di bipoli passivi. Armoniche di corrente e fluttuazioni di tensione. Emissioni condotte a radiofrequenza, reti LISN. Correnti di modo comune e di modo differenziale. Analizzatori di spettro, rilevatore di picco, quasi picco e valor medio. Suscettibilità condotta a radiofrequenza, reti CDN. Impulsi di sovratensione SURGE. Treni di impulsi BURST. Buchi di tensione e brevi interruzioni. Filtri per la riduzione dei fenomeni di emissione e suscettibilità condotta.

Unità didattica: Fenomeni elettromagnetici radiati.

Onda elettromagnetiche piane ed uniformi, impedenza caratteristica del mezzo di propagazione, costante di propagazione, coefficiente di riflessione, densità di potenza. Antenne: guadagno, diagramma d'irradiazione e fattore d'antenna, antenne comunemente utilizzate per le verifiche di compatibilità elettromagnetica. Emissioni radiate a radiofrequenza: camere schermate e semianecoiche. Suscettibilità radiata a radiofrequenza, suscettibilità radiata a frequenza industriale (50 Hz) e misuratori di campo a banda larga. Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici. Compatibilità elettromagnetica ambientale.

Compatibilità Elettromagnetica Industriale

CONTENUTI:

Unità didattica: Scariche elettrostatiche

Origine ed effetti delle scariche elettrostatiche. Simulazione in laboratorio delle scariche elettrostatiche. Soluzioni per la riduzione della suscettibilità delle apparecchiature alle scariche elettrostatiche.

Unità didattica: Normative di riferimento ed esercitazioni in laboratorio.

Principali comitati nazionali ed internazionali per le normative sulla compatibilità elettromagnetica. Norme generiche per la verifica della compatibilità elettromagnetica di apparecchiature utilizzate in ambienti domestici, commerciali, industriali.

Esempi applicativi e verifiche del livello di emissione e di immunità su dispositivi di prova in laboratorio.

TESTI CONSIGLIATI:

C. R. PAUL, Compatibilità Elettromagnetica, HOEPLI, 1995.

PREREQUISITI:

Fisica generale II, Elettrotecnica I, Elettrotecnica II.

MODALITÀ DI VERIFICA DEL PROFITTO:

La verifica consiste in una prova scritta della durata di 120 minuti su vari argomenti trattati nel corso.

Unità didattica:

Introduzione e definizioni.

Introduzione

- **Primi del 1900:** aumento dell'elettrificazione, nascita dei primi fenomeni di interferenza elettromagnetica.
- **1930:** l'**IEC** (International Electrotechnical Commission) istituisce il **CISPR** (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques).

Successivamente

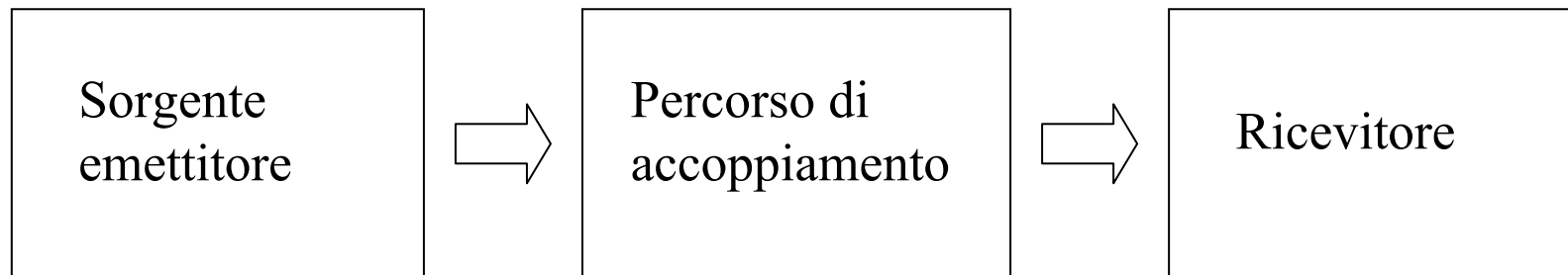
- Istituzione dell'**FCC** (Federal Communications Commission) negli Stati Uniti.
- Istituzione del **CENELEC** (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) in europa.
- Istituzione del **CEI** (Comitato Elettrotecnico Italiano).

Introduzione

- **1989:** Emissione della **Direttiva Europea 89/336/CEE**, “Per la Certificazione CE di un’apparecchiatura elettrica o elettronica devono essere soddisfatti i requisiti della compatibilità elettromagnetica”.
- **Decreto legge N. 476 del 4 Dicembre 1992:** l’Italia recepisce la Direttiva Europea 89/336/CEE e fissa per il **1996** l’inizio dell’obbligo per il rispetto dei requisiti della Compatibilità Elettromagnetica per tutte le apparecchiature elettriche ed elettroniche commercializzate all’interno del territorio nazionale.

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

Dal punto di vista della compatibilità elettromagnetica un sistema può essere diviso in tre parti:



Si possono verificare accoppiamenti elettromagnetici che causano comportamenti indesiderati: interferenza.

- sorgente: intenzionale o involontaria;
- ricevitore: intenzionale o involontario;
- **interferenza**: quando l'energia entrante nel ricevitore causa un malfunzionamento dello stesso.

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

Il trasferimento non intenzionale di energia non sempre è dannosa, ma dipende dal comportamento del ricevitore.

Si deve verificare che:

- l'energia del segnale di disturbo sia sufficientemente elevata (superiore al livello suscettibilità)
- il contenuto spettrale del segnale di disturbo sia sufficientemente ampio.

Prevenzione dei fenomeni di interferenza:

- Soppressione dell'emissione dalla **sorgente**.
- Rendere meno efficiente il fenomeno dell'**accoppiamento elettromagnetico**.
- Rendere il **ricevitore** meno suscettibile all'interferenza.

Vincoli progettuali ed economici.

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

Fenomeni legati al trasferimento dell'energia elettromagnetica

- **Emissione:** livello e caratteristiche dell'energia elettromagnetica emessa dal trasmettitore.
- **Suscettività (immunità):** grado di suscettibilità del ricevitore rispetto ad un determinato livello di energia elettromagnetica ricevuta.

Modalità di accoppiamento

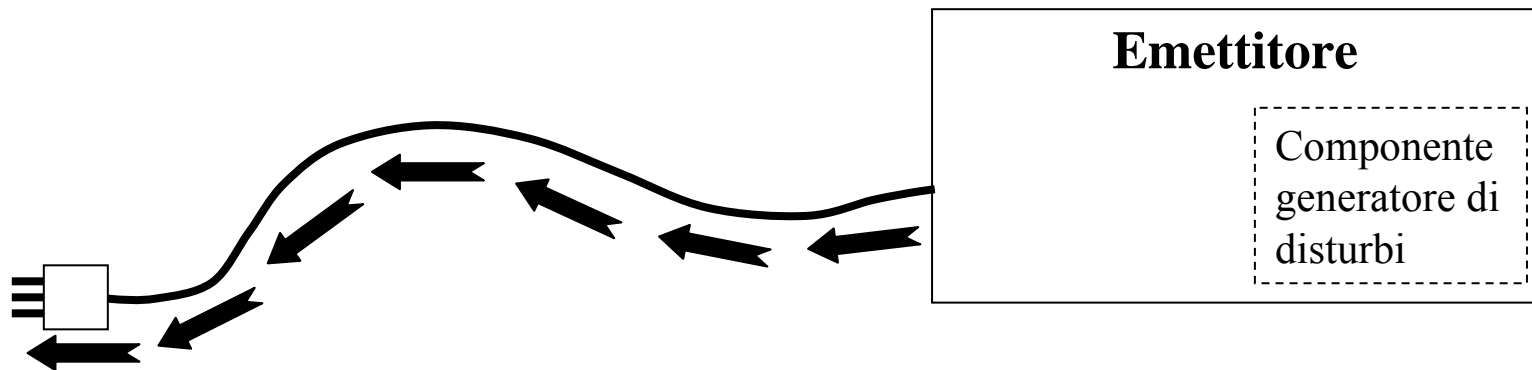
- **Irradiazione:** propagazione di onde elettromagnetiche nell'aria.
- **Conduzione:** propagazione di segnali in tensione e corrente nei conduttori metallici

4 possibili fenomeni risultanti:

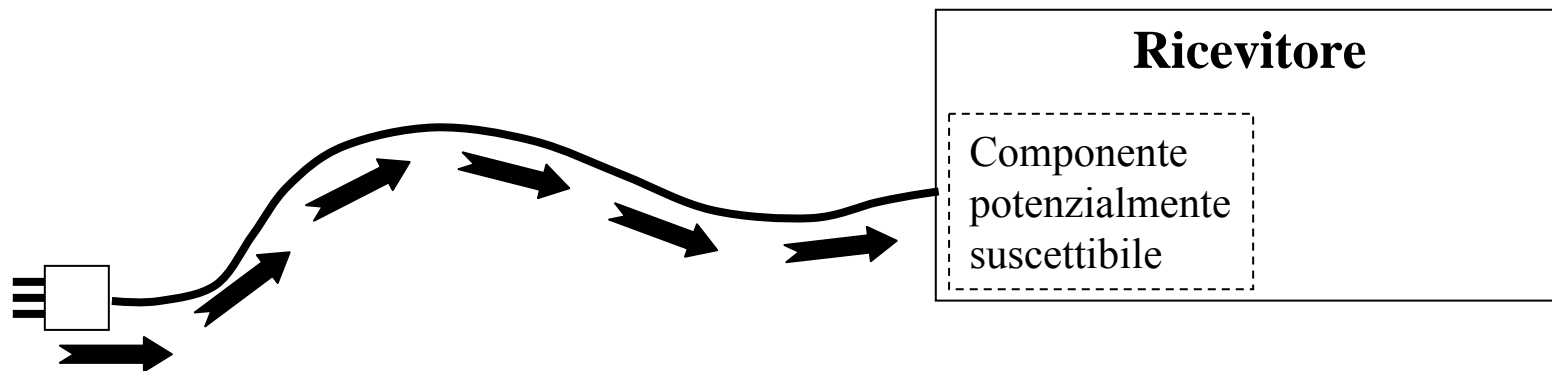
- **emissioni radiate**
- **suscettività radiate**
- **emissioni condotte**
- **suscettività condotte**

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

Emissioni condotte

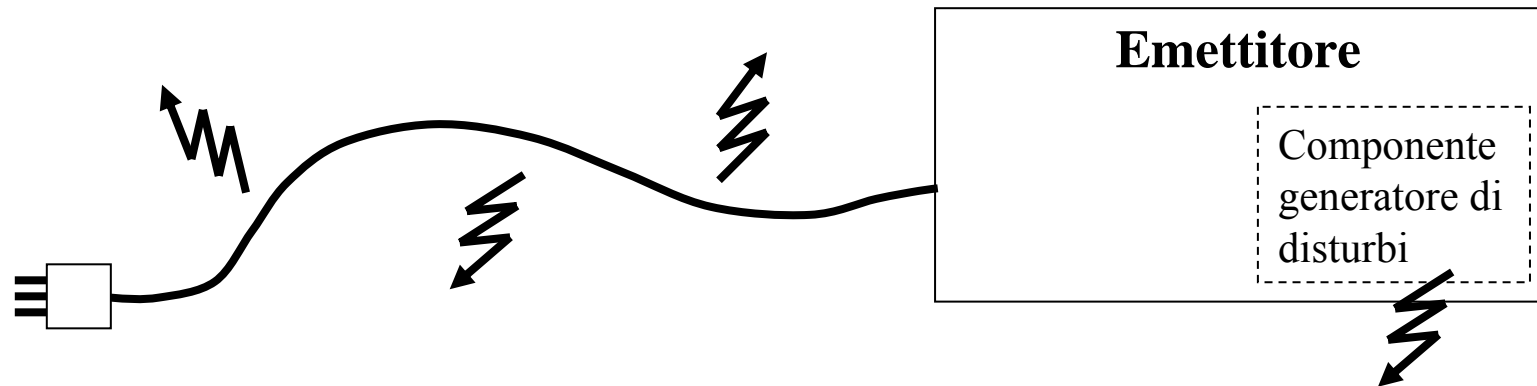


Suscettività condotte

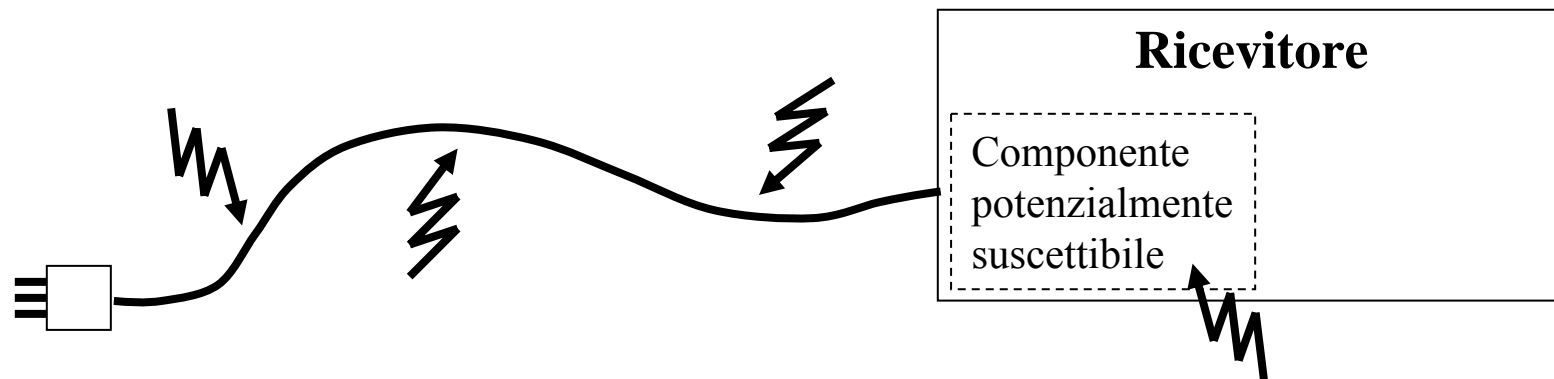


Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

Emissioni radiate

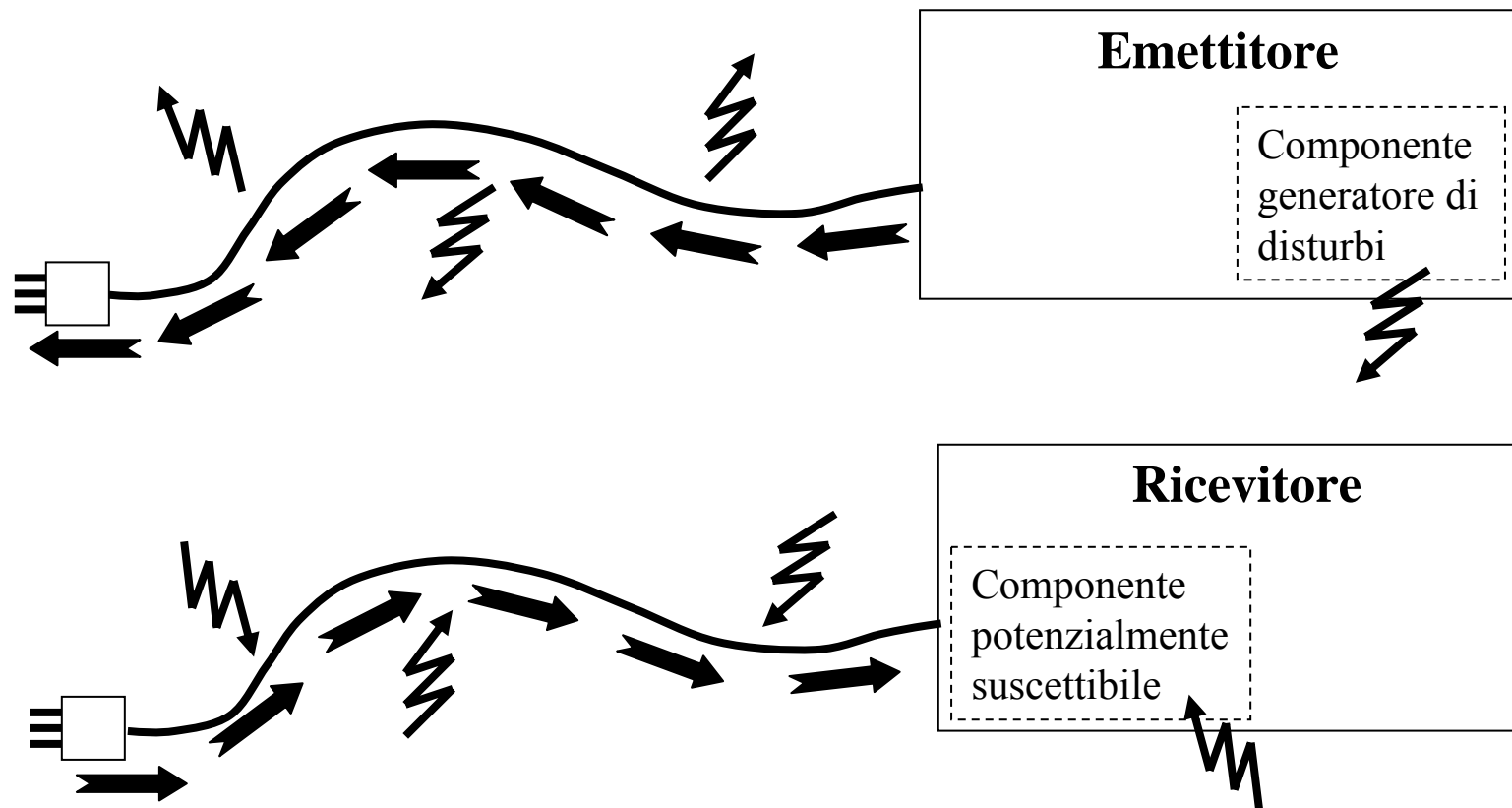


Suscettività radiata



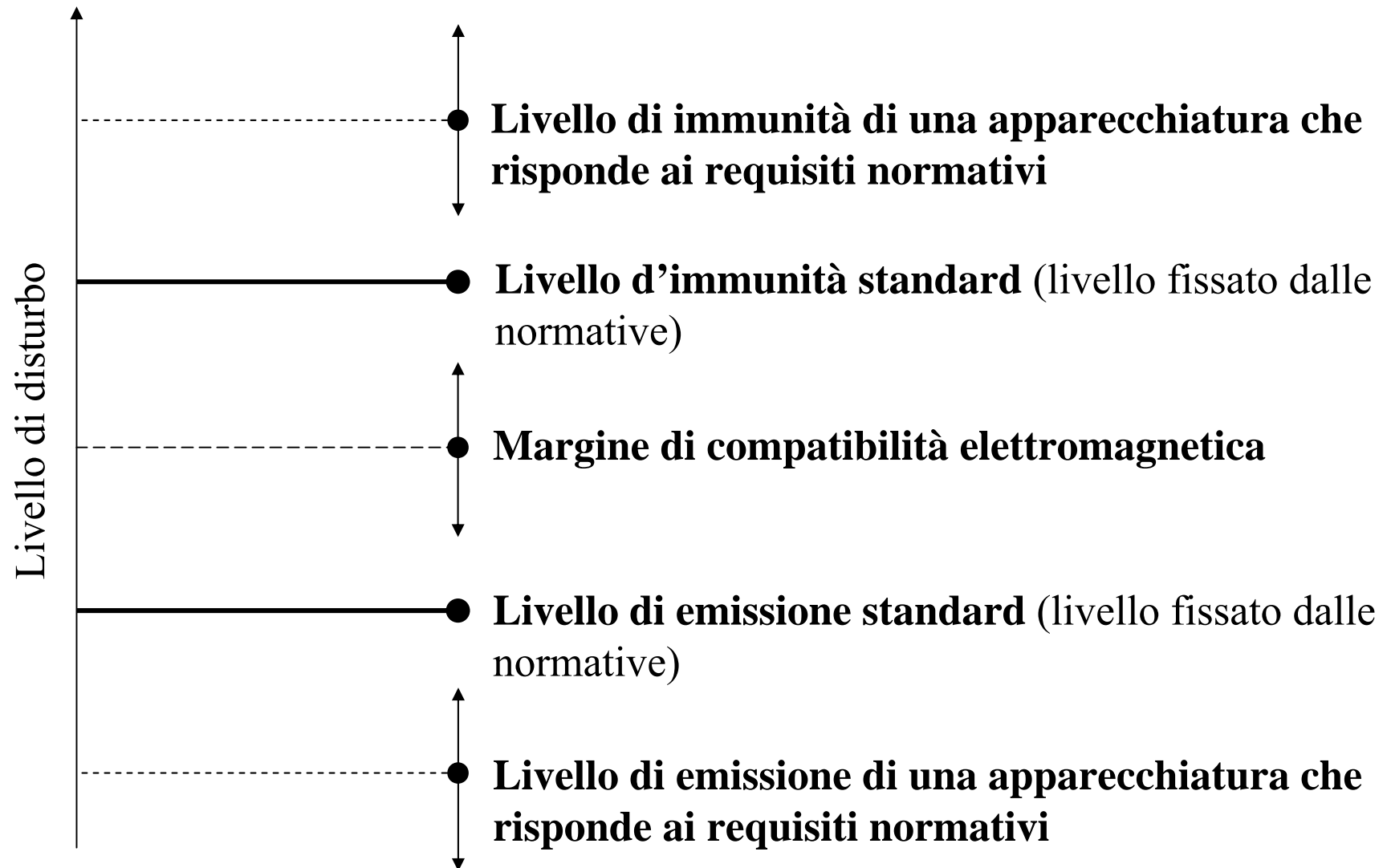
Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

Fenomeni correlati



Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

Coordinamento tra livelli di emissione, compatibilità, immunità, suscettibilità

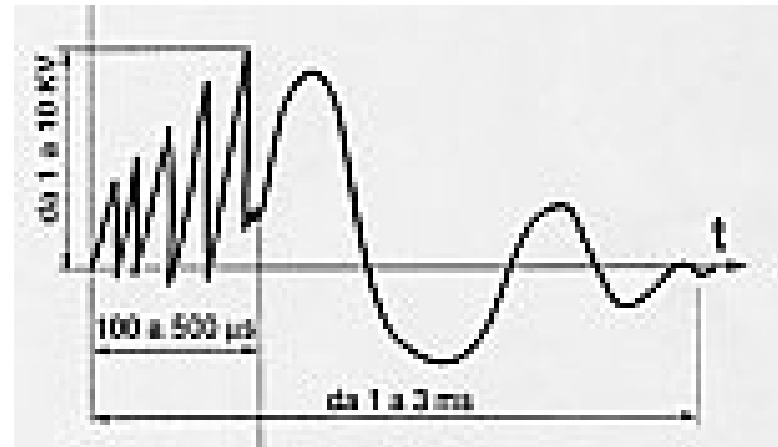
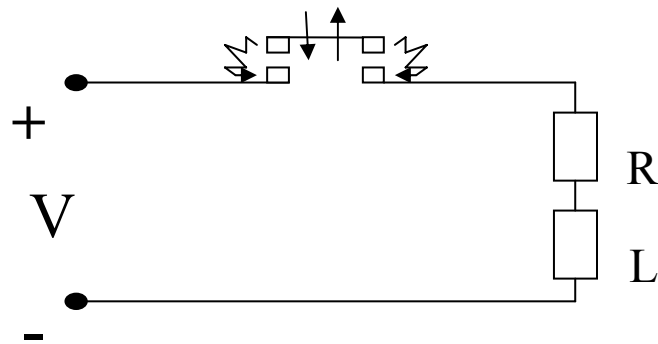


Alcuni esempi di problematiche di compatibilità elettromagnetica

- **Malfunzionamento sistema radio** causato dal sistema di rilevazione antimissile: 1982 isole Falkland cacciatorpediniere inglese abbattuto.
- **Innesco missile** provocato dal sistema radar su portaerei, 1967 Vietnam, 134 perdite.
- **Bloccaggio dei freni** di autotreni, elettrotreni e tram in vicinanza di convertitori di frequenza variabile.
- **Bande di disturbo su schermi video** quando è in funzione un motore in corrente continua:
 - commutazioni spazzole-rotore
 - disturbi condotti: alla TV attraverso la rete di alimentazione
 - disturbi irradiati: alla TV attraverso l'antenna

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

- **Commutazione di carichi induttivi** con contatti a secco (apparecchiature che aprono-chiudono circuiti mediante contatti separabili: contattori, interruttori, ecc.)



Comportamento dipende dal carico:

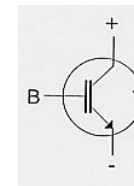
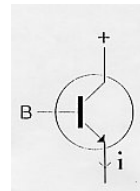
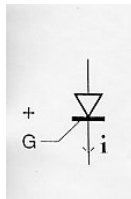
Sulla parte resistiva non si generano sovratensioni di disturbo

Sulla parte induttiva si generano:

- sovratensioni fino a 10 kV
- oscillazioni smorzate della tensione a frequenze superiori di quella di funzionamento per alcuni ms.

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

- **Reset di apparecchiature elettroniche** (orologi, microprocessori, ecc.) in vicinanza di trasmettitori radio, radar.
- **I convertitori AC/DC, AC/AC** generano:
 - brusche discontinuità imposte alla corrente
 - disturbi a banda larga (da pochi kHz a qualche centinaio di MHz)
 - disturbi condotti attraverso la rete d'alimentazione, interpretati erroneamente come segnali di sincronismo o controllo.



	Tiristore	Transistore	IGBT
Massima tensione inversa	1.6 kV	1.2 kV	1.2 kV
Massima corrente di conduzione	1.5 kA	0.5 kA	0.4 kA
Massima frequenza di commutazione	3 kHz	5 kHz	20 kHz

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

- **Motori elettrici**

- A corrente continua

- commutazioni spazzole-collettore, discontinuità della corrente negli avvolgimenti, sovratensioni ($V=LdI/dt$).

- es: disturbi condotti ad apparati TV

- Asincroni

- saturazione magnetica (non linearità), corrente assorbita non sinusoidale: generazione di armoniche;

- durante l'avviamento forte richiamo di corrente: buchi di tensione sulla rete di alimentazione

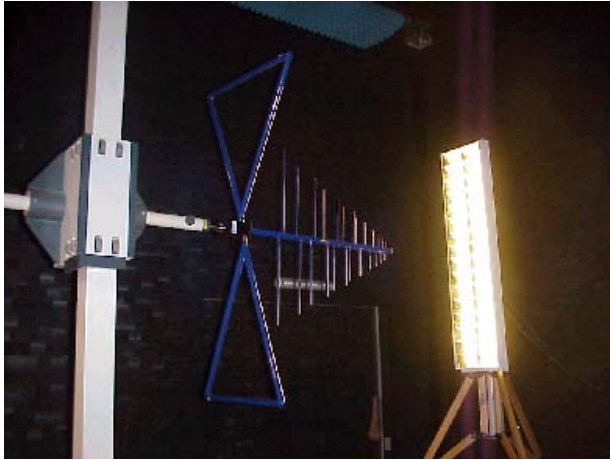
- es: disturbi in ambito industriale

- **Lampade fluorescenti**

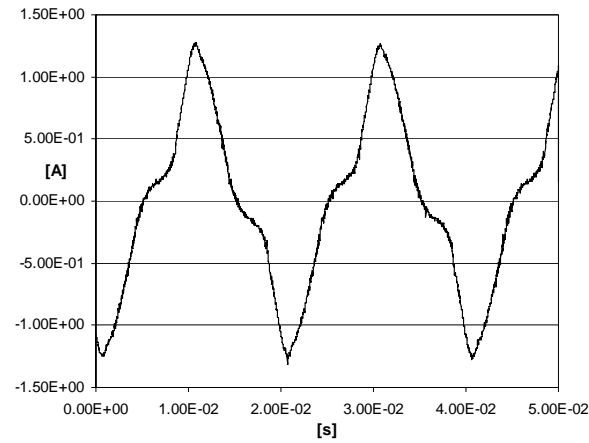
- correnti assorbite non sinusoidali (produzione di armoniche di corrente);

- arco elettrico (produzione di disturbi radiati e condotti fino a qualche decina di MHz);

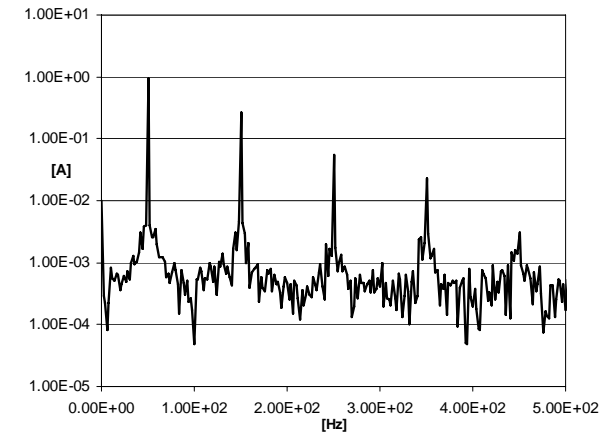
Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.



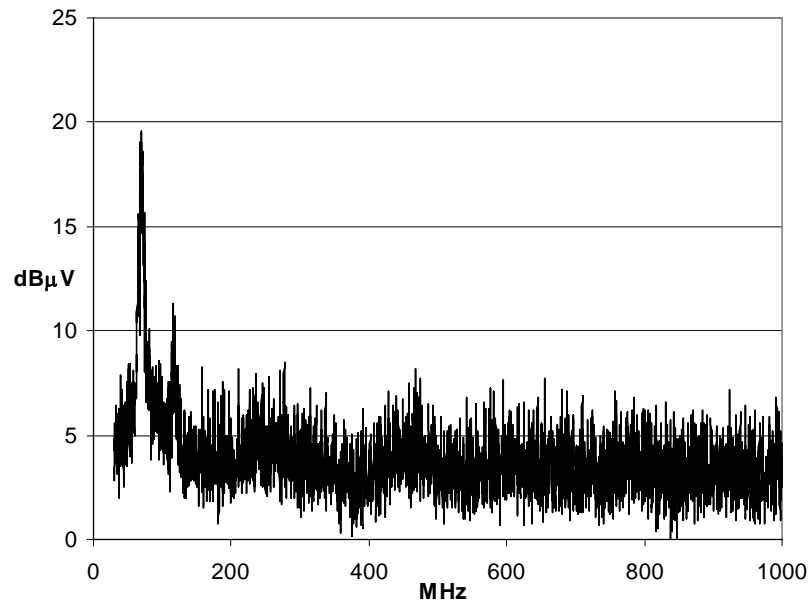
Forma d'onda della corrente



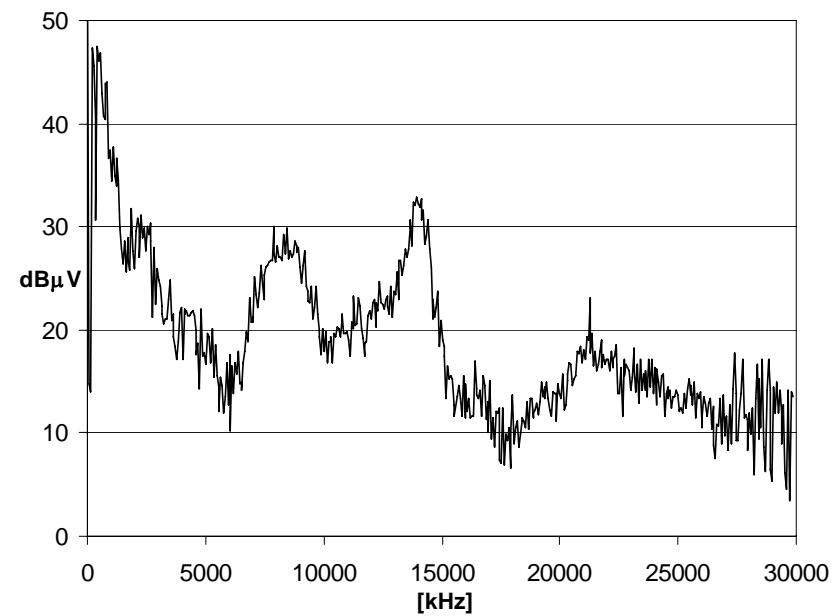
Armoniche di corrente



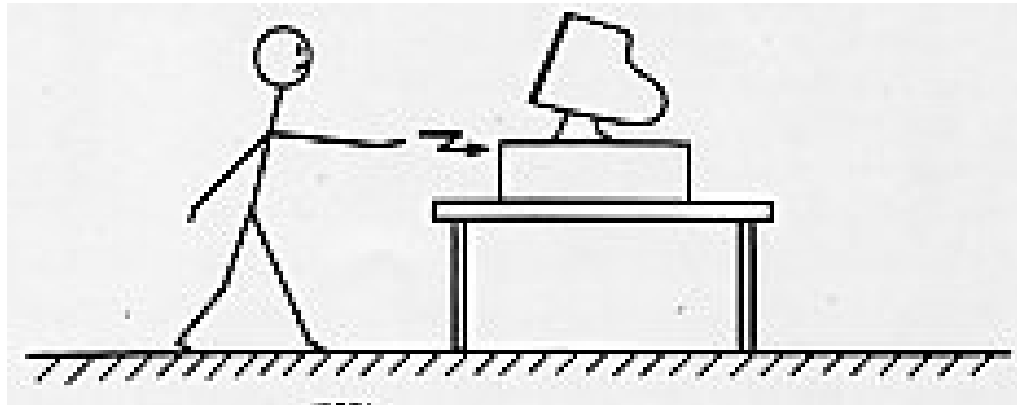
Emissione radiata



Emissione condotta



- Scariche elettrostatiche



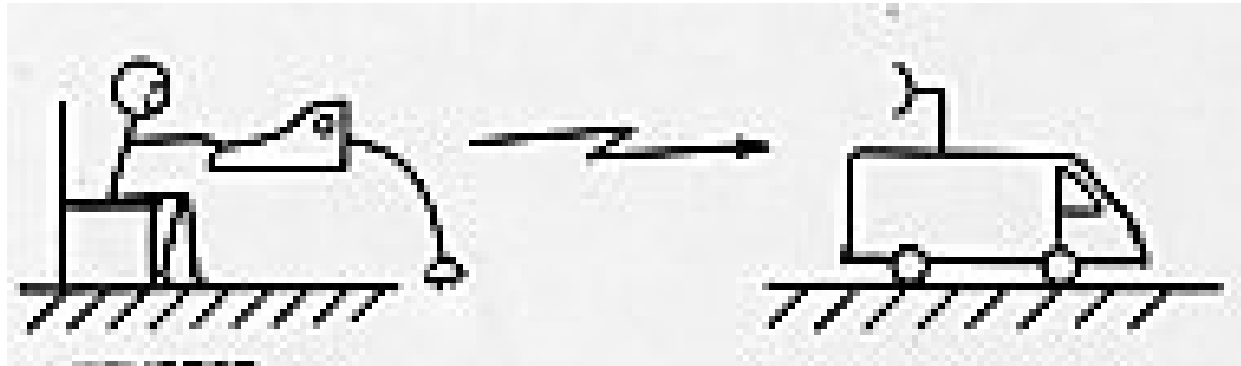
accumulo di cariche elettrostatiche;

arco elettrico;

effetti:

- trasferimento diretto di cariche: rottura dei componenti elettronici
- onda elettromagnetica: malfunzionamento sistema

- **Intercettazioni**



Possibilità di risalire a dati e comunicazioni da emissioni radiate;

Prevenire l'intercettazione;

Problematica importante in ambito commerciale, industriale e militare;

Fenomeno denominato TEMPEST

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

- **Esplosione nucleare** (a grande distanza o ad alta quota)



sviluppo di un impulso elettromagnetico EMP (Electromagnetic Pulse);

danneggiamento di strumentazione elettronica (dispositivi a semiconduttori) non dovuta a effetti diretti ma in seguito all'onda elettromagnetica di forte intensità;

problematica: proteggere la strumentazione di telecomunicazione ed elaborazione dati;

Fenomeno importante in ambito militare.

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Emissione e suscettibilità.

A frequenze maggiori di $2.42 \cdot 10^{15}$ Hz è associata un'energia tale da determinare la ionizzazione della molecola dell'acqua: tali **radiazioni** sono dette **ionizzanti (RI)**. Di contro per frequenze inferiori a $2.42 \cdot 10^{15}$ Hz si parla di **radiazioni non ionizzanti (NIR)**.

SPETTRO	SIGLA	LUNGHEZZA D'ONDA	INTERVALLI DI FREQUENZA
Frequenze estremamente basse	ELF(Extremely low frequency)	>30 km	0 Hz – 10 kHz
Radiofrequenze	VLF,LF,MF,HF,VHF	10 km - 10 m	10 kHz – 300 MHz
Microonde	UHF, SHF, EHF	1 dm - 1 cm	300 MHz – 300 GHz
Radiazioni ottiche	Infrarosso C B A Visibile Ultraviolet	3000 nm - 400 nm	0.3 THz– 3000 THz

GRANDEZZE E UNITÀ DI MISURA

Unità di misura utilizzate nel Sistema Internazionale.

- **grandezze primarie:**

- tensioni V in [V], intensità di corrente I in [A];
- campo elettrico E in [V/m], campi magnetici H in [A/m];

- **grandezze associate:**

- potenza P in [W];
- densità di potenza S in [W/m²].

Nella compatibilità elettromagnetica si usano i decibel:

- **grandezze primarie:**

- tensioni V in [dBmV], [dB μ V];
- intensità di corrente I in [dBmA], [dB μ A];
- campo elettrico E in [dBmV/m], [dB μ V/m];
- campi magnetici H in [dBmA/m], [dB μ A/m].

- **grandezze associate:**

- potenza P in [dBm];
- densità di potenza S in [dBmW/m²].

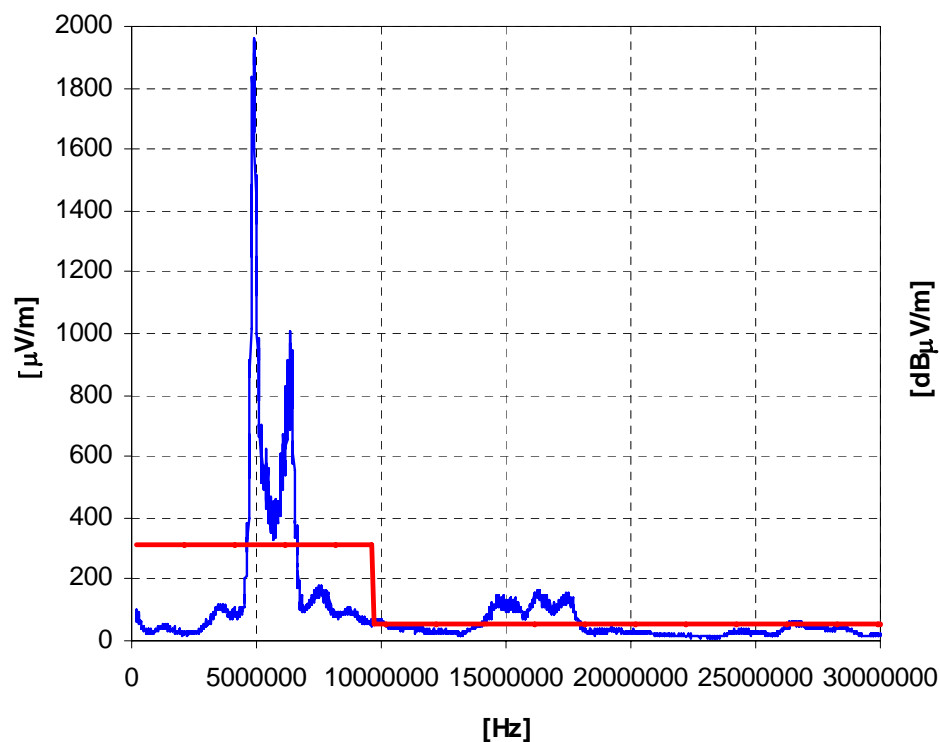
Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Unità di Misura.

Esempi di conversioni lineare - decibel:

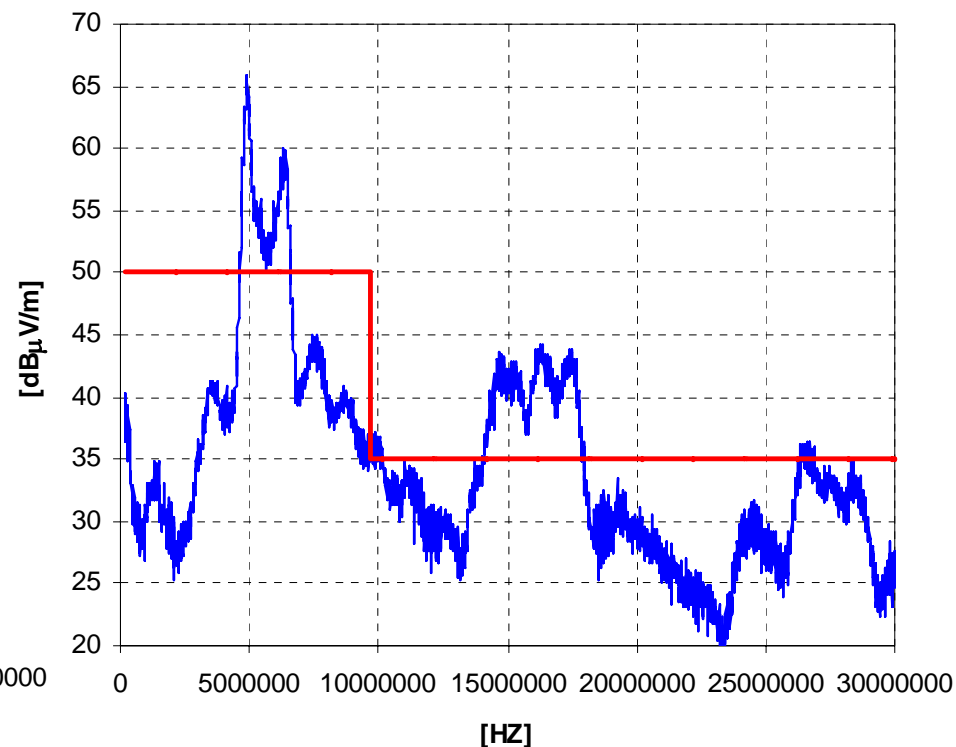
- $x \text{ [mV]} \Rightarrow 20\log_{10}(x \text{ mV} / 1 \text{ mV});$
 $150.2 \text{ [mV]} \Rightarrow 20\log_{10}(150.2 \text{ mV} / 1 \text{ mV}) = 43.5 \text{ [dBmV]}$
- $x \text{ [}\mu\text{A]} \Rightarrow 20\log_{10}(x \text{ }\mu\text{A} / 1 \text{ }\mu\text{A});$
 $68.4 \text{ [}\mu\text{A]} \Rightarrow 20\log_{10}(68.4 \text{ }\mu\text{A} / 1 \text{ }\mu\text{A}) = 36.7 \text{ [dB}\mu\text{A]};$
- $x \text{ [}\mu\text{V/m]} \Rightarrow 20\log_{10}(x \text{ }\mu\text{V/m} / 1 \text{ }\mu\text{V/m});$
 $236.7 \text{ [}\mu\text{V/m]} \Rightarrow 20\log_{10}(236.7 \text{ }\mu\text{V/m} / 1 \text{ }\mu\text{V/m}) = 47.4 \text{ [dB}\mu\text{V/m]};$
- $x \text{ [mW]} \Rightarrow 10\log_{10}(x \text{ mW} / 1 \text{ mW});$
 $120.7 \text{ [mW]} \Rightarrow 10\log_{10}(120.7 \text{ mW} / 1 \text{ mW}) = 20.8 \text{ [dBm]}.$

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Unità di Misura.

- I decibel permettono di comprimere la dinamica dei dati (miglior visualizzazione in display strumentali).



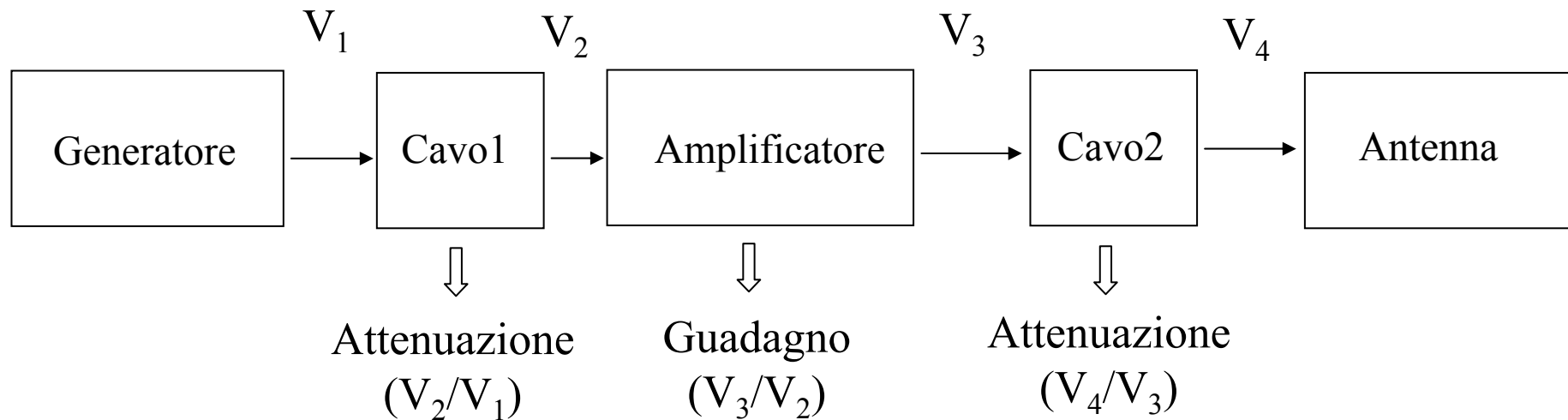
Tracciato di un test di
emissione radiata in lineare



Stesso tracciato in dB

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Unità di Misura.

- I decibel permettono di sfruttare le proprietà dei logaritmi.



Esempio:

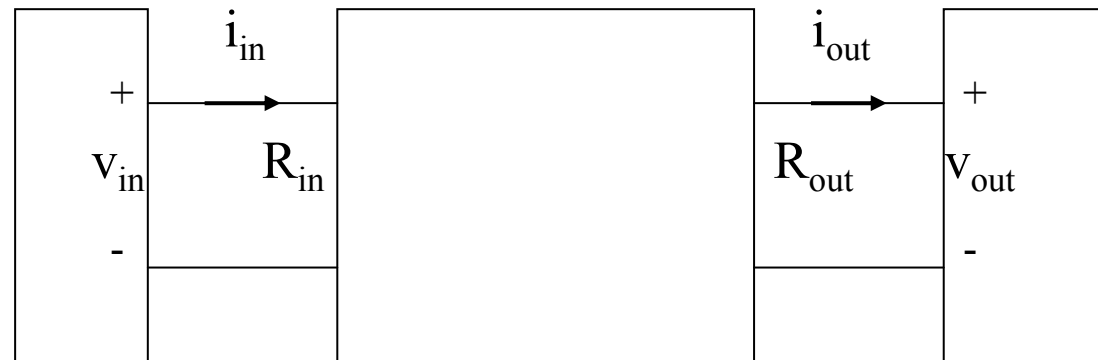
Attenuazione cavo1 = 1 dB; Guadagno amplificatore = 50 dB; Attenuazione cavo2 = 3 dB; tensione generata 6 dBmV;

Tensione sull'antenna $V_4 = 6 \text{ dBmV} - 1 \text{ dB} + 50 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 52 \text{ dBmV}$

I prodotti diventano somme e i rapporti diventano sottrazioni.

Introduzione alla compatibilità elettromagnetica. Unità di Misura.

- In condizioni di adattamento il guadagno in tensione o corrente coincide con quello in potenza.



Guadagno di potenza $_{dB}=10 \log_{10} (P_{OUT} / P_{IN})$

Guadagno di tensione $_{dB}=20 \log_{10} (v_{OUT} / v_{IN})$

Guadagno di corrente $_{dB}=20 \log_{10} (i_{OUT} / i_{IN})$

- In condizioni di adattamento $R_{OUT} = R_{IN}$:

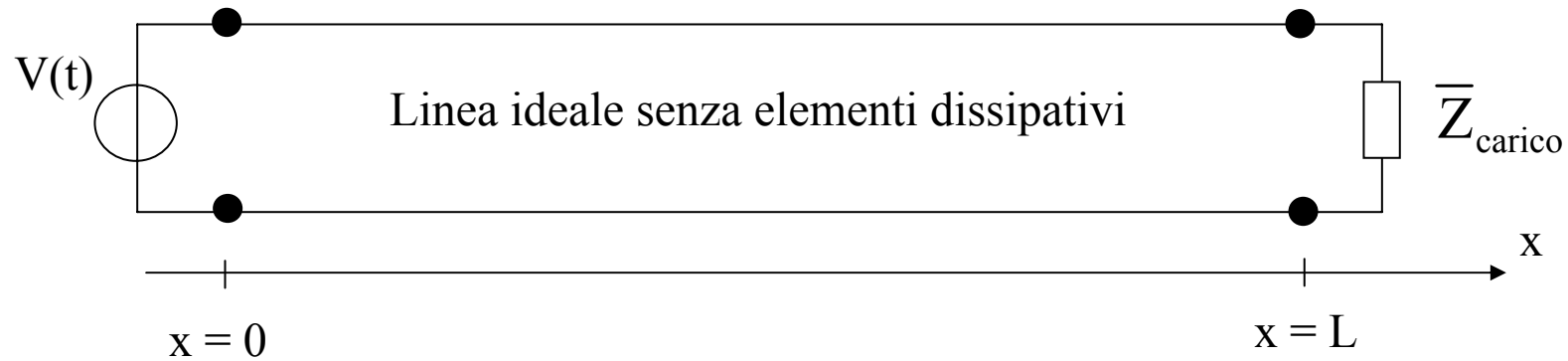
$$10 \log_{10}(P_{OUT} / P_{IN}) = 10 \log_{10} (v_{OUT}^2 / R_{OUT} / v_{IN}^2 / R_{IN}) = 10 \log_{10} (v_{OUT}^2 / v_{IN}^2) = 20 \log_{10} (v_{OUT} / v_{IN})$$

G in potenza = G in tensione

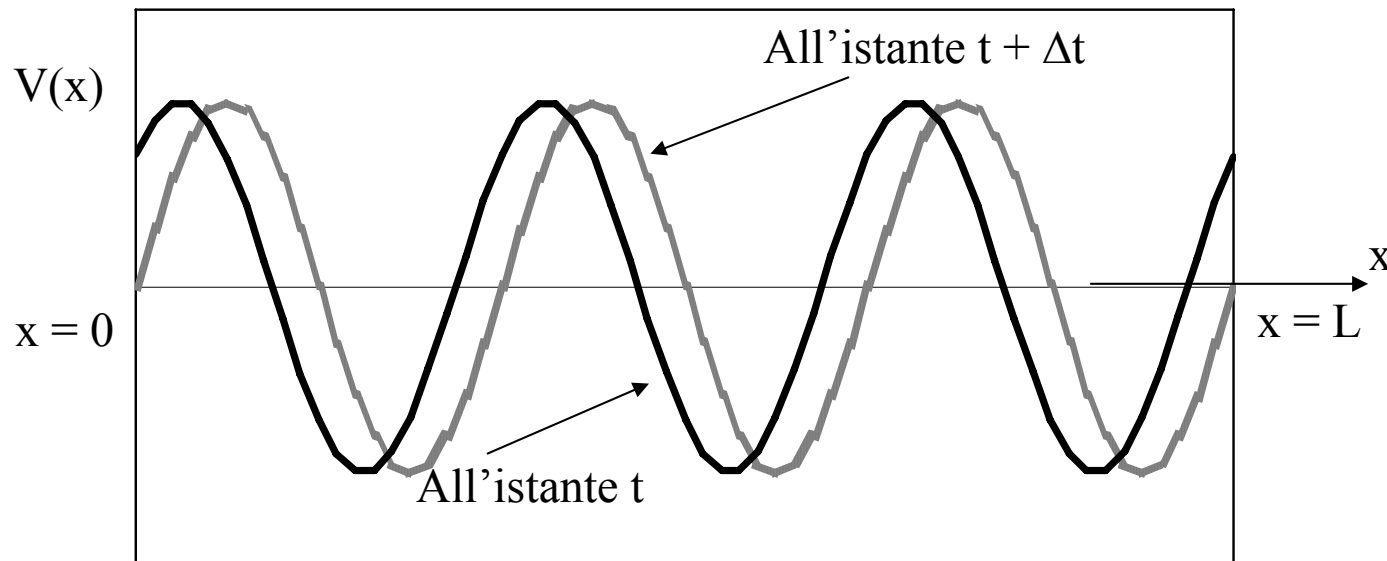
Unità didattica:

**Fenomeni elettromagnetici
condotti.**

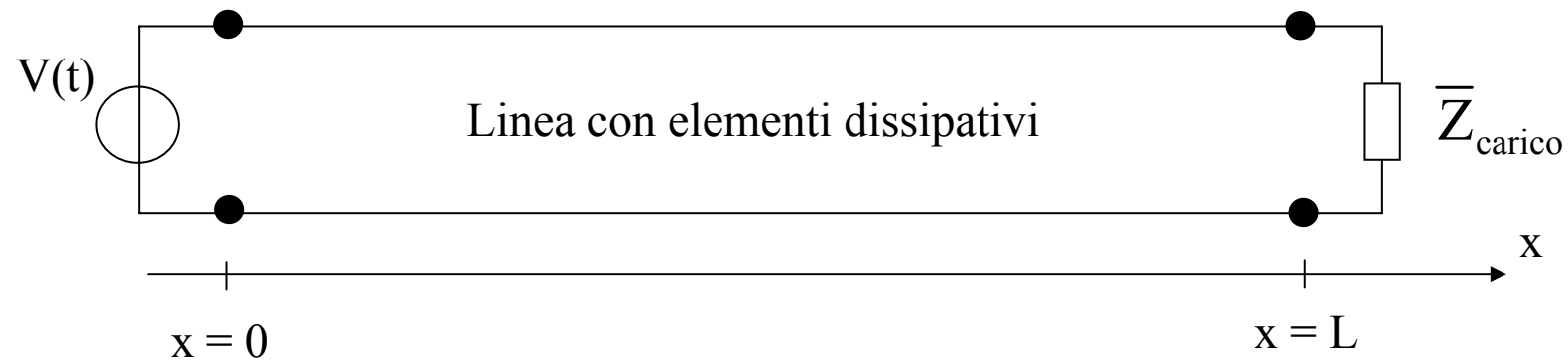
Linee di Trasmissione - Fenomeno della Propagazione Elettromagnetica



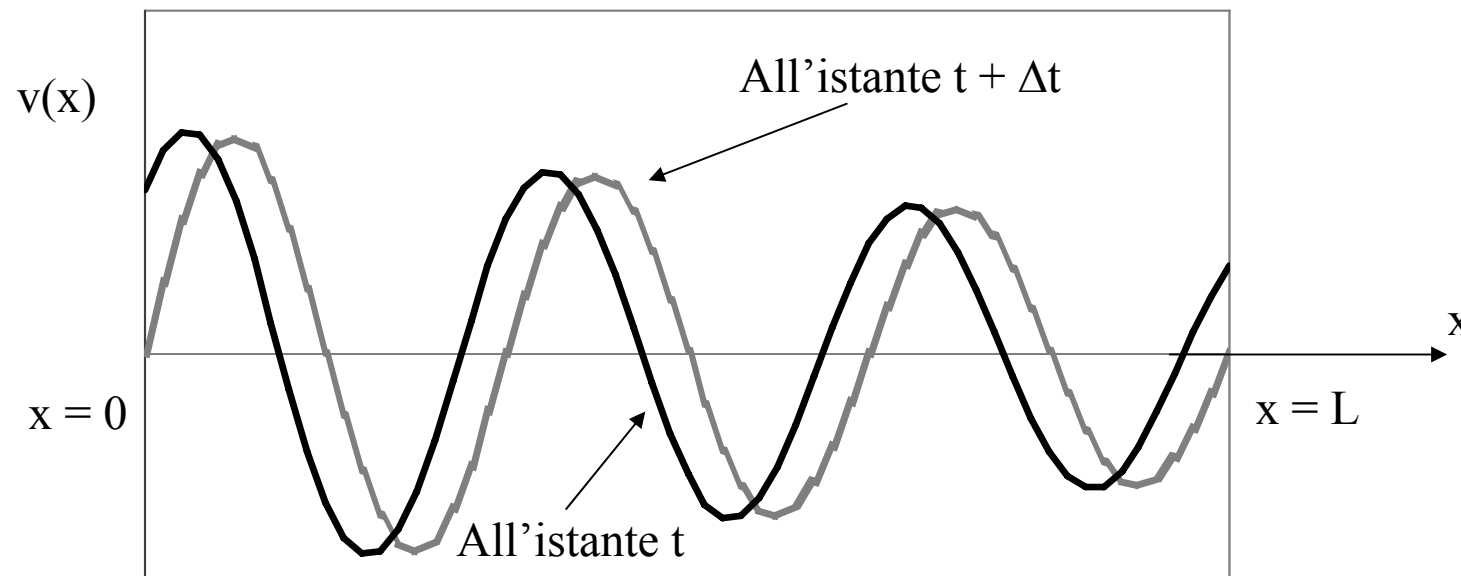
Se $V(t)$ è sinusoidale e se la lunghezza d'onda della tensione λ è inferiore alla lunghezza della linea L ci si aspetta una propagazione di questo tipo:



Linee di Trasmissione - Fenomeno della Propagazione Elettromagnetica



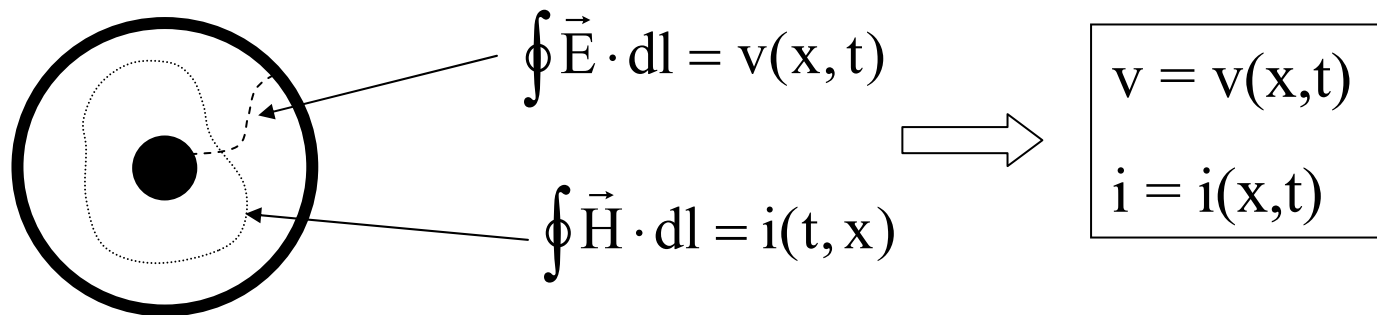
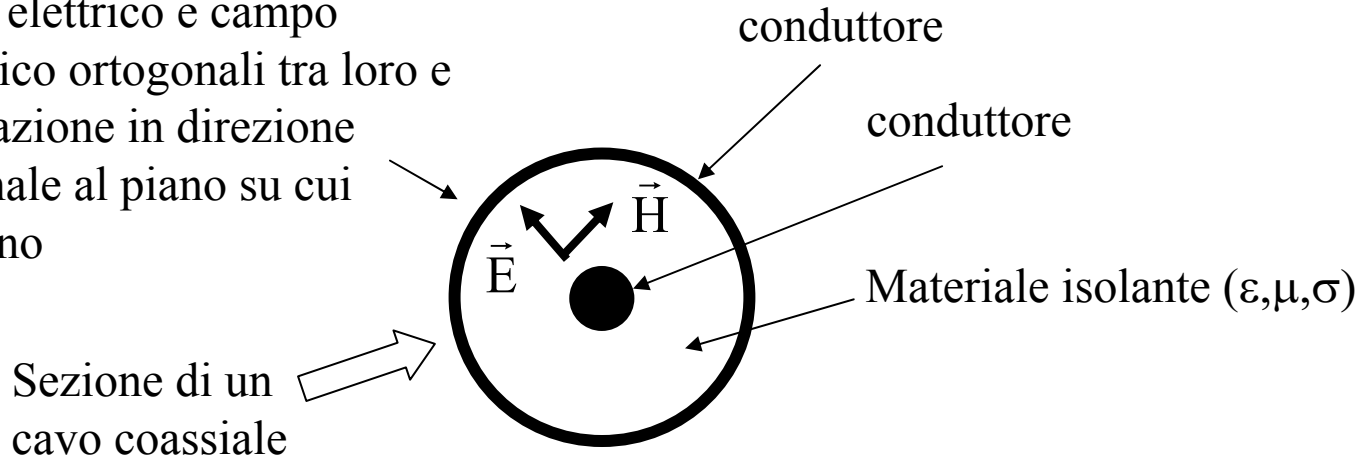
Se $V(t)$ è sinusoidale e se la lunghezza d'onda della tensione λ è inferiore alla lunghezza della linea L ci si aspetta una propagazione di questo tipo (lo stesso per $i(x,t)$):



Linee di Trasmissione

Ipotesi di propagazione TEM:

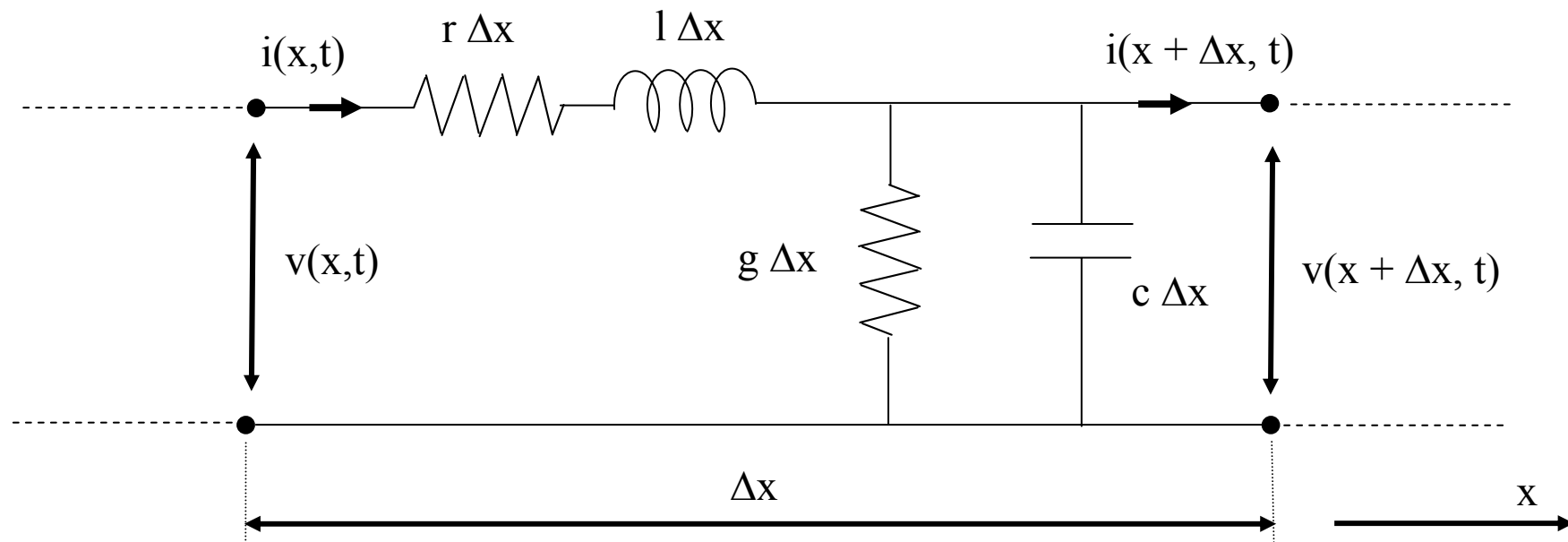
Campo elettrico e campo magnetico ortogonali tra loro e propagazione in direzione ortogonale al piano su cui giacciono



x coordinata lungo la quale si estende il cavo coassiale

Linee di Trasmissione

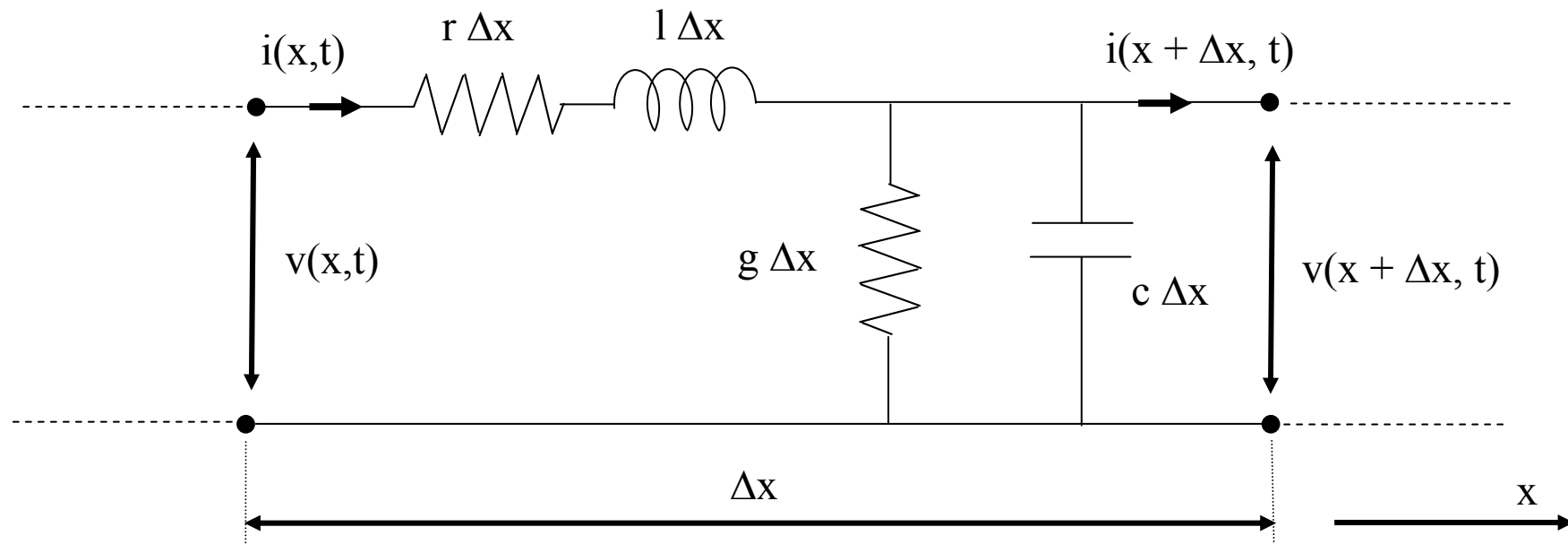
L'obiettivo di questa trattazione è determinare $v = v(x,t)$ e $i = i(x,t)$ nelle ipotesi sopra specificate e a regime sinusoidale:



La linea è suddivisa in tante celle di lunghezza $\Delta x \ll \lambda$, dove λ è la lunghezza d'onda del segnale che si propaga

Ogni cella può essere trattata a parametri concentrati

Linee di Trasmissione



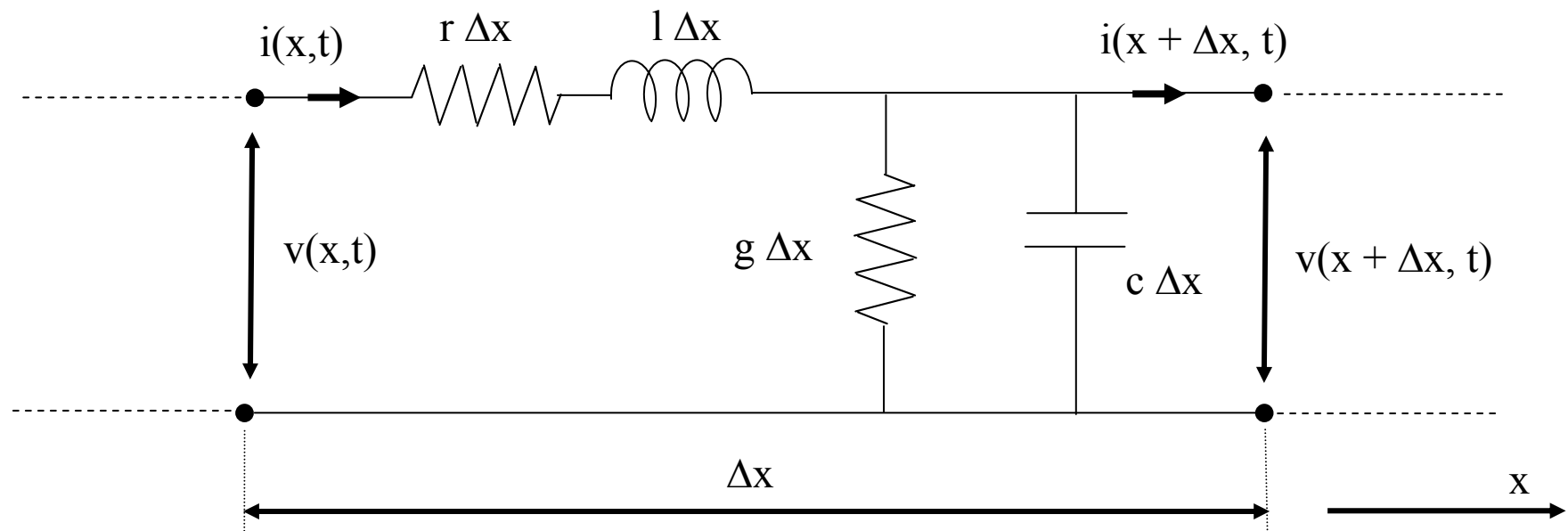
r = resistenza per unità di lunghezza dei conduttori [Ω/m]

l = induttanza per unità di lunghezza dei conduttori [H/m]

g = conduttanza per unità di lunghezza del materiale isolante tra i due conduttori [$1/\Omega\text{m}$]

c = capacità per unità di lunghezza tra i due conduttori [F/m]

Linee di Trasmissione



$$v(x + \Delta x, t) = v(x, t) - r\Delta x \cdot i(x, t) - l\Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$$

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - g\Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) - c\Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t}$$

$$\frac{v(x + \Delta x, t) - v(x, t)}{\Delta x} = -r \cdot i(x, t) - l \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$$

$$\frac{i(x + \Delta x, t) - i(x, t)}{\Delta x} = -g \cdot v(x + \Delta x, t) - c \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t}$$

Linee di Trasmissione

$$\lim \Delta x \rightarrow 0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -r \cdot i(x, t) - l \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -g \cdot v(x, t) - c \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \end{array} \right.$$

Equazioni delle linee di trasmissione o equazioni dei telegrafisti

A regime sinusoidale:

$$\left\{ \begin{array}{l} v(x, t) \longrightarrow \dot{V}(x) \\ i(x, t) \longrightarrow \dot{I}(x) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\dot{V}(x)}{dx} = -r \cdot \dot{I}(x) - j\omega l \cdot \dot{I}(x) \\ \frac{d\dot{I}(x)}{dx} = -g \cdot \dot{V}(x) - j\omega c \cdot \dot{V}(x) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\dot{V}(x)}{dx} = -\bar{Z}_1 \cdot \dot{I}(x) \\ \frac{d\dot{I}(x)}{dx} = -\bar{Y}_t \cdot \dot{V}(x) \end{array} \right.$$

\bar{Z}_1 Impedenza longitudinale

\bar{Y}_t Ammettenza trasversale

Linee di Trasmissione

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \dot{V}(x)}{dx^2} = -\bar{Z}_1 \cdot \frac{d\dot{I}(x)}{dx} \\ \frac{d^2 \dot{I}(x)}{dx^2} = -\bar{Y}_t \cdot \frac{d\dot{V}(x)}{dx} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \dot{V}(x)}{dx^2} = \bar{Z}_1 \bar{Y}_t \cdot \dot{V}(x) \\ \frac{d^2 \dot{I}(x)}{dx^2} = \bar{Z}_1 \bar{Y}_t \cdot \dot{I}(x) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Due equazioni} \\ \text{differenziali del} \\ \text{secondo ordine} \\ \text{omogenee e tra loro} \\ \text{disaccoppiate} \end{array}$$

$$\text{condizioni al contorno} \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{V}(0) = \dot{V}_0 \\ \dot{I}(0) = \dot{I}_0 \end{array} \right.$$

La soluzione relativa alle equazioni differenziali specificate sopra, prendendo ad esempio quella che esprime la tensione elettrica ha la seguente forma:

$$\dot{V}(x) = K_1 \cdot e^{\alpha_1 x} + K_2 \cdot e^{\alpha_2 x}$$

dove α_1 e α_2 sono le soluzioni dell'equazione omogenea associata:

$$\alpha^2 - \bar{Z}_1 \bar{Y}_t = 0 \quad \Longrightarrow \quad \alpha_{1,2} = \pm \sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_t}$$

Linee di Trasmissione - Impedenza Caratteristica

Sfruttando le condizioni al contorno:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_0 = K_1 + K_2 \\ \left. \frac{d\dot{V}(x)}{dx} \right|_0 = \alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_2 = -\bar{Z}_1 \dot{I}_0 \end{array} \right.$$

Ricavando K_1 e K_2 dalle due equazioni si ottengono le seguenti soluzioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}(x) = \frac{1}{2} (\dot{V}_0 + \bar{Z}_c \dot{I}_0) \cdot e^{-(\sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_t})x} + \frac{1}{2} (\dot{V}_0 - \bar{Z}_c \dot{I}_0) \cdot e^{+(\sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_t})x} \\ \dot{I}(x) = \frac{1}{2} \frac{1}{\bar{Z}_c} (\dot{V}_0 + \bar{Z}_c \dot{I}_0) \cdot e^{-(\sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_t})x} - \frac{1}{2} \frac{1}{\bar{Z}_c} (\dot{V}_0 - \bar{Z}_c \dot{I}_0) \cdot e^{+(\sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_t})x} \end{array} \right.$$

dove

$$\bar{Z}_c = \text{Impedenza caratteristica della linea} = \sqrt{\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Y}_t}} = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}}$$

Linee di Trasmissione

Per tornare nel dominio del tempo:

$$v(x, t) = \operatorname{Re} \left[\dot{V}(x) \cdot e^{j\omega t} \right] = \operatorname{Re} \left[\bar{V}^+ e^{-\left(\sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_t}\right)x} e^{j\omega t} + \bar{V}^- e^{+\left(\sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_t}\right)x} e^{j\omega t} \right]$$

dove:

$$\bar{V}^+ = \frac{1}{2} \left(\dot{V}_0 + \bar{Z}_c \dot{I}_0 \right) \quad \text{termine progressivo}$$

$$\bar{V}^- = \frac{1}{2} \left(\dot{V}_0 - \bar{Z}_c \dot{I}_0 \right) \quad \text{termine regressivo}$$

In definitiva:

$$v(x, t) = \operatorname{Re} \left[V^+ \left(\cos \theta^+ + j \operatorname{sen} \theta^+ \right) e^{-(\alpha + j\beta)x} e^{j\omega t} + V^- \left(\cos \theta^- + j \operatorname{sen} \theta^- \right) e^{(\alpha + j\beta)x} e^{j\omega t} \right]$$

$$v(x, t) = V^+ e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x + \theta^+) + V^- e^{\alpha x} \cos(\omega t + \beta x + \theta^-)$$

$$\text{dove: } \sqrt{\bar{Z}_1 \bar{Y}_t} = \alpha + j\beta \quad \text{e} \quad \begin{cases} \bar{V}^+ = V^+ \left(\cos \theta^+ + j \operatorname{sen} \theta^+ \right) \\ \bar{V}^- = V^- \left(\cos \theta^- + j \operatorname{sen} \theta^- \right) \end{cases}$$

Linee di Trasmissione

In conclusione l'andamento rispetto a x e t della tensione è espresso dalla seguente equazione:

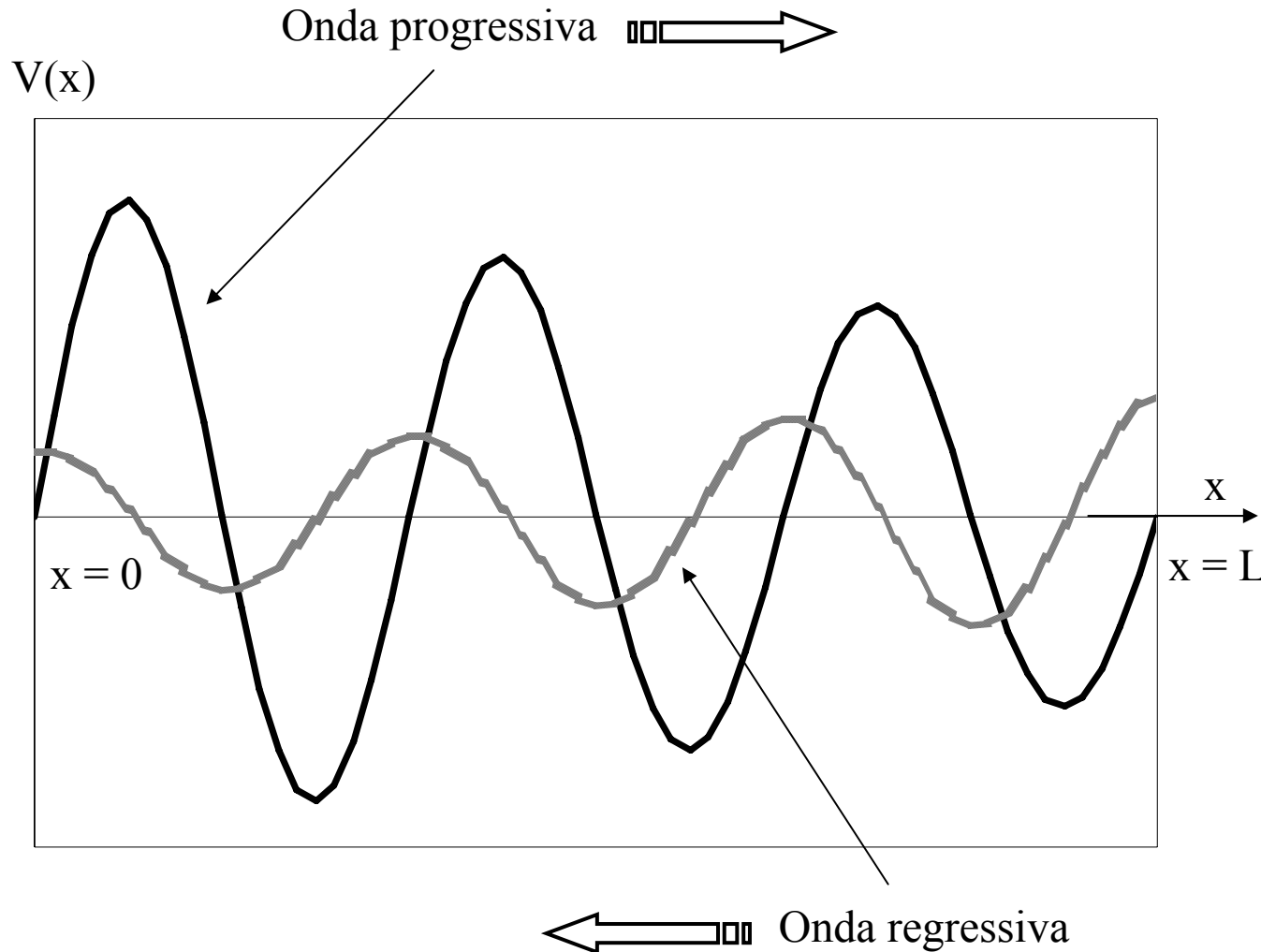
$$v(x, t) = V^+ e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x + \theta^+) + V^- e^{\alpha x} \cos(\omega t + \beta x + \theta^-)$$

Una espressione del tutto equivalente può essere trovata anche per la corrente. Questa espressione è caratterizzata dalla somma di due termini, il primo rappresenta un'onda di tensione smorzata che si propaga dalla sorgente al carico (**onda progressiva**, così come ci si aspettava), il secondo rappresenta un'onda di tensione smorzata che si propaga dal carico alla sorgente (**onda regressiva**, inaspettata).

Lungo la linea di trasmissione agisce un'onda di tensione somma delle due onde progressiva e regressiva.

Lo stesso fenomeno si verifica anche per la corrente.

Linee di Trasmissione



Lo stesso fenomeno avviene per l'onda di corrente $i(x,t)$. Per cui si verifica la presenza di un flusso di potenza progressivo e di uno regressivo.

In altre parole non tutta la potenza generata dalla sorgente raggiunge il carico, una parte viene riflessa.

E' molto importante quindi trovare una condizione per la quale la potenza venga utilizzata tutta dal carico senza riflessioni.

Condizione di adattamento

Linee di Trasmissione - Coefficiente di Riflessione

Per determinare la condizione di adattamento bisogna prima definire il coefficiente di riflessione:

$$\frac{\dot{V}(x)}{\dot{I}(x)} = \frac{\frac{1}{2}(\dot{V}_0 + \bar{Z}_c \dot{I}_0) \cdot e^{-(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x) + \frac{1}{2}(\dot{V}_0 - \bar{Z}_c \dot{I}_0) \cdot e^{+(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x)}}{\frac{1}{2} \frac{1}{\bar{Z}_c} (\dot{V}_0 + \bar{Z}_c \dot{I}_0) \cdot e^{-(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x) - \frac{1}{2} \frac{1}{\bar{Z}_c} (\dot{V}_0 - \bar{Z}_c \dot{I}_0) \cdot e^{+(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x)}}$$

$$\frac{\dot{V}(x)}{\dot{I}(x)} = \frac{\bar{V}^+ \cdot e^{-(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x) \left[1 + \frac{\bar{V}^- \cdot e^{(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x)}}{\bar{V}^+ \cdot e^{-(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x)}} \right]}{\frac{\bar{V}^+}{\bar{Z}_c} e^{-(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x) \left[1 - \frac{\bar{V}^- \cdot e^{(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x)}}{\bar{V}^+ \cdot e^{-(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x)}} \right]}$$

$$\Gamma(x) = \frac{\bar{V}^- \cdot e^{(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x)}}{\bar{V}^+ \cdot e^{-(\sqrt{\bar{Z}_l \bar{Y}_l} x)}} \quad \longrightarrow \quad \text{Coefficiente di riflessione}$$

$$\frac{\dot{V}(x)}{\dot{I}(x)} = \bar{Z}_c \left[\frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)} \right]$$

Linee di Trasmissione - Condizione di adattamento

Il coefficiente di riflessione è il rapporto tra l'intensità dell'onda regressiva e l'intensità di quella progressiva in corrispondenza di una generica coordinata x .

La condizione di adattamento si ha quando è nulla l'onda regressiva in corrispondenza del carico quindi quando è nullo il coefficiente di riflessione in corrispondenza del carico per cui:

$$\frac{\dot{V}(L)}{\dot{I}(L)} = \bar{Z}_c \left[\frac{1 + \Gamma(L)}{1 - \Gamma(L)} \right] = \bar{Z}_c$$

$$\bar{Z}_L = \bar{Z}_c$$

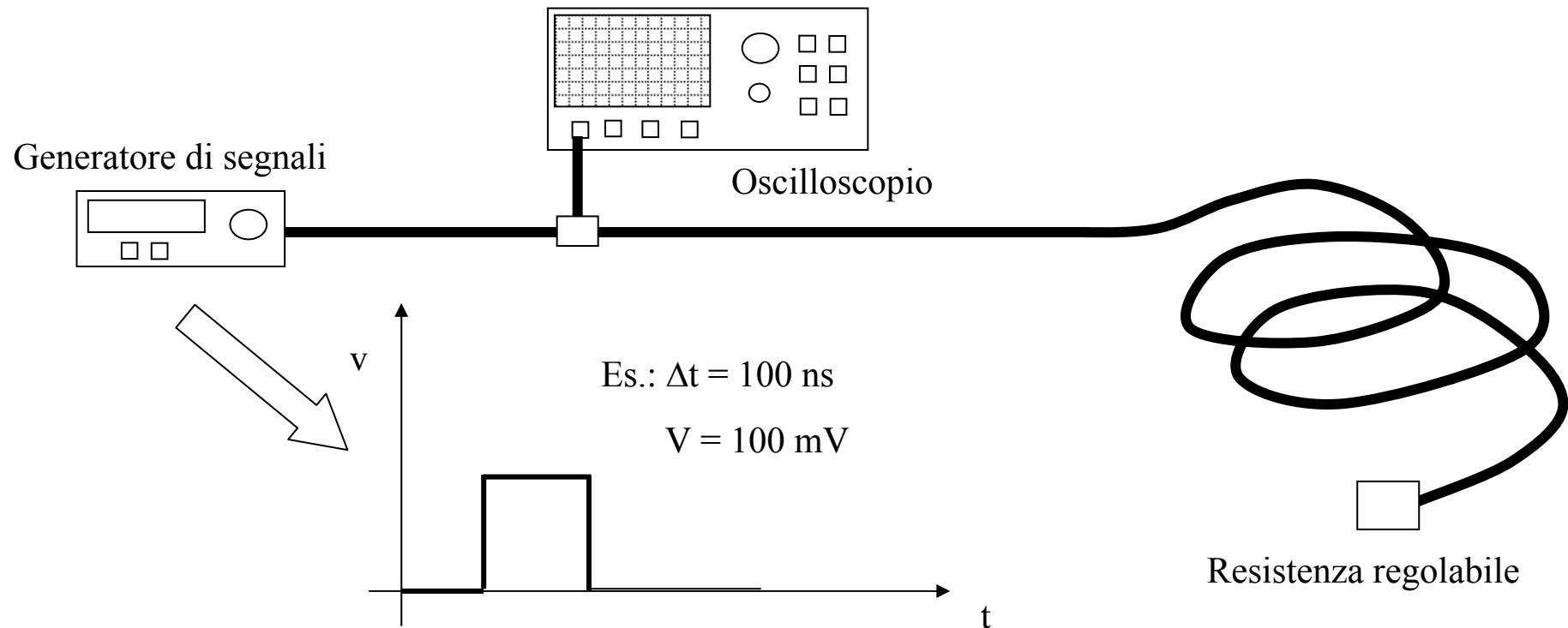
La condizione di adattamento si ha quando l'impedenza di carico coincide con quella caratteristica di linea.

Linee di Trasmissione - Determinazione sperimentale dell'Impedenza Caratteristica

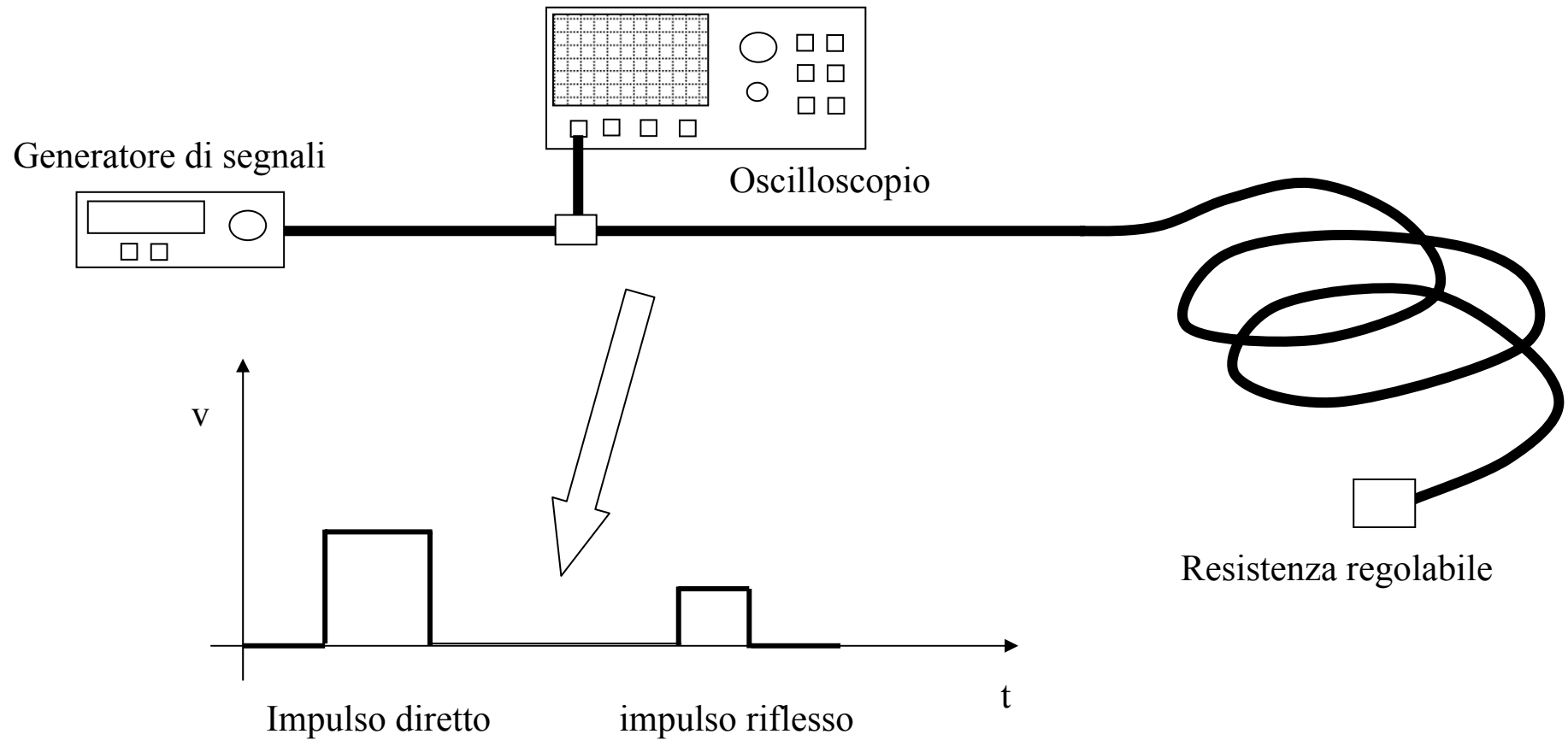
$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}}$$

Obiettivo: determinare r , l , g , c di un cavo coassiale

1) Determinazione del modulo dell'impedenza caratteristica:



Linee di Trasmissione - Determinazione sperimentale dell'Impedenza Caratteristica



Il valore della resistenza di trimmer che fa sparire l'impulso riflesso è in prima approssimazione pari al modulo dell'impedenza caratteristica del cavo coassiale in esame.

Linee di Trasmissione - Determinazione sperimentale dell'Impedenza Caratteristica

2) Determinazione di r:

Si effettua una misurazione volt-amperometrica in corrente continua sui due conduttori del cavo e si determina r_{DC} .

Si tiene conto dell'effetto pelle attraverso la seguente espressione:

$$r = r_{DC} \frac{\text{raggioconduttore}}{2\delta} \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu f\sigma}} \quad (\text{spessore di penetrazione})$$

Se il raggio del conduttore è $\ll \delta$ allora $r = r_{DC}$.

3) Determinazione di g:

Si effettua una misurazione volt-amperometrica in corrente continua tra i due conduttori del cavo e si determina g .

In questo caso non è necessario tener conto dell'effetto pelle

Linee di Trasmissione - Determinazione sperimentale dell'Impedenza Caratteristica

4) Determinazione di l e c :

La velocità di propagazione di un segnale lungo una linea di trasmissione è determinabile dalla seguente espressione:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad \text{Dove } \mu \text{ e } \varepsilon \text{ sono la permeabilità magnetica e la permittività del materiale isolante interposto tra i due conduttori del cavo.}$$

In condizioni di propagazione TEM (caso dei cavi coassiali):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{lc}}$$

A questo punto noti r , g e modulo di Z_c si possono determinare l e c dalle due equazioni in due incognite seguenti:

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \quad v = \frac{1}{\sqrt{lc}}$$

Linee di Trasmissione - Potenza

La potenza che transita in corrispondenza di una generica coordinata x di una linea di trasmissione può essere determinata dalla tensione e dalla corrente in corrispondenza della stessa coordinata:

$$P(x) = \Re[\dot{V}(x) \cdot \check{I}(x)]$$

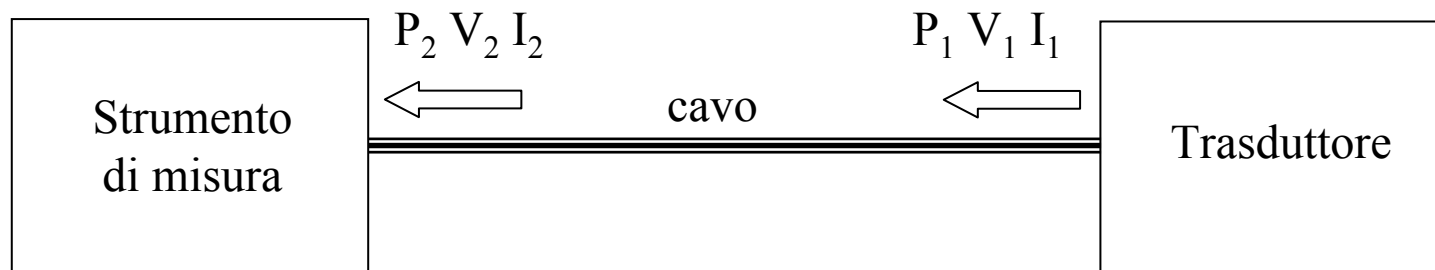
In condizioni di adattamento la potenza viene tutta assorbita dal carico senza nessuna riflessione.

Attenuazione dei Cavi

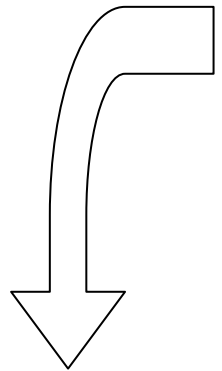
Nei set-up di misura tutti i segnali in tensione o in corrente e i flussi di potenza ad essi associati, sono veicolati attraverso dei cavi di misura che in genere sono cavi coassiali con una impedenza caratteristica standard di 50Ω

I segnali vengono trasmessi dai trasduttori di misura (antenne, sonde di tensione, sonde di corrente, reti di accoppiamento ecc...) agli strumenti di misura (ricevitori, analizzatori di spettro, oscilloscopi ecc...).

Lo strumento di misura rileva l'intensità del segnale prodotto dal trasduttore meno l'attenuazione del cavo di trasmissione. La misura può essere corretta sommando alla misura l'attenuazione. L'attenuazione del cavo è fornita dal costruttore in funzione della frequenza



Attenuazione dei Cavi



Attenuazione in termini di potenza	$10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$	[dB]
Attenuazione in termini di tensione	$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$	[dB]
Attenuazione in termini di corrente	$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$	[dB]

In condizioni di adattamento (impedenza d'ingresso dello strumento di misura pari all'impedenza caratteristica del cavo) questi tre attenuazioni in [dB] coincidono.

Il costruttore fornisce l'attenuazione del cavo in funzione della frequenza attraverso tabelle e grafici.

L'attenuazione di un cavo tende ad aumentare all'aumentare della frequenza: perché aumenta la resistenza per unità di lunghezza a causa dell'effetto pelle, perché aumenta la reattanza induttiva (ωL) e perché diminuisce la reattanza capacitiva ($1/\omega C$).

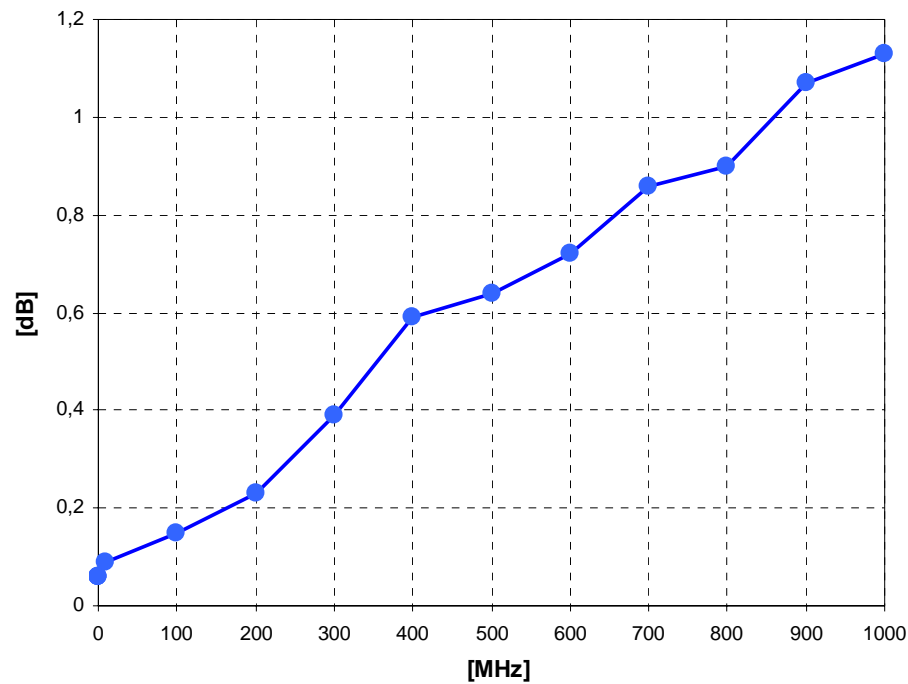
Attenuazione dei Cavi

Esempi di diagrammi di attenuazione di 2 diversi cavi:

SCHAFFNER IL9513

Lunghezza 5 metri

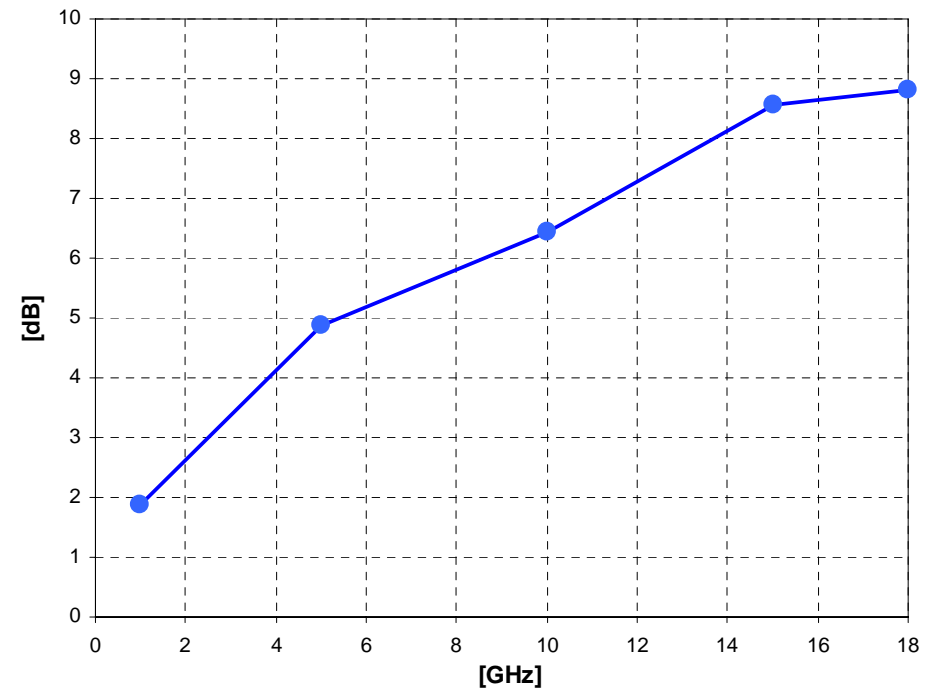
Banda 9 kHz – 1 GHz



REYNOLDS 269-0195-10M0-5002

Lunghezza 5 metri

Banda 1 GHz – 18 GHz

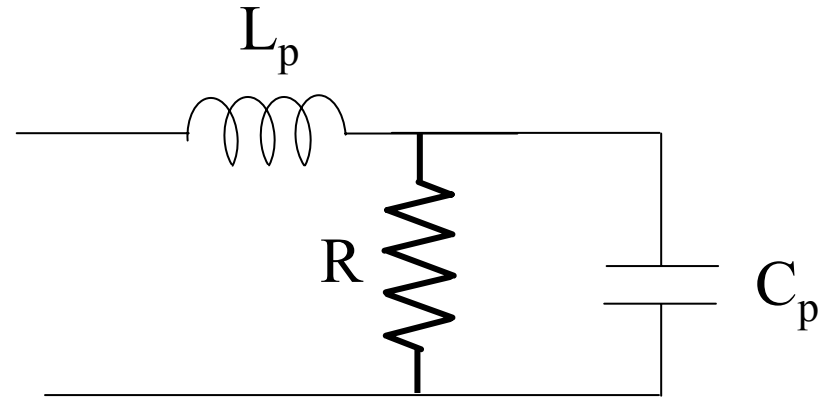


Comportamento non ideale dei bipoli passivi

Rappresentazione circuitale di una resistenza **ideale**



Rappresentazione circuitale di una resistenza **reale**. Sono presenti dei parametri parassiti, induttivi e capacitivi.

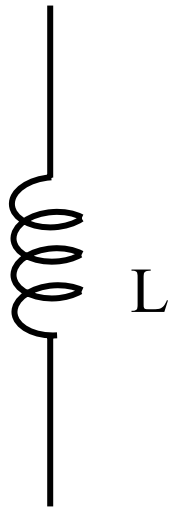


L'effetto dei parametri parassiti induttivi e capacitivi aumenta all'aumentare della frequenza.

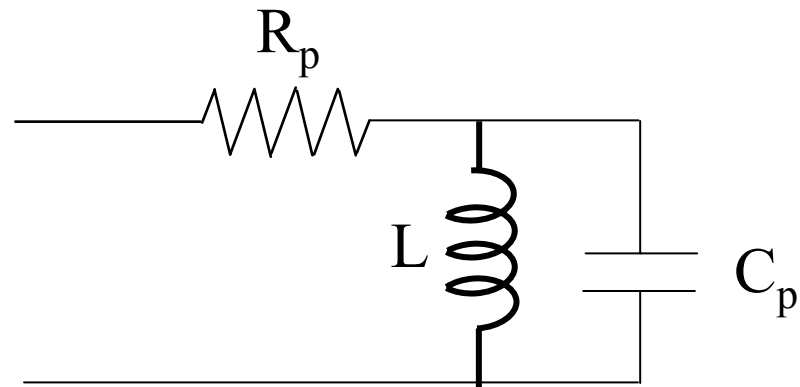
Le resistenze utilizzate per apparati funzionanti a radiofrequenza sono costruite con tecnologie tali da essere anti-induttive (parametro parassita maggiormente presente)

Comportamento non ideale dei bipoli passivi

Rappresentazione circuitale di una induttanza **ideale**



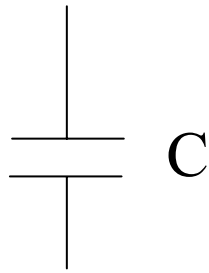
Rappresentazione circuitale di una resistenza **reale**. Sono presenti dei parametri parassiti, resistivi e capacitivi.



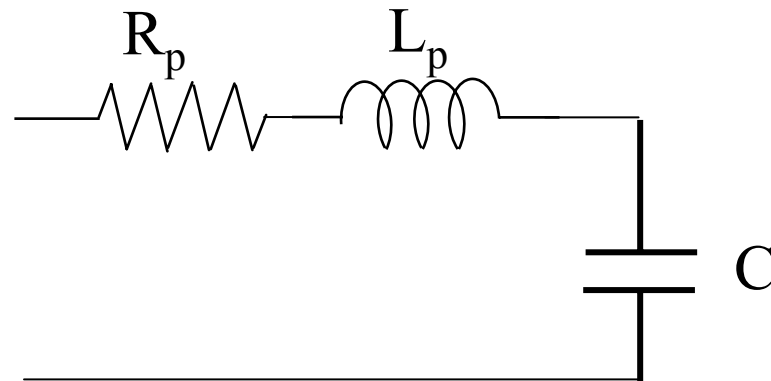
L'effetto dei parametri parassiti resistivi e capacitivi aumenta all'aumentare della frequenza.

Comportamento non ideale dei bipoli passivi

Rappresentazione circuitale
di una capacità **ideale**



Rappresentazione circuitale di una capacità **reale**.
Sono presenti dei parametri parassiti, induttivi e resistivi.



L'effetto dei parametri parassiti resistivi e induttivi aumenta all'aumentare della frequenza.

TEST	Normativa Generica	Normativa Base
Armoniche di corrente	CEI EN 61000 – 6 – 3	CEI EN 61000 – 3 – 2
Fluttuazioni di tensione e Flicker	CEI EN 61000 – 6 – 3	CEI EN 61000 – 3 – 3
Emissione condotta 150 kHz ÷ 30 MHz	CEI EN 61000 – 6 – 3	CEI EN 55022
Immunità condotta 150 kHz ÷ 80 MHz	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 6
Impulso di sovratensione SURGE	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 5
Treni di impulsi di sovratensione BURST	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 4
Buchi di tensione e brevi interruzioni	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 11
Emissione radiata 30 MHz ÷ 1 GHz	CEI EN 61000 – 6 – 3	CEI EN 55022
Immunità radiata 30 MHz – 1 GHz	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 3
Immunità radiata 50 Hz	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 8
Scariche elettrostatiche ESD	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 2

Armoniche di corrente

Il gestore della rete di distribuzione dell'energia elettrica fornisce all'utenza una tensione elettrica di forma sinusoidale.

Se il carico di una particolare utenza ha delle caratteristiche elettriche di non linearità (es. materiali ferromagnetici) la corrente che assorbe è non sinusoidale.

Il contenuto armonico di tale corrente deve sottostare a determinate specifiche normative in modo da non causare a sua volta una distorsione della forma d'onda della tensione sulla rete di distribuzione, con conseguenti disagi sulle altre utenze.

Il contenuto armonico di un segnale periodico e continuo può essere determinato con la Trasformata di Fourier:

$$i(t) = I_{med} + \sum_{k=1}^{\infty} I_{k \max} \text{sen}(k\omega t + \varphi_k) \quad I_{k \max} = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$$
$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(k\omega t) dt \quad B_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \text{sen}(k\omega t) dt \quad \varphi_k = \text{arctg} \left(\frac{A_k}{B_k} \right) + h\pi$$

$$h = 0 \text{ se } B_k > 0, \quad h = 1 \text{ se } B_k < 0$$

Armoniche di corrente (norma di riferimento CEI EN 61000 - 3 - 2)

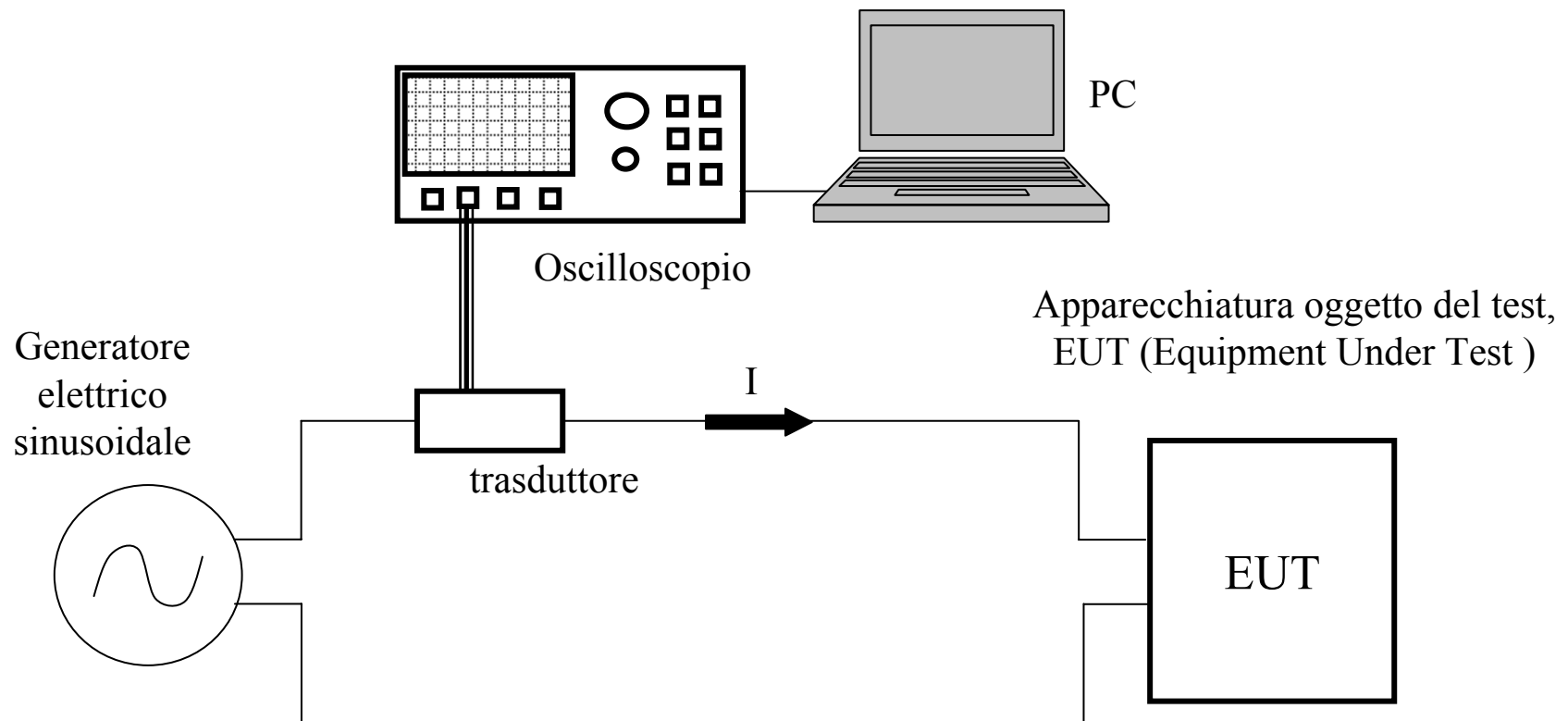
La normativa che regola le correnti armoniche prodotte da una apparecchiatura elettrica od elettronica utilizzata in ambiente domestico, commerciale o industriale prevede i seguenti limiti:

Armoniche dispari	Limite [A]
3°	2.3
5°	1.14
7°	0.77
9°	0.40
11°	0.33
13°	0.21
15° < k < 39°	0.15*15/n

Armoniche pari	Limite [A]
2°	1.08
4°	0.43
6°	0.30
8° < k < 40°	0.23*8/k

Armoniche di corrente (norma di riferimento CEI EN 61000-3-2)

Un possibile schema per la misura delle armoniche di corrente prodotte da una apparecchiatura:



Armoniche di corrente

Il trasduttore può essere di due tipi:

- Resistenza anti-induttiva: l'oscilloscopio misura la tensione ai suoi capi e si risale alla corrente in base al valore della R. Deve essere anti-induttiva per limitare la L parassita.

- Pinza amperometrica: l'oscilloscopio misura una tensione proporzionale alla corrente che scorre nel filo sul quale si applica la pinza. La costante di proporzionalità è fornito dal costruttore della pinza.

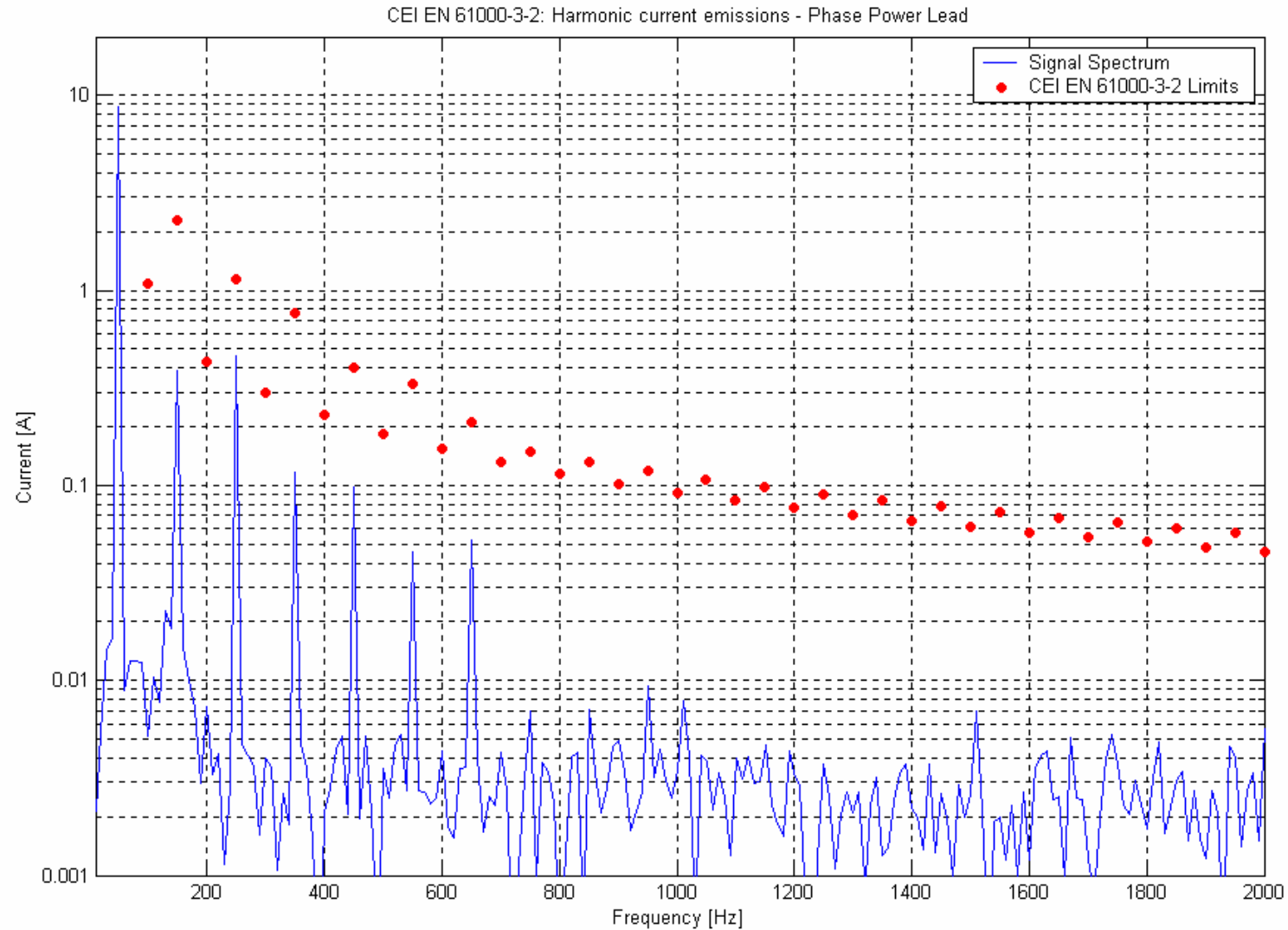
L'oscilloscopio visualizza e memorizza l'andamento nel tempo della corrente $i(t)$.

Per ottenere il valore delle singole armoniche bisogna applicare la Trasformata di Fourier ad $i(t)$.

Ogni singola armonica deve avere un'intensità inferiore al rispettivo limite.

Armoniche di corrente

Esempio: armoniche di corrente emesse da una vetrina frigo per ambienti commerciali



Fluttuazioni di tensione - Flicker

Il gestore della rete di distribuzione dell'energia elettrica fornisce all'utenza una tensione elettrica di valore efficace circa costante nel tempo.

Se una particolare utenza ha degli assorbimenti in corrente discontinui può provocare delle cadute di tensione sulla linea di distribuzione variabili che provocano disagi sulle altre utenze, in particolare sugli impianti luce dove può instaurarsi un fenomeno di sfarfallio “flicker” (variazione periodica dell'intensità luminosa).

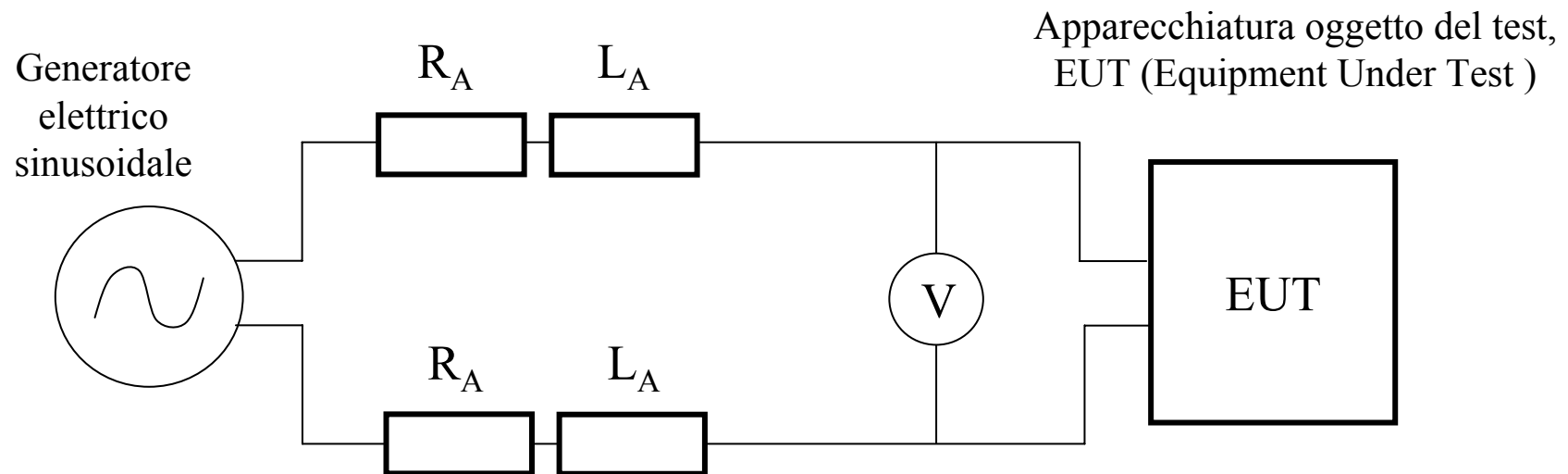
Per evitare tale fenomeno bisogna verificare che le apparecchiature elettriche generino delle fluttuazioni di tensione con frequenza ed intensità tali da soddisfare le specifiche dettate dalle normative di compatibilità elettromagnetica.

La verifica delle fluttuazioni di tensione provocate da una apparecchiatura possono essere misurate con un particolare strumento il “flickermetro”. In mancanza di questo particolare strumento è possibile utilizzare un “metodo alternativo” la cui procedura è specificata dalla normativa.

Fluttuazioni di tensione - Flicker (norma di riferimento CEI EN 61000-3-3)

Metodo alternativo: applicabile solo se l'apparecchiatura produce delle variazioni di tensione rettangolari di stessa ampiezza e della stessa durata

Schema per la misura della variazione di tensione prodotta sulla linea da una apparecchiatura elettrica:

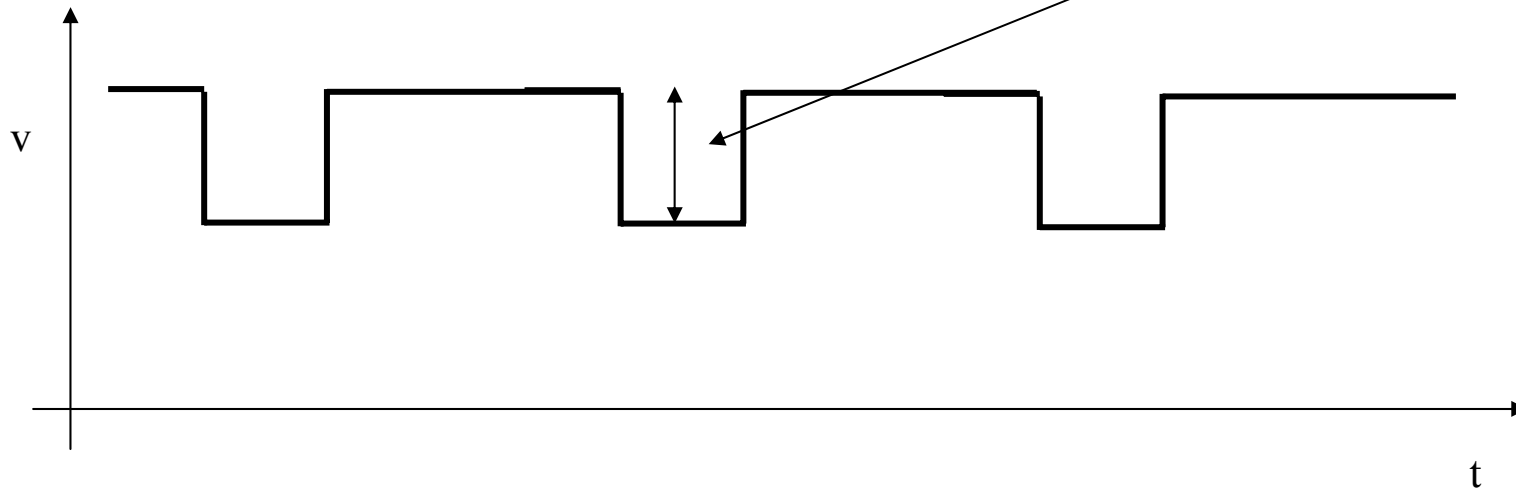


$$R_A = 0.24 \Omega;$$

$$\omega L_A = 0.15 \Omega.$$

Fluttuazioni di tensione - Flicker (norma di riferimento CEI EN 61000-3-3)

Variazioni di tensione periodiche rettangolari di stessa ampiezza “d” e di stessa durata.

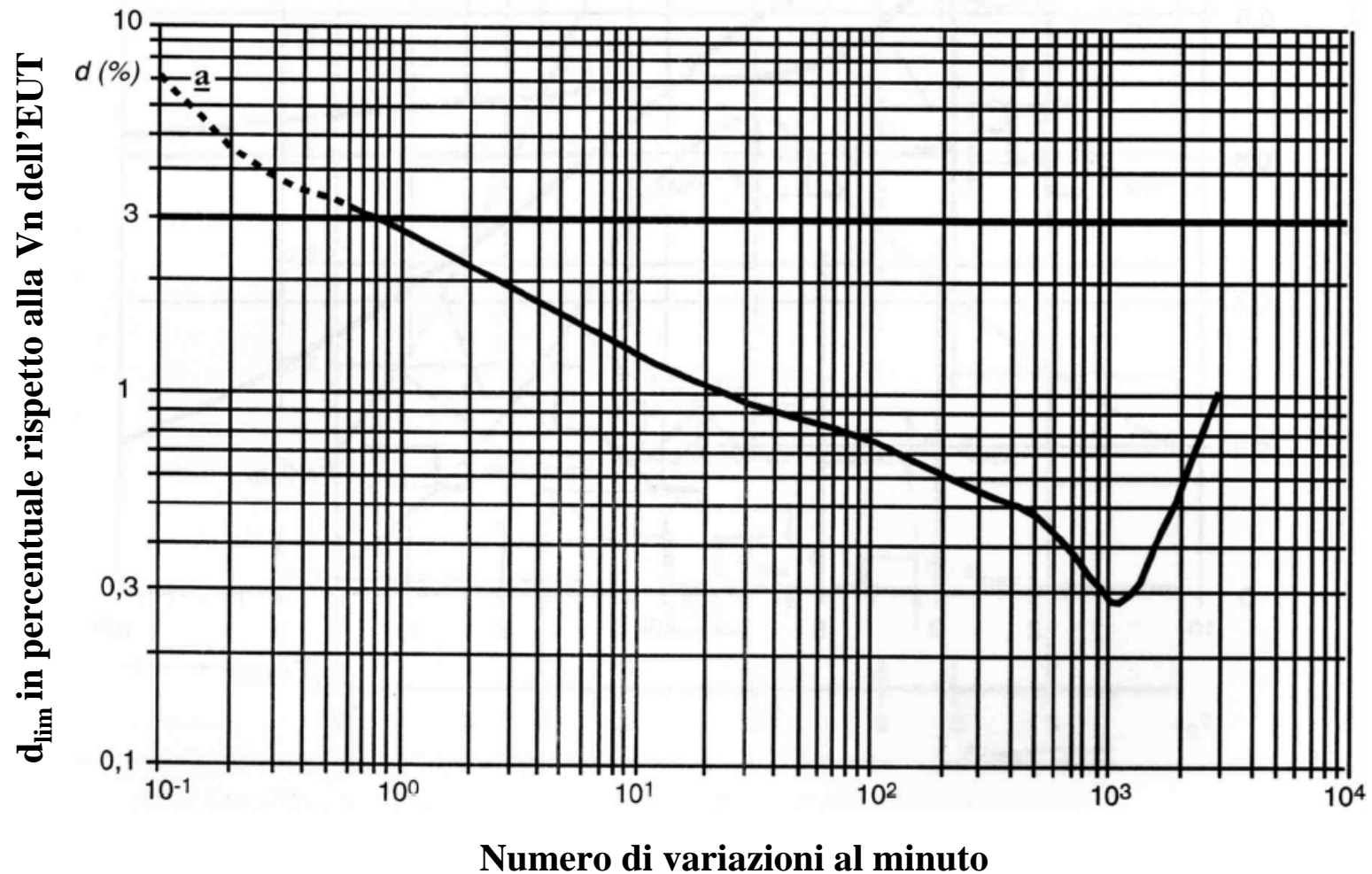


Valutazione del fenomeno di flicker :

- Misura di “d”
- Determinazione del valore d_{lim} dalla curva di riferimento per variazioni di tensione rettangolari ed equidistanti
- Calcolo del parametro P_{st} relativo alla severità del flicker di breve durata (apparecchiature il cui ciclo di funzionamento è inferiore a 30 min) $P_{st} = d/d_{lim}$
- Valutazione: P_{st} deve essere ≤ 1 .

Fluttuazioni di tensione - Flicker (norma di riferimento CEI EN 61000-3-3)

Curva di riferimento per variazioni di tensione rettangolari ed equidistanti

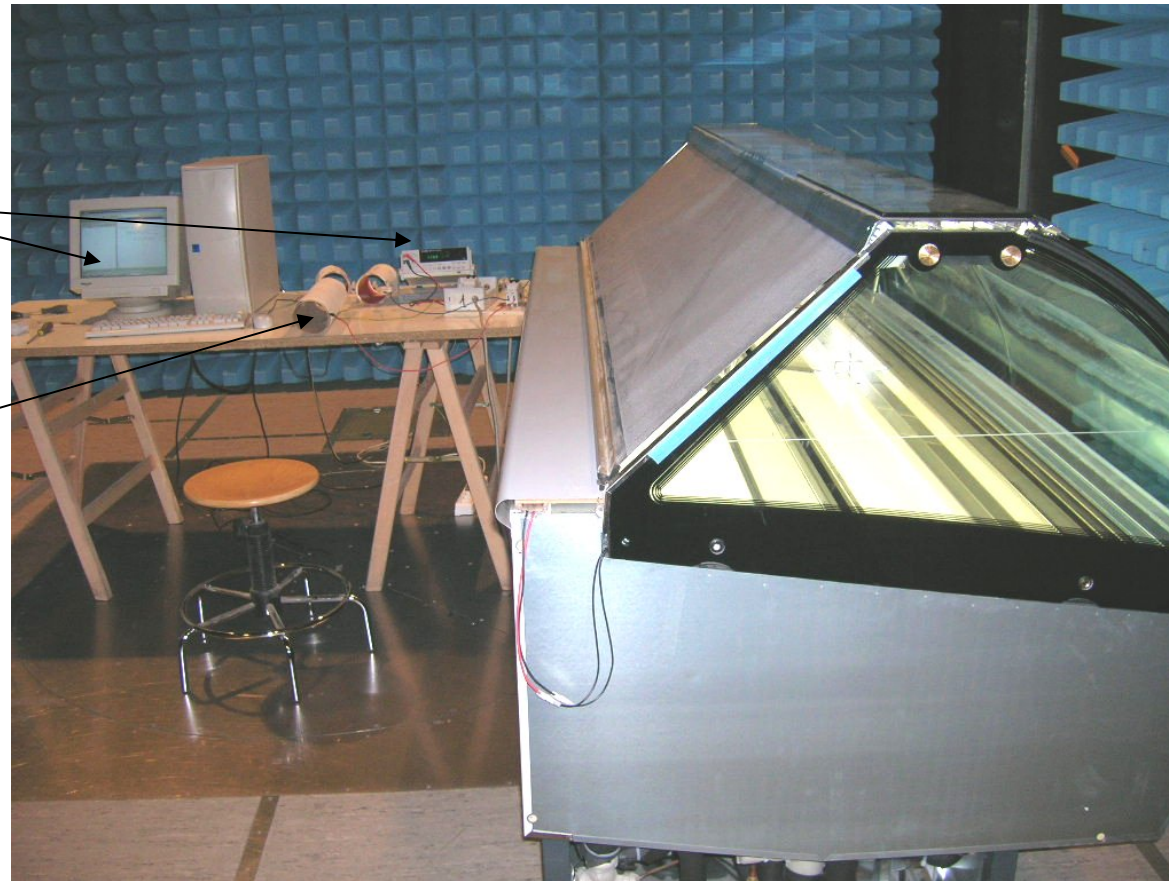


Fluttuazioni di tensione - Flicker (norma di riferimento CEI EN 61000-3-3)

Esempio: Set-up di misura per la rilevazione delle armoniche di corrente prodotte da una vetrina frigo per ambiente commerciale

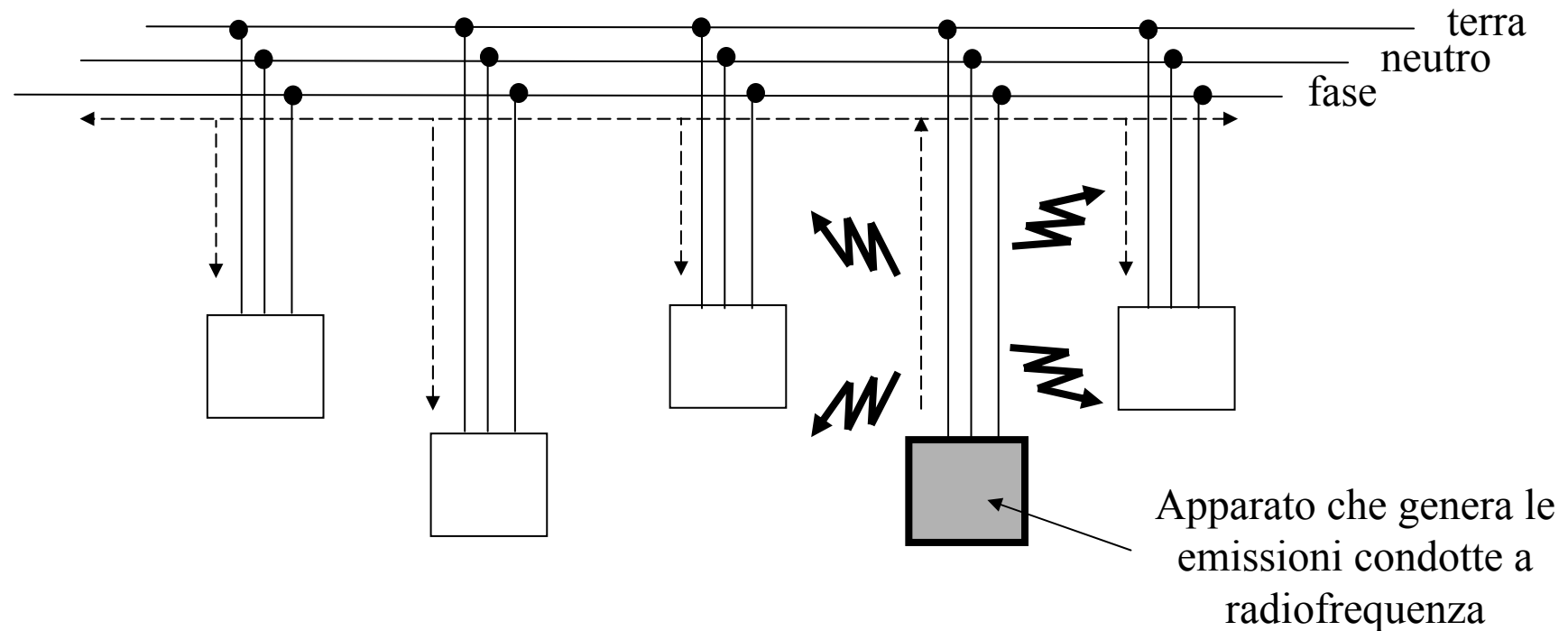
Sistema di
acquisizione ed
elaborazione dati

Rete di
stabilizzazione



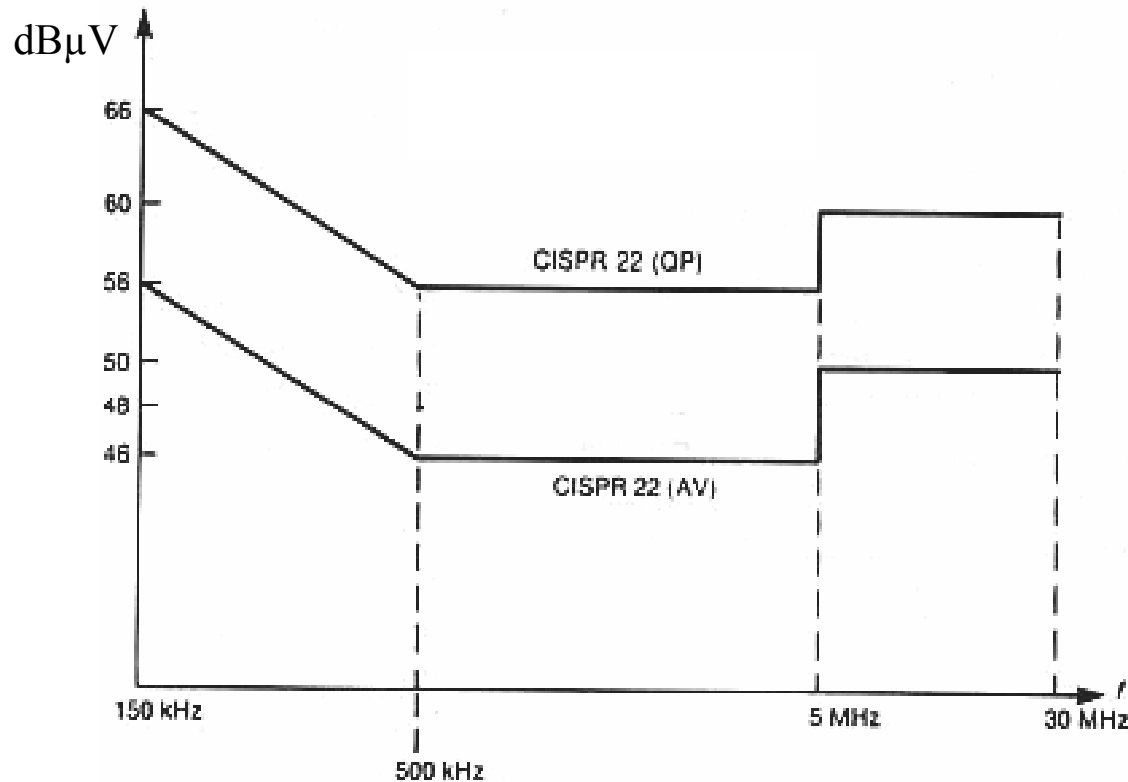
Emissioni condotte a radiofrequenza

Un apparato elettrico può generare delle emissioni condotte a radiofrequenza e veicularle attraverso cavi di alimentazione o cavi di segnale. Altri apparati collegati alla stessa linea di alimentazione dell'apparato inquinante possono essere suscettibili ai disturbi da esso generato ed evidenziare dei malfunzionamenti.



Emissioni condotte a radiofrequenza (norma di riferimento CISPR 22)

Esempio di alcuni tracciati limite della normativa che regola le emissioni condotte a radiofrequenza prodotte da una apparecchiatura elettrica od elettronica utilizzata in ambiente domestico, commerciale o industriale:



Queste emissioni condotte vengono controllate nella banda 150 kHz – 30 MHz

Oltre i 30 MHz i controlli vengono fatti sulle emissioni radiate

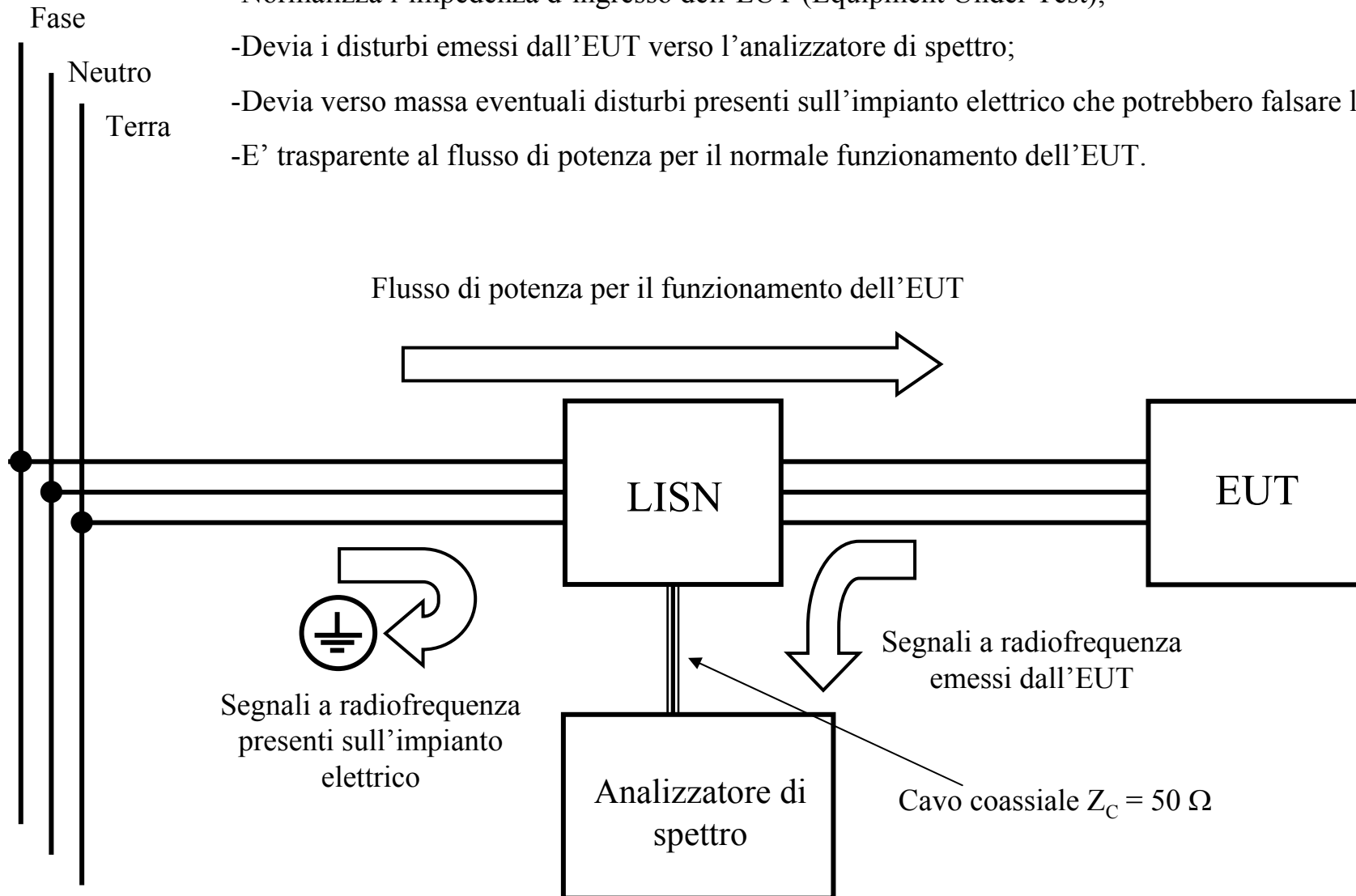
QP (Quasi picco)

AV (Average – valor medio)

Emissioni condotte a radiofrequenza - Rete LISN (norma CEI EN 55022)

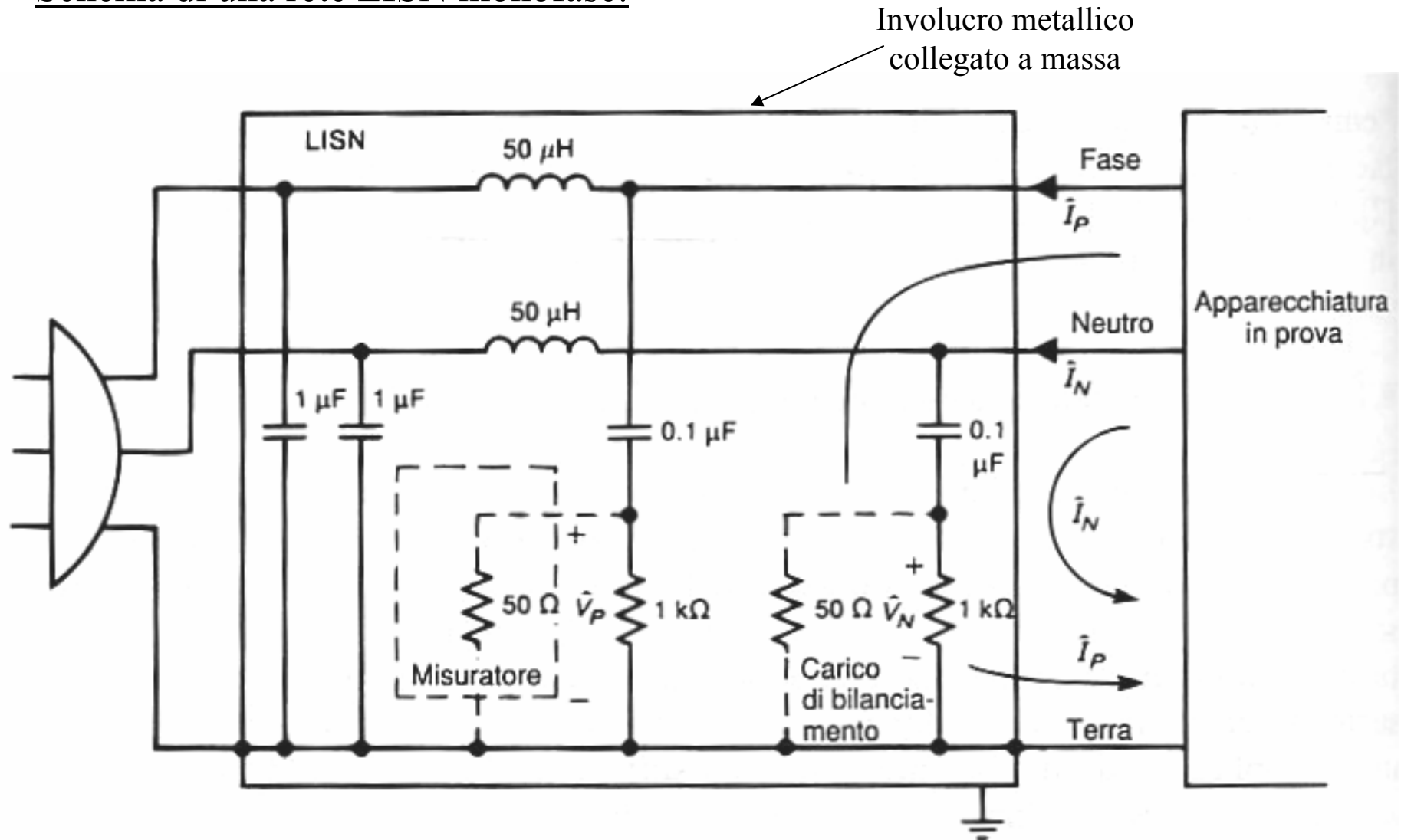
LISN (Line Impedance Stabilization Net):

- Normalizza l'impedenza d'ingresso dell'EUT (Equipment Under Test);
- Devia i disturbi emessi dall'EUT verso l'analizzatore di spettro;
- Devia verso massa eventuali disturbi presenti sull'impianto elettrico che potrebbero falsare la misura;
- E' trasparente al flusso di potenza per il normale funzionamento dell'EUT.



Emissioni condotte a radiofrequenza - Rete LISN (norma CEI EN 55022)

Schema di una rete LISN monofase:



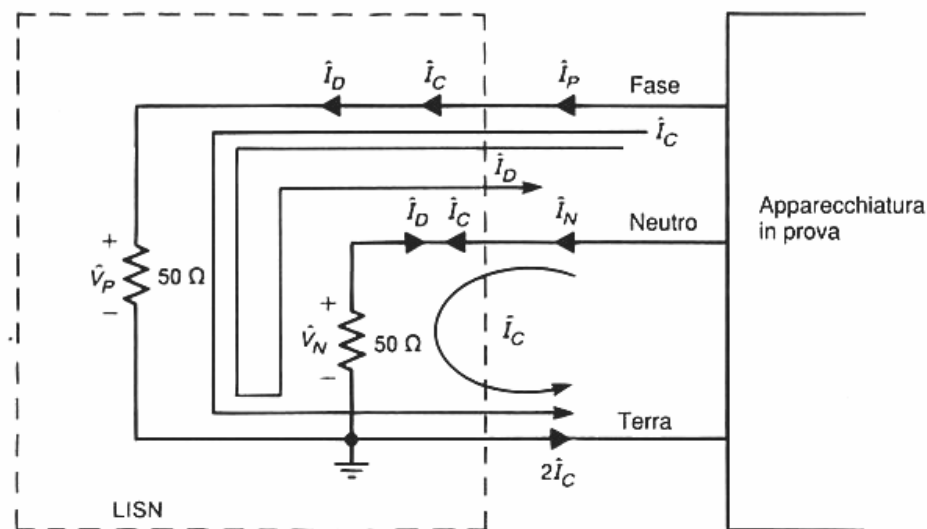
Emissioni condotte a radiofrequenza - Rete LISN (norma di riferimento CISPR 22)

Componente	$Z_{50\text{Hz}}$ [Ω]	$Z_{150\text{kHz}}$ [Ω]	$Z_{30\text{MHz}}$ [Ω]
50 μH	0.015	47	9424
0.1 μF	31830	10.6	0.053
1 μF	318300	1.06	0.0053

Gli induttori lasciano passare le correnti a bassa frequenza i
condensatori quelle ad alta frequenza.

Emissioni condotte a radiofrequenza - Correnti di modo comune e differenziale

In virtù delle proprietà sopra specificate lo schema equivalente della LISN risulta:



Le correnti di disturbo provenienti dall'EUT sono di due tipi I_C correnti di modo comune e I_D correnti di modo differenziale. Le correnti di modo comune si richiudono all'interno dell'apparecchiatura attraverso delle capacità parassite presenti tra i componenti a massa e le parti attive. Le correnti di modo differenziale si richiudono attraverso le parti attive. Le correnti di modo comune sono più fastidiose perché responsabili anche di emissioni radiate.

Emissioni condotte a radiofrequenza

Esempio: Set-up di misura per la rilevazione delle emissioni condotte 150 kHz – 30 MHz prodotte da una vetrina frigo per ambiente commerciale.

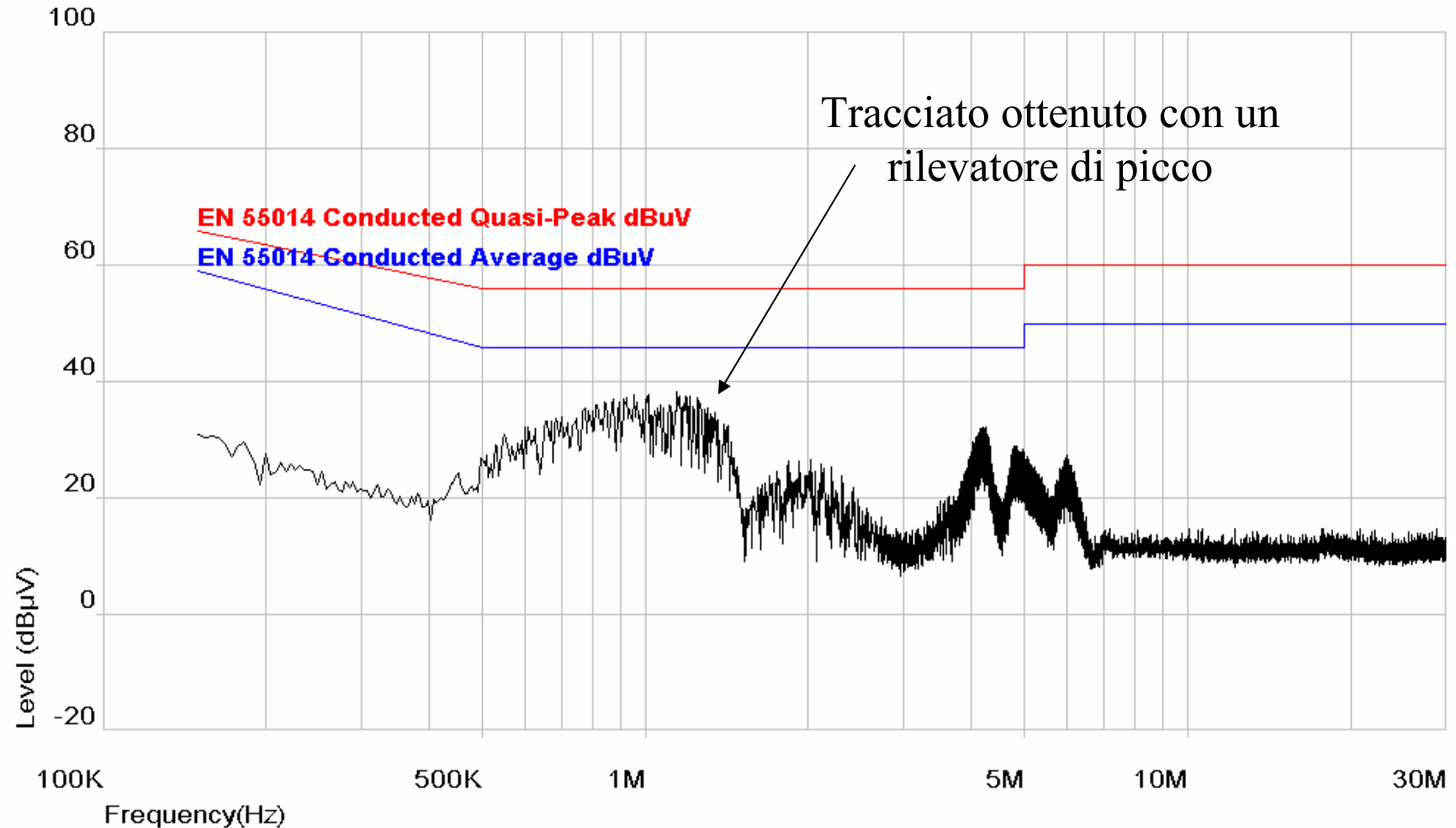
Rete LISN

Cavo coassiale di collegamento tra LISN e Analizzatore di Spettro



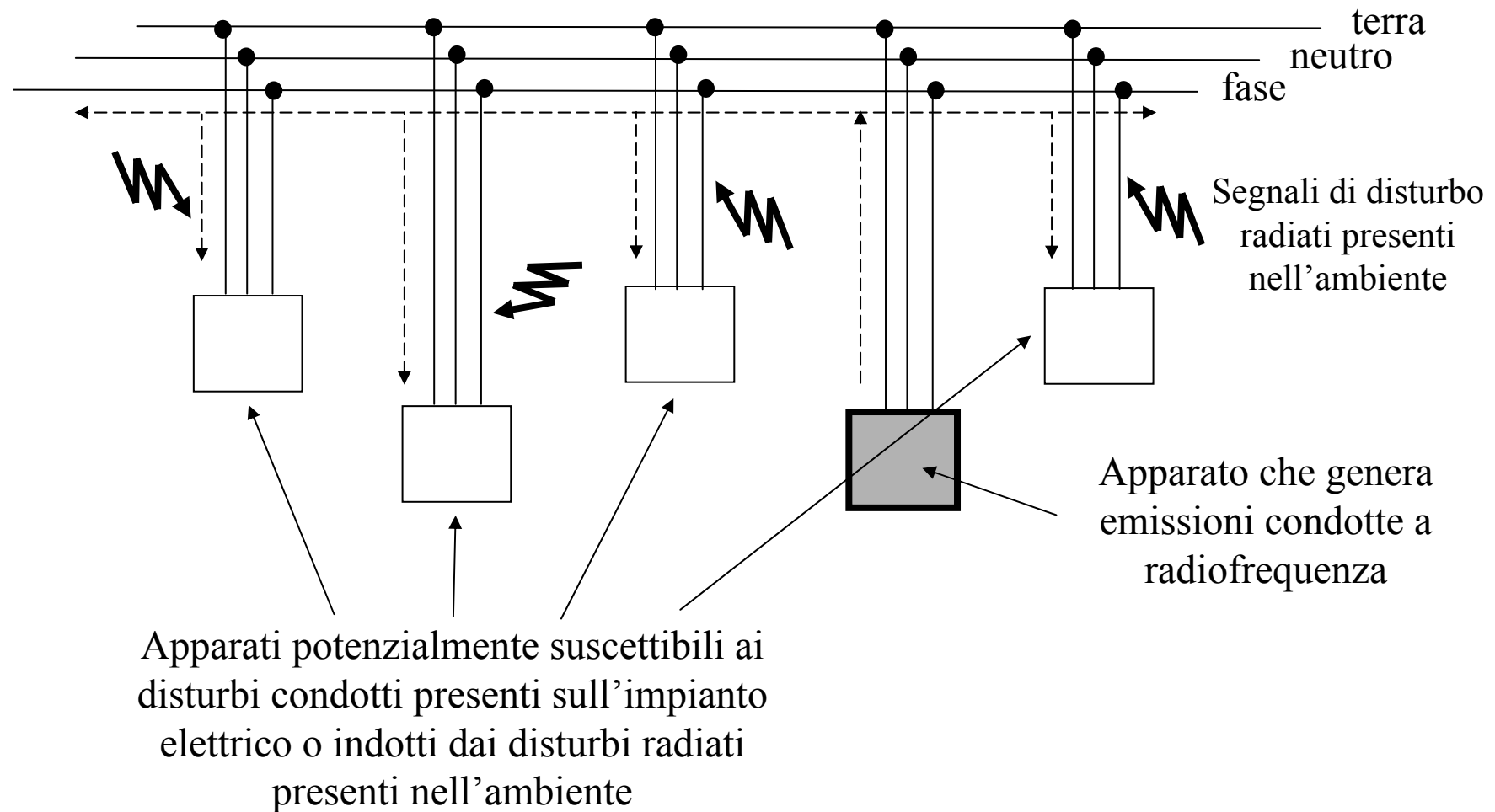
Emissioni condotte a radiofrequenza

Esempio: emissione condotta 150 kHz – 30 MHz prodotta da una vetrina frigo per ambienti commerciali.



Suscettibilità condotta a radiofrequenza, reti CDN

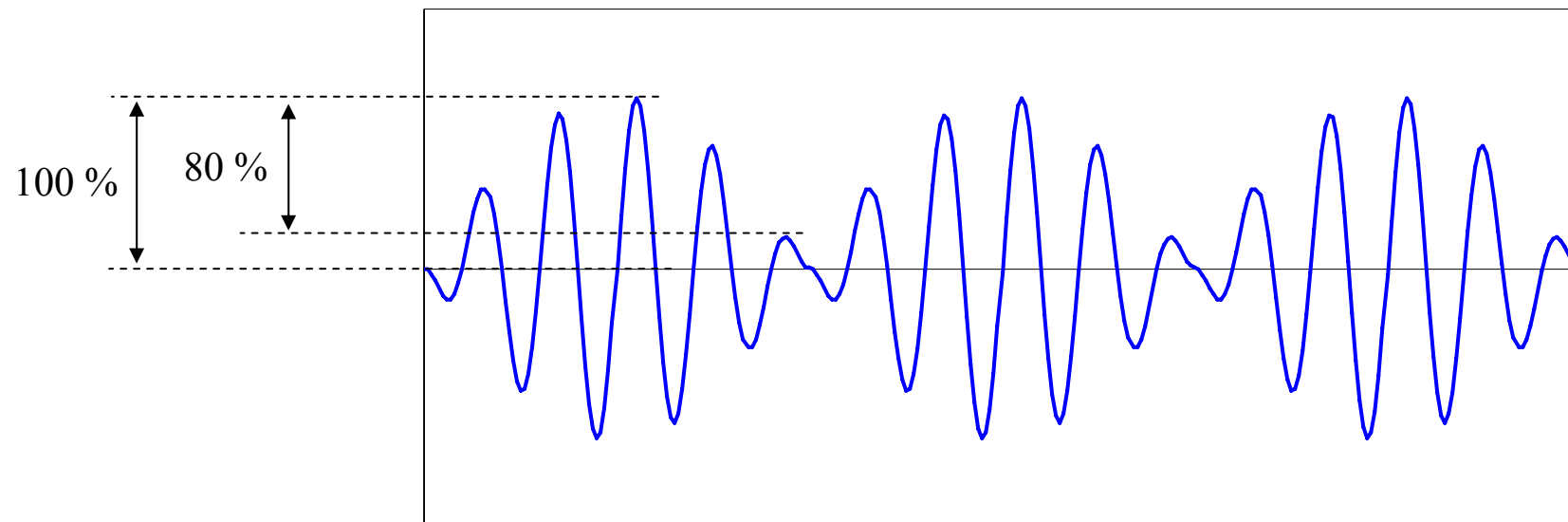
Un apparato elettrico può essere suscettibile a disturbi condotti presenti sulla linea di alimentazione dove è collegato.



Suscettibilità condotta a radiofrequenza, reti CDN (CEI EN 61000 - 4 - 6)

Esempio di un tipo di segnale di disturbo indicato dalle normative che regolano le prove di suscettibilità condotta a radiofrequenza per apparecchiature utilizzate in ambiente domestico, commerciale e industriale.

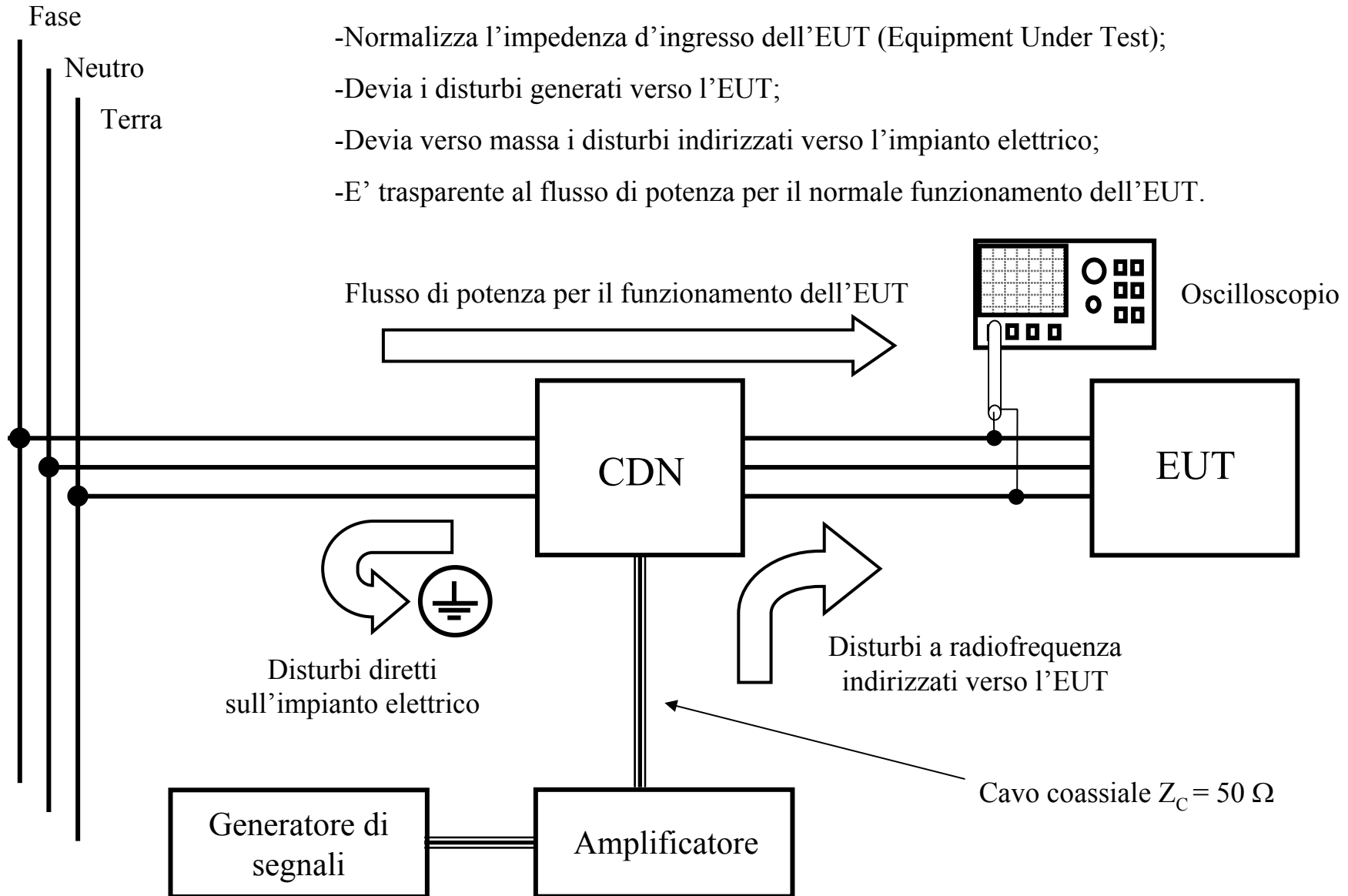
- Segnale sinusoidale modulato in ampiezza (AM)
- Modulazione 80 %;
- Modulante 1 kHz;
- Portante 150 kHz – 80 MHz;
- Ampiezza portante senza modulazione 3 V o 10 V.
- Modo comune.



Suscettibilità condotta a radiofrequenza, reti CDN (CEI EN 61000 - 4 - 6)

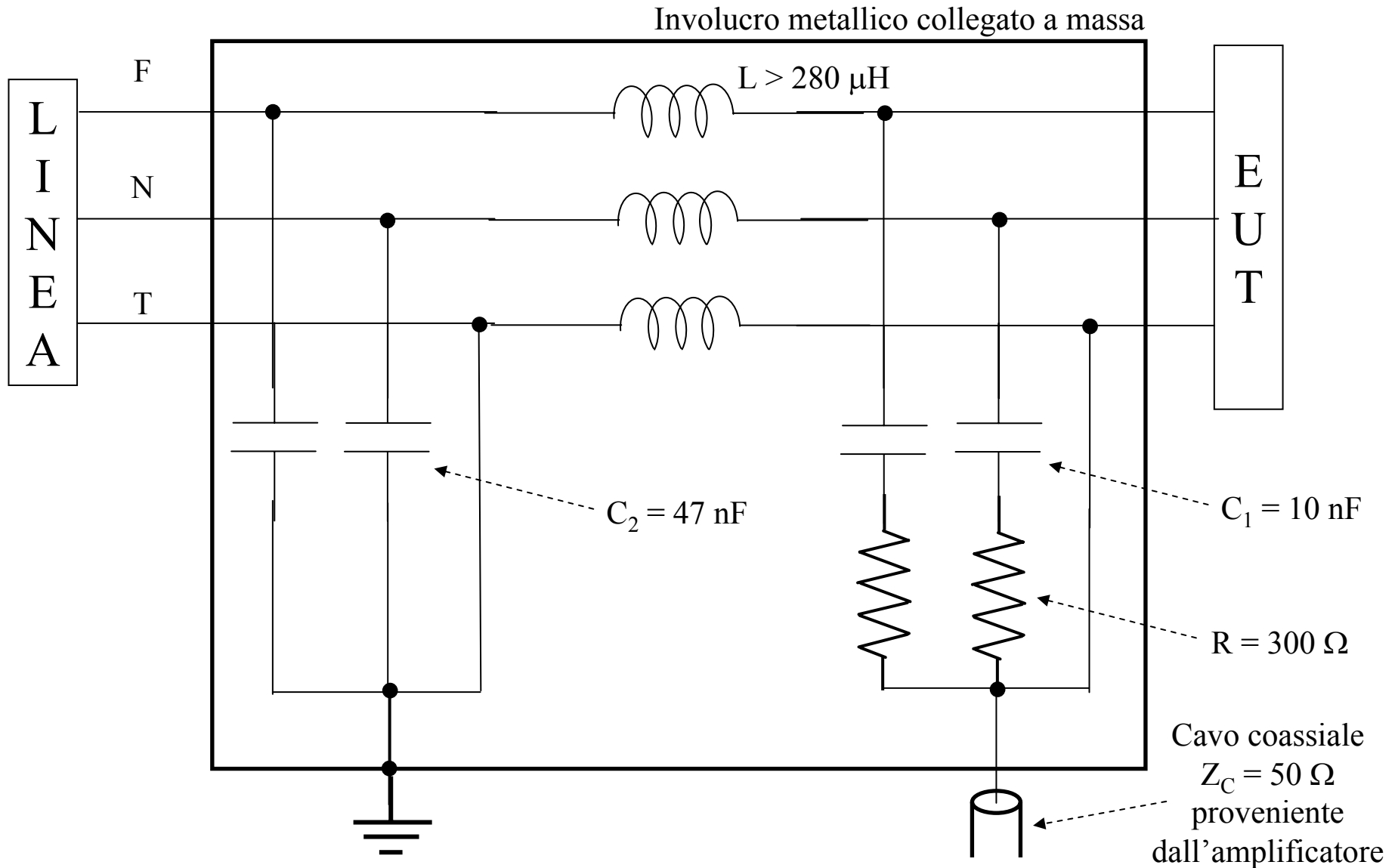
CDN:

- Normalizza l'impedenza d'ingresso dell'EUT (Equipment Under Test);
- Devia i disturbi generati verso l'EUT;
- Devia verso massa i disturbi indirizzati verso l'impianto elettrico;
- E' trasparente al flusso di potenza per il normale funzionamento dell'EUT.



Suscettibilità condotta a radiofrequenza, reti CDN (CEI EN 61000 - 4 - 6)

Schema di una rete CDN monofase:



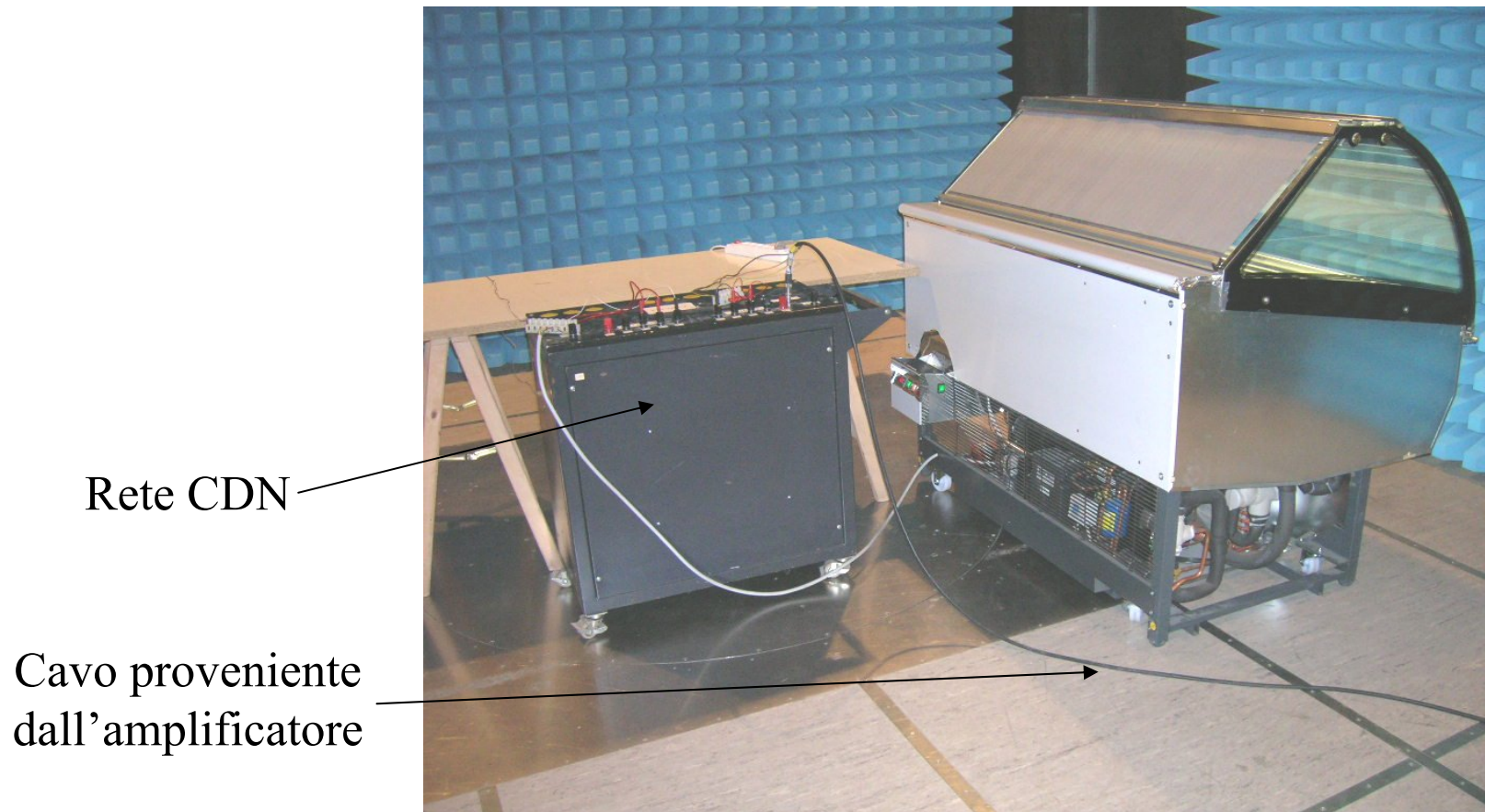
Suscettibilità condotta a radiofrequenza, reti CDN (CEI EN 61000 - 4 - 6)

Componente	$Z_{50\text{Hz}}$ [Ω]	$Z_{150\text{kHz}}$ [Ω]	$Z_{80\text{MHz}}$ [Ω]
280 μH	0.065	264	140743
10 nF	318309	106	0.19
47 nF	67725	22.5	0.042

Gli induttori lasciano passare le correnti a bassa frequenza i condensatori quelle ad alta frequenza.

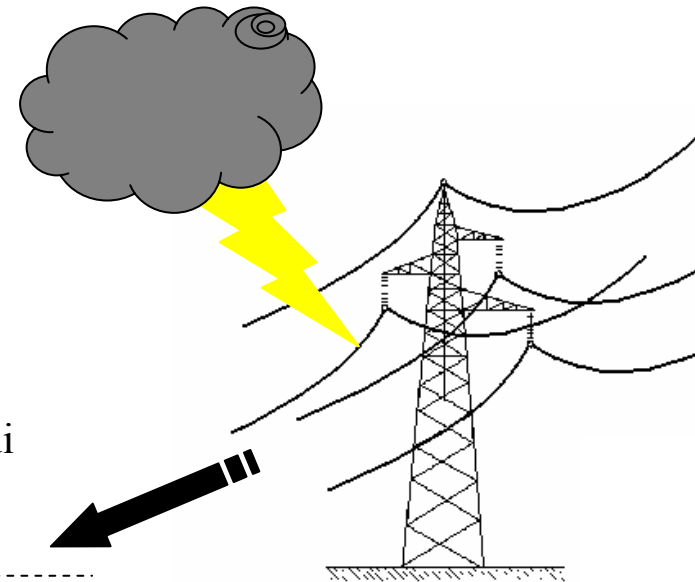
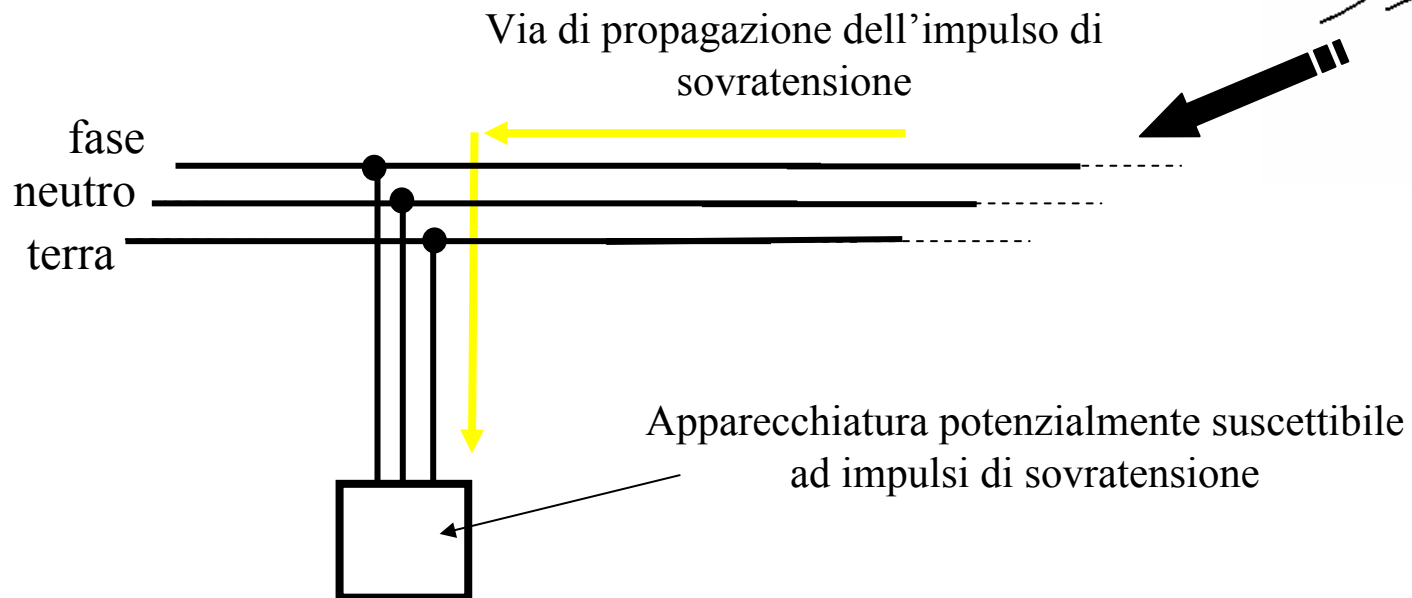
Suscettibilità condotta a radiofrequenza, reti CDN (CEI EN 61000 - 4 - 6)

Esempio: Set-up di misura per la verifica della suscettibilità condotta 150 kHz – 80 MHz su una vetrina frigo per ambiente commerciale.



Suscettibilità condotta, impulsi di sovratensione SURGE (CEI EN 61000 - 4 - 5)

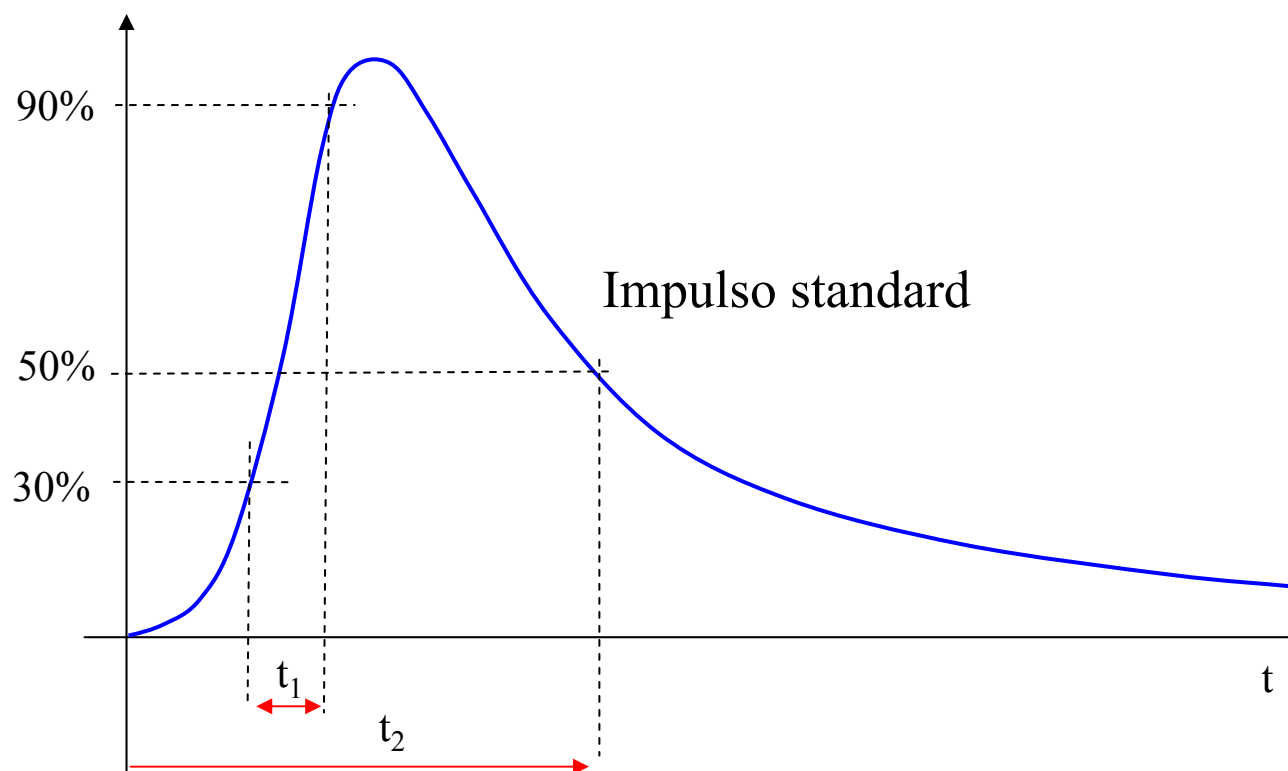
In presenza di scariche atmosferiche che agiscono direttamente o per induzione su di una linea aerea di distribuzione dell'energia elettrica, le utenze ad essa collegate possono risultare suscettibili all'impulso di sovratensione che ne deriva.



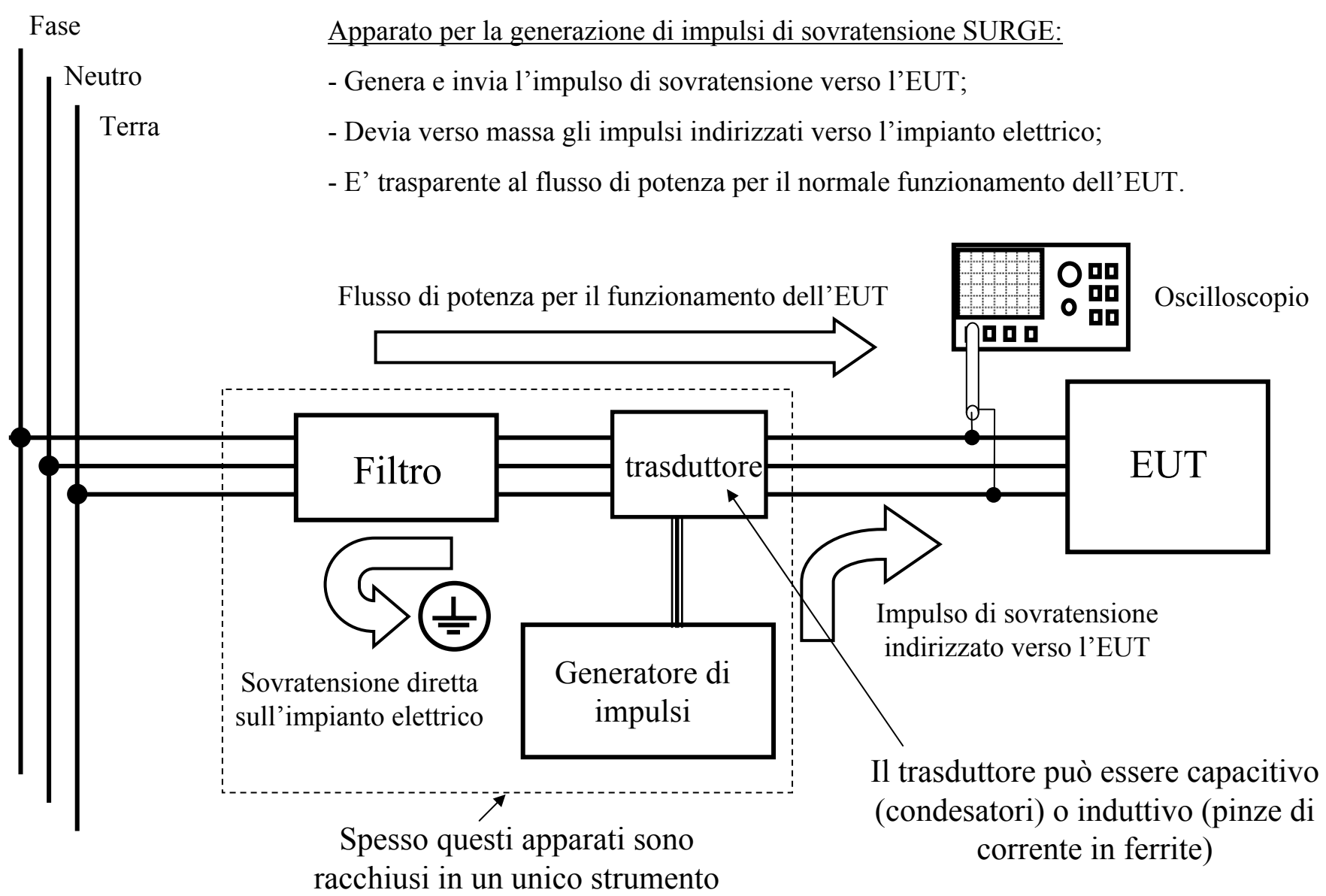
Suscettibilità condotta, impulsi di sovratensione SURGE (CEI EN 61000 - 4 - 5)

Le apparecchiature elettriche utilizzate in ambiente domestico, commerciale ed industriale vengono sottoposte a degli impulsi di sovratensione standard per verificare la loro suscettibilità:

- $t_1 = 1.2 \mu\text{s}$
- $t_2 = 50 \mu\text{s}$
- $V_{\text{picco}} = 1 \div 2 \text{ kV}$.
- Tempo di ripetizione = 30 s.

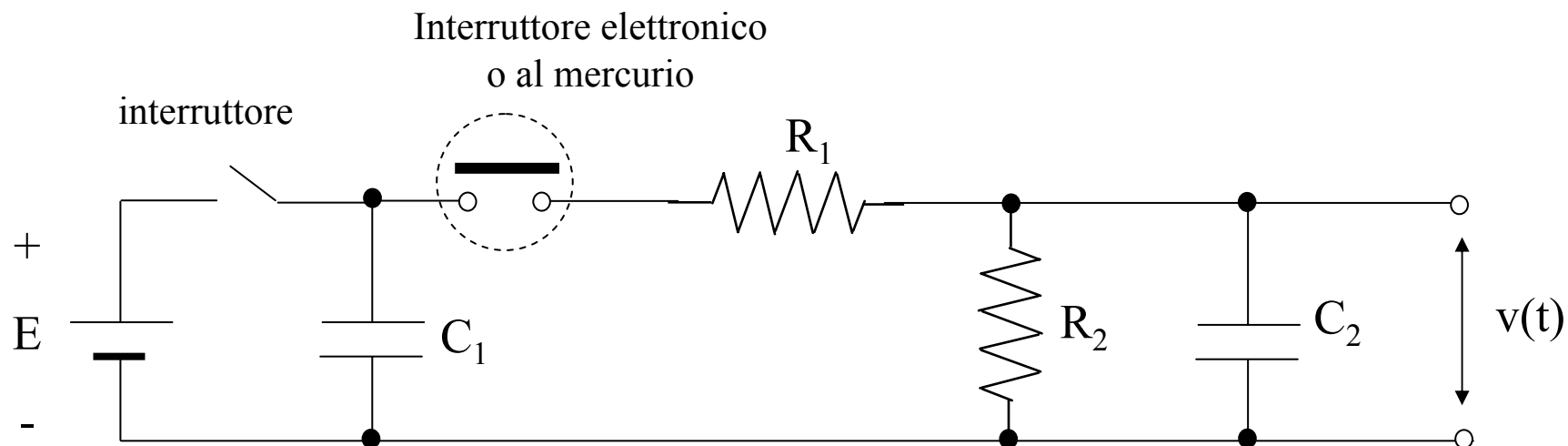


Suscettibilità condotta, impulsi di sovratensione SURGE (CEI EN 61000 - 4 - 5)



Susceptibilità condotta, impulsi di sovratensione SURGE (CEI EN 61000 - 4 - 5)

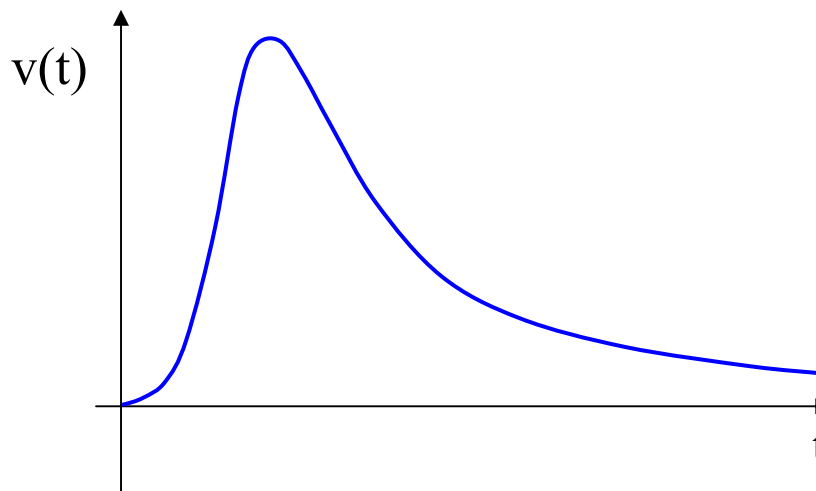
Esempio di un possibile schema per la generazione di impulsi di sovratensione standard:



$$v(t) = \frac{E}{R_1 C_2 (\beta - \alpha)} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

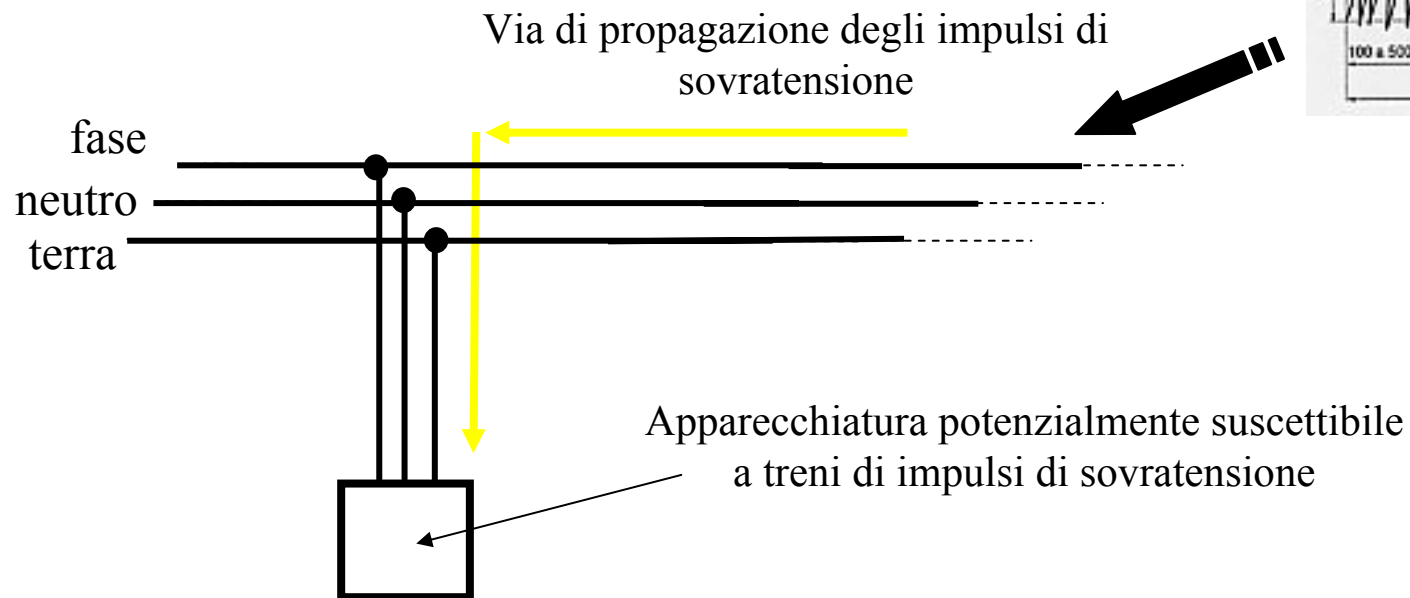
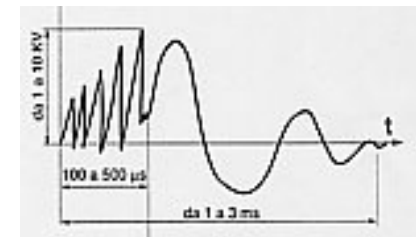
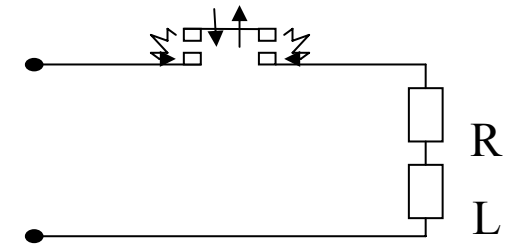
$$\frac{1}{\beta} = \tau_f = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\frac{1}{\alpha} = \tau_c = R_2 (C_1 + C_2)$$



Suscettibilità condotta, treni di impulsi BURST (CEI EN 61000 - 4 - 4)

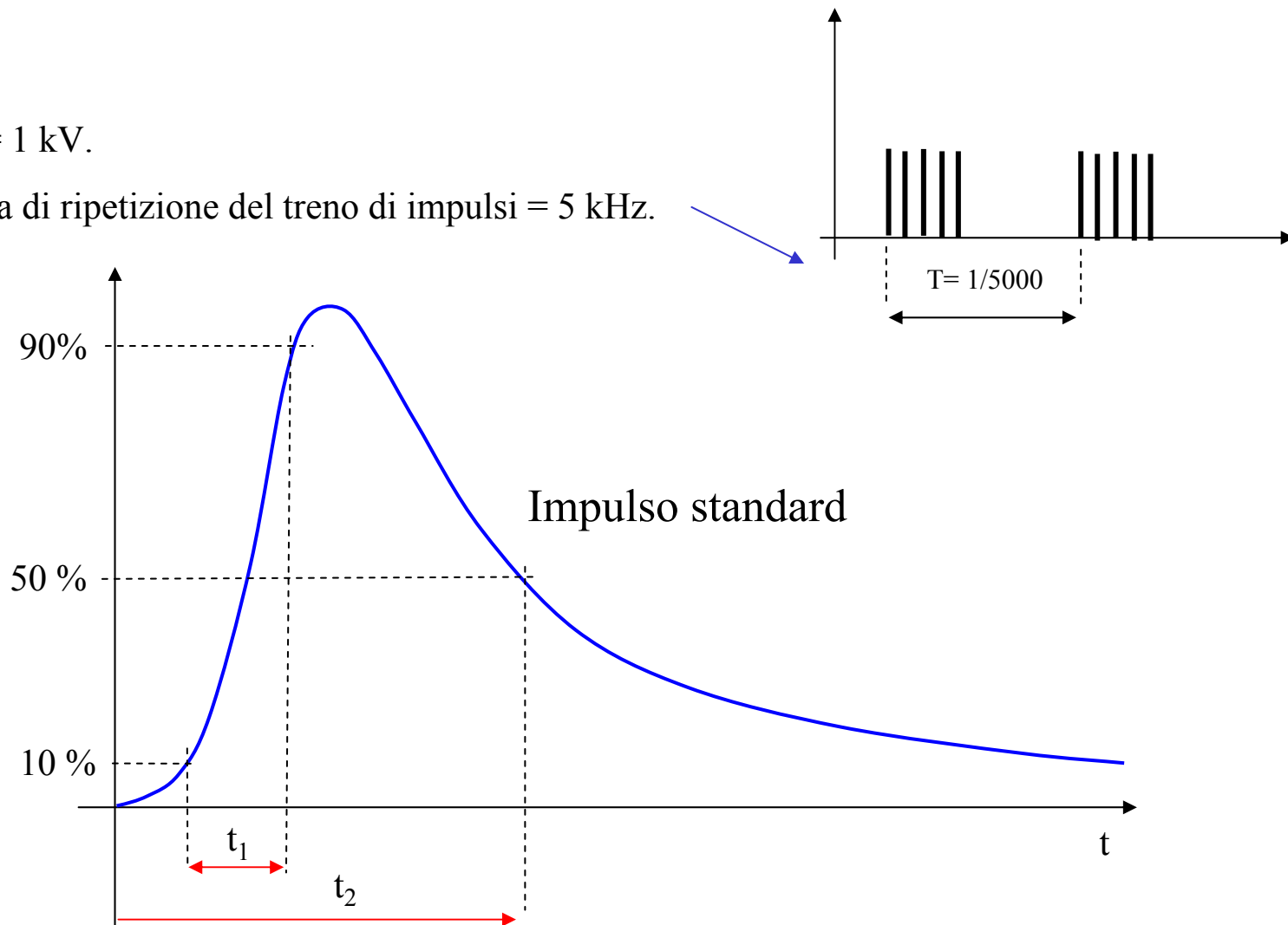
La commutazione di carichi induttivi produce treni di impulsi di sovratensione che si propagano sull'impianto elettrico.



Suscettibilità condotta, treni di impulsi BURST (CEI EN 61000 - 4 - 4)

Le apparecchiature elettriche utilizzate in ambiente domestico, commerciale ed industriale vengono sottoposte a treni di impulsi di sovratensione standard per verificare la loro suscettibilità:

- $t_1 = 5 \text{ ns}$
- $t_2 = 50 \text{ ns}$
- $V \text{ picco} = 1 \text{ kV}$.
- Frequenza di ripetizione del treno di impulsi = 5 kHz .



Suscettibilità condotta, treni di impulsi BURST (CEI EN 61000 - 4 - 4)

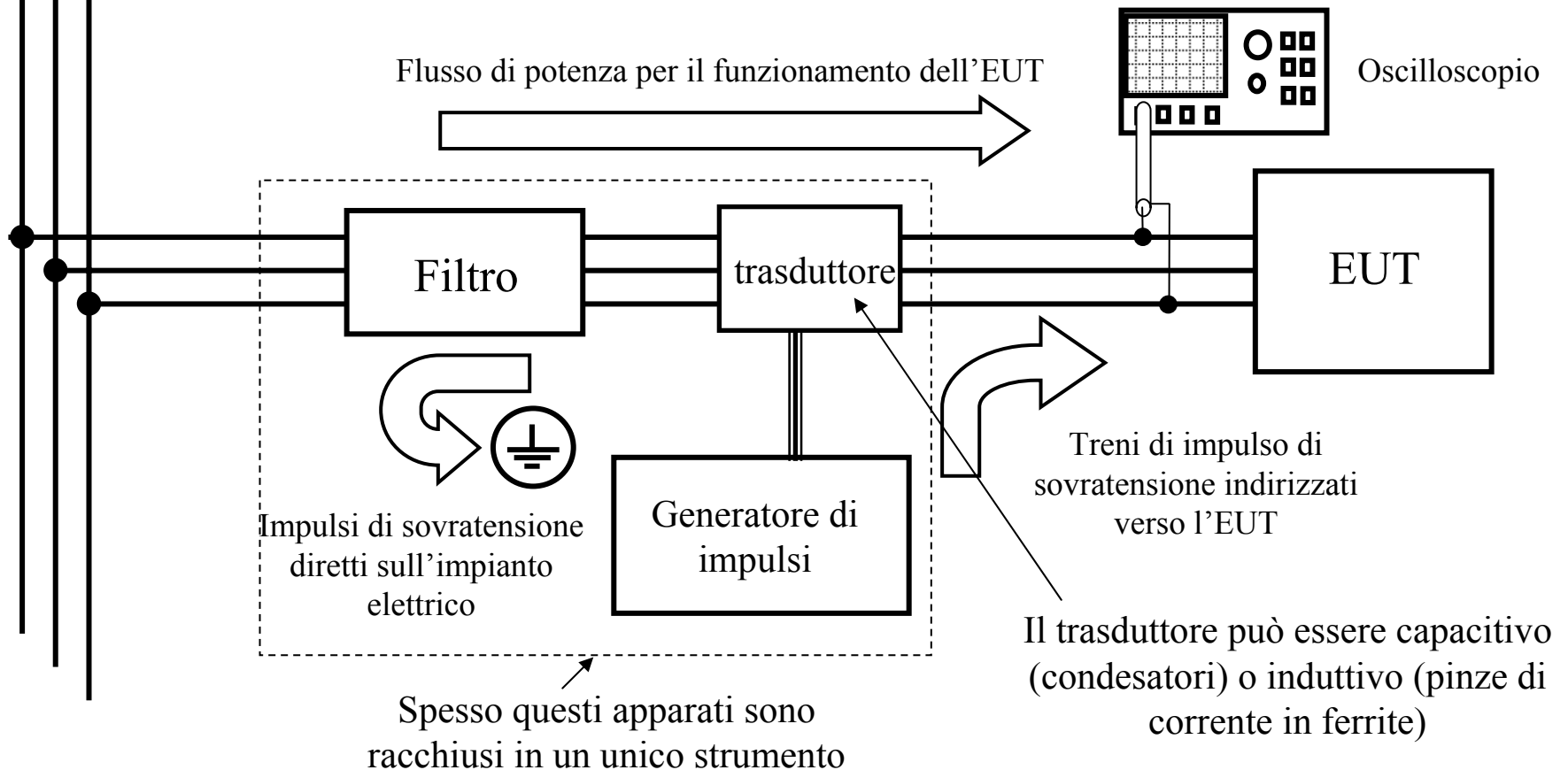
Fase

Neutro

Terra

Apparato per la generazione di treni di impulsi di sovratensione BURST:

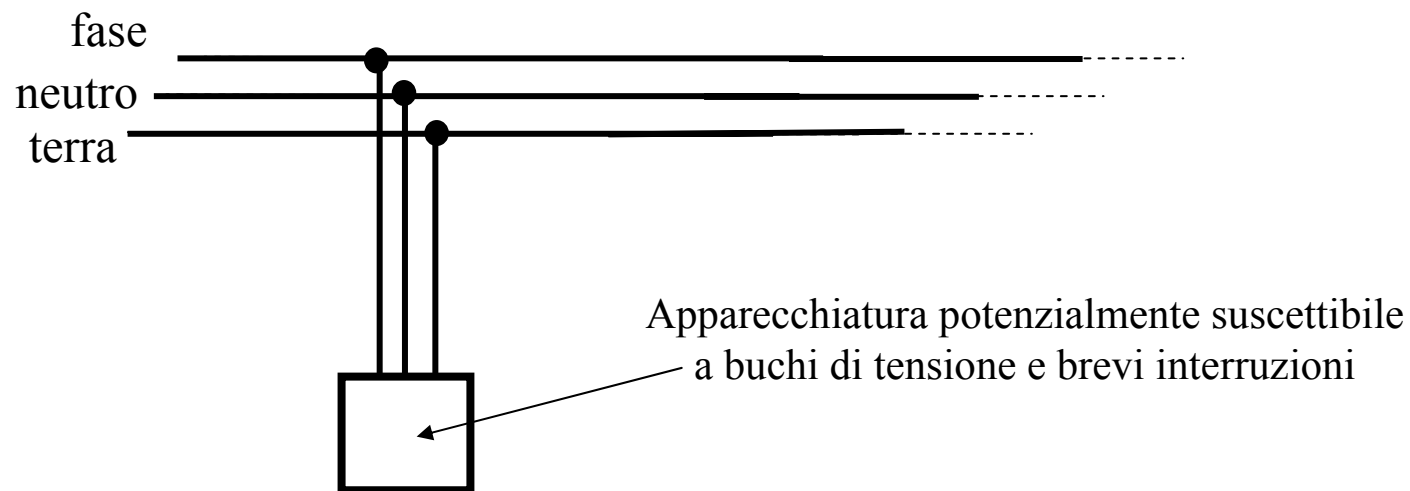
- Genera e invia i treni di impulsi verso l'EUT;
- Devia verso massa i treni di impulsi indirizzati verso l'impianto elettrico;
- E' trasparente al flusso di potenza per il normale funzionamento dell'EUT.



Suscettibilità a buchi di tensione e brevi interruzioni (CEI EN 61000 - 4 - 11)

L'attivazione di grossi carichi può determinare forti correnti che sulla linea di distribuzione BT provocano cadute di tensione di varia durata e entità.

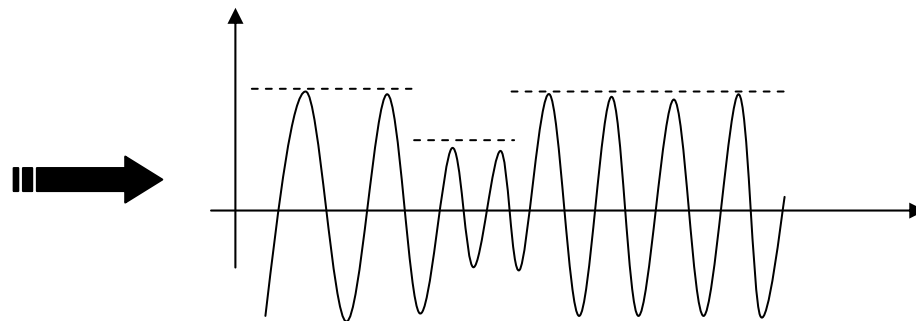
L'intervento di sistemi di protezione sulle linee e la loro automatica riattivazione possono provocare brevi interruzioni della tensione.



Suscettibilità a buchi di tensione e brevi interruzioni (CEI EN 61000 - 4 - 11)

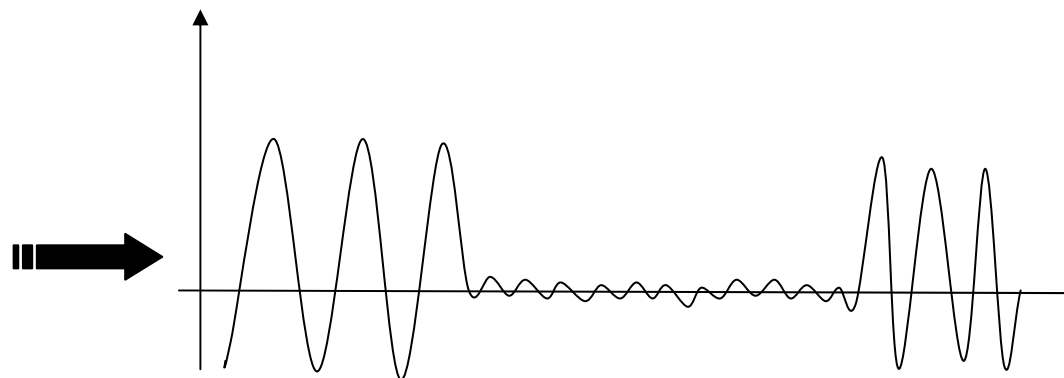
Buchi di tensione:

- Riduzione della tensione del 30% per 10 ms
- Riduzione della tensione del 60 % per 100 ms

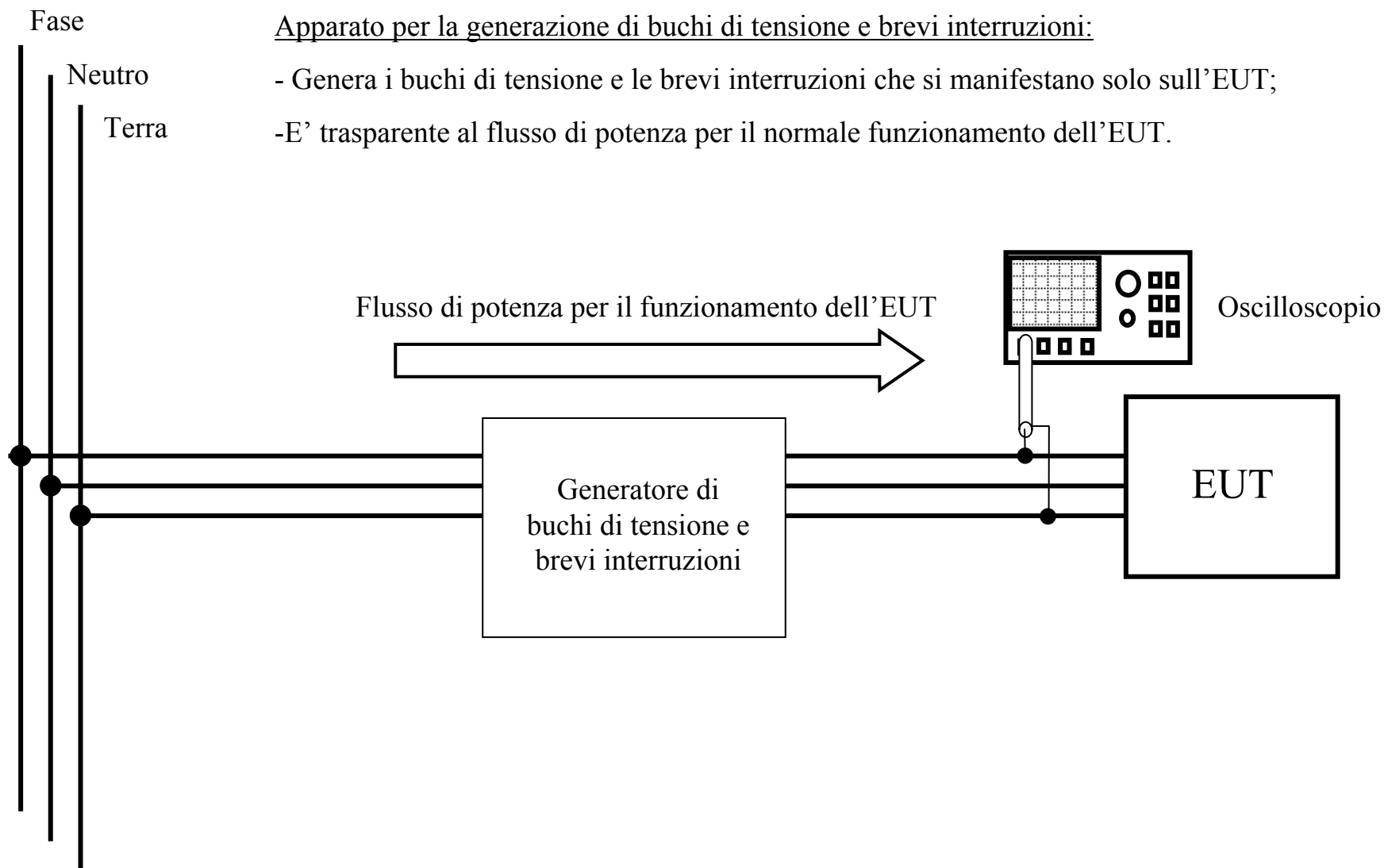


Brevi interruzioni:

- Riduzione di tensione maggiore del 95% per 5 secondi



Suscettibilità a buchi di tensione e brevi interruzioni (CEI EN 61000 - 4 - 11)

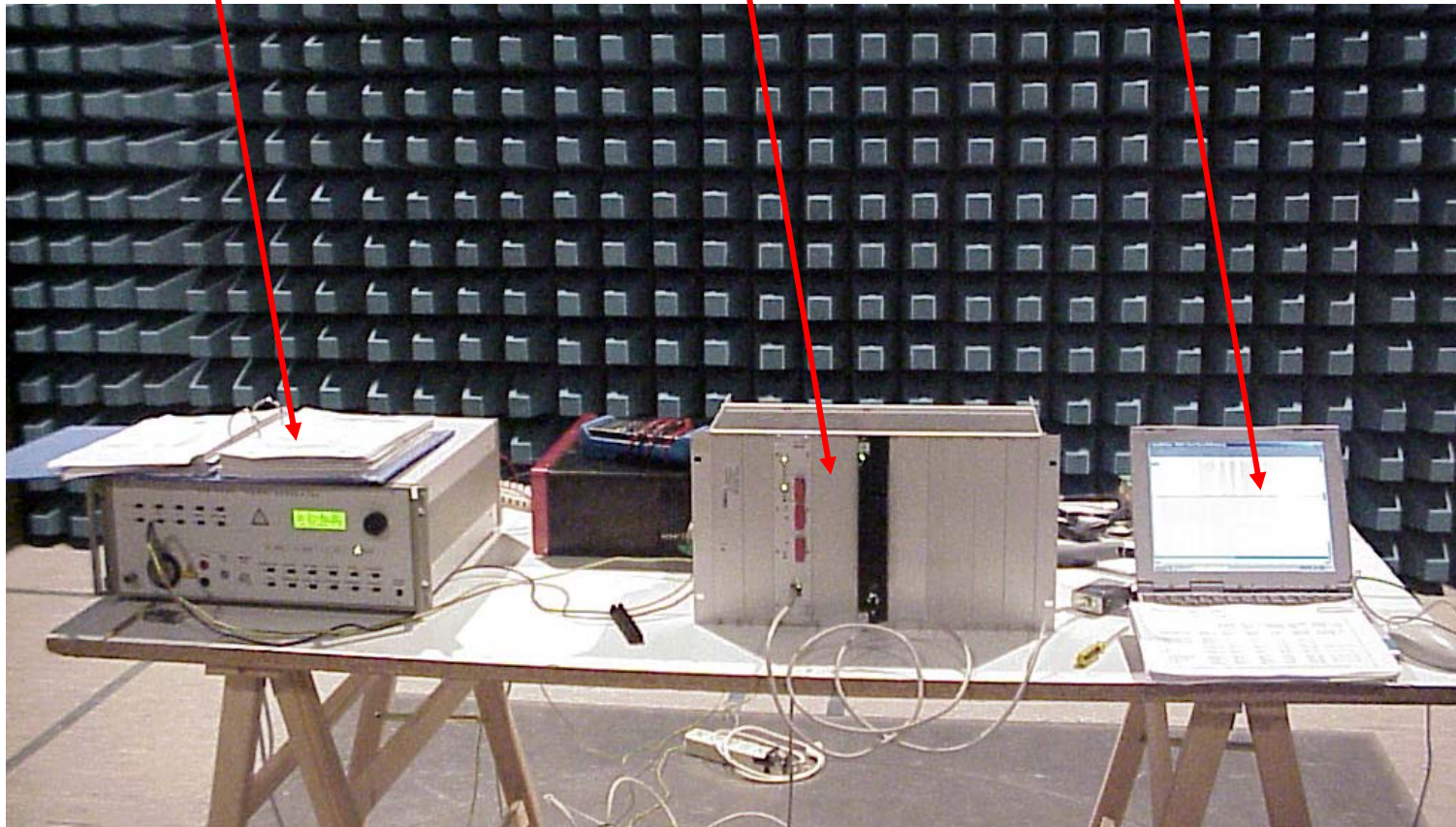


Set-up di misura per la verifica della suscettibilità a fenomeni di Surge, Burst, buchi di tensione e brevi interruzioni.

Generatore compatto di Surge
burst interruzioni di rete

EUT

Sistema per la verifica della
suscettibilità



Filtri per la riduzione dei fenomeni di emissione e suscettibilità condotta

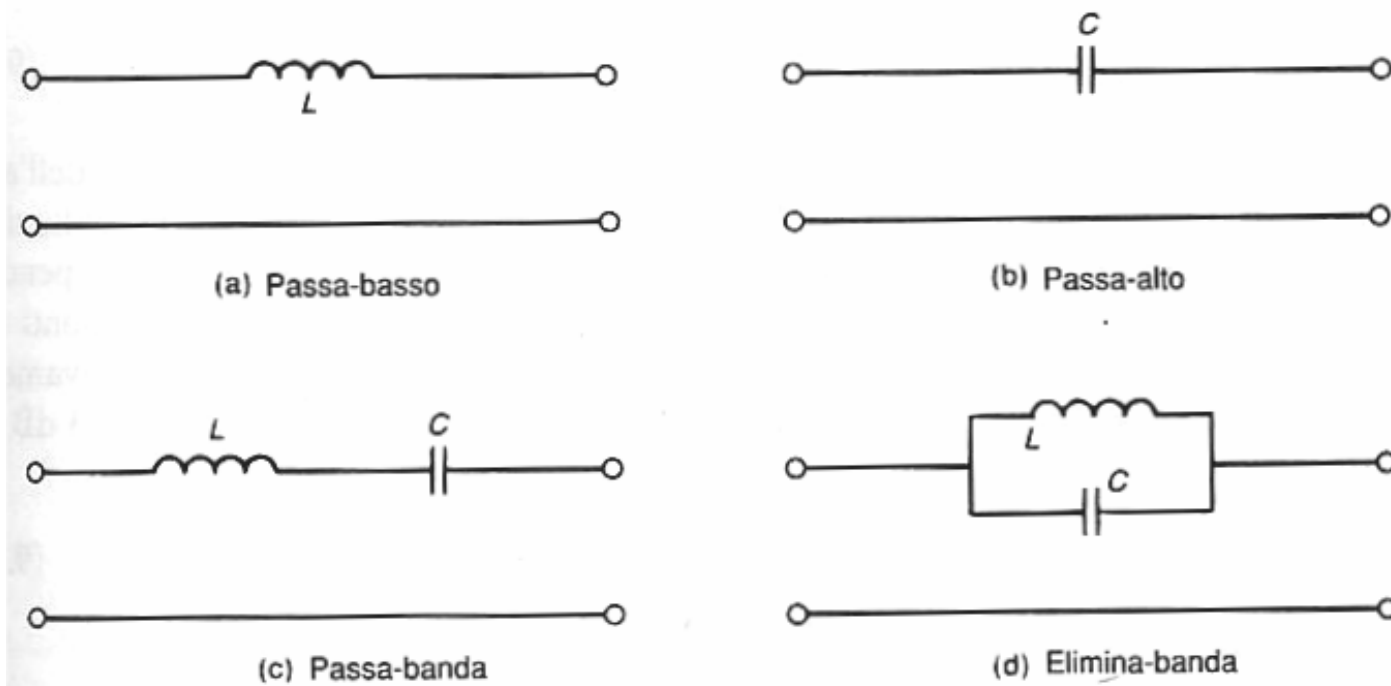
Segnale in ingresso
con un determinato
spettro in frequenza



Filtro
passivo

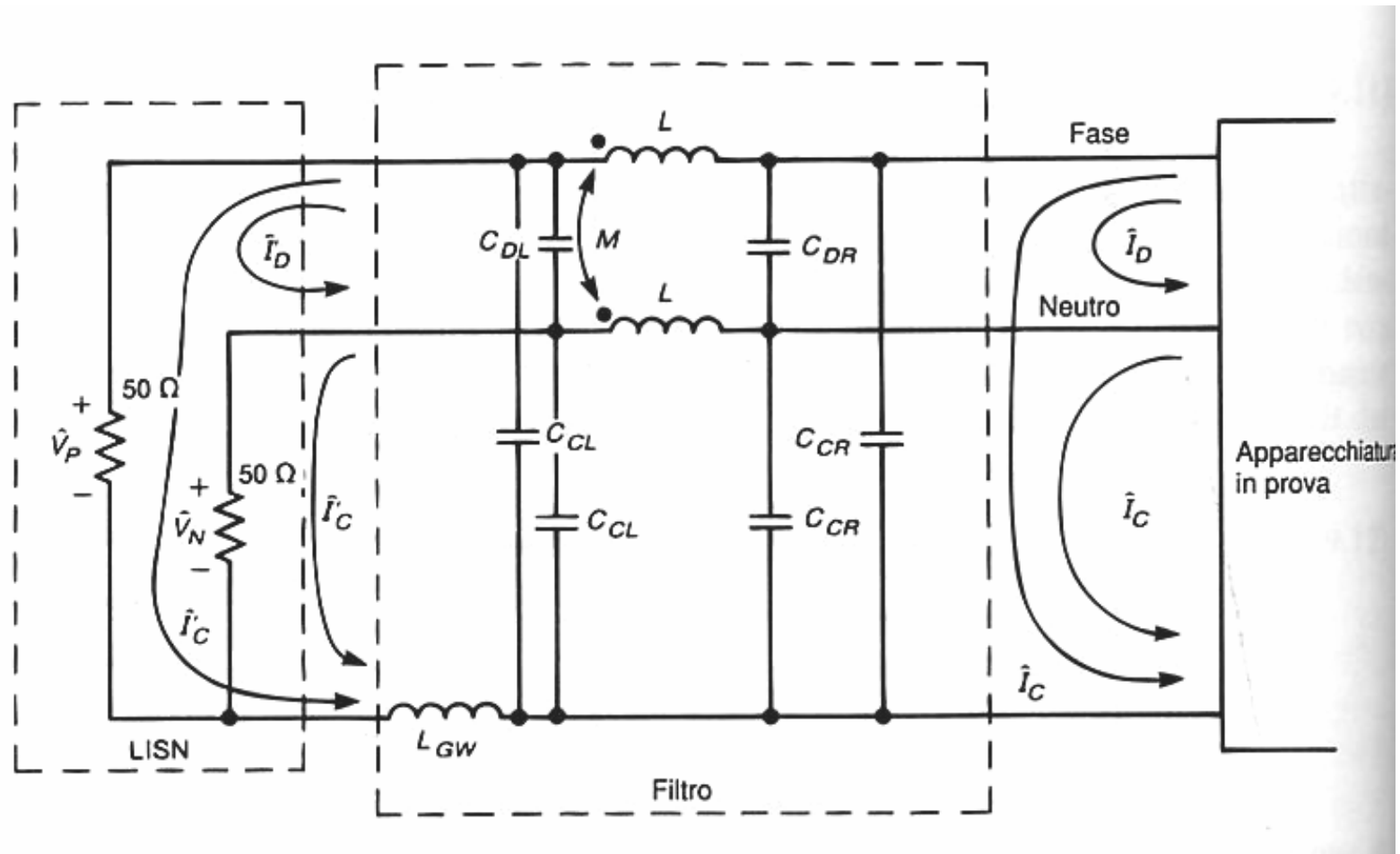


Segnale in uscita con
spettro in frequenza
modificato



Filtri per la riduzione dei fenomeni di emissione e suscettibilità condotta

Filtro di alimentazione per disturbi a radiofrequenza:



V_P e V_N tensioni di disturbo rilevate sulla fase e sul neutro attraverso la rete LISN

Ferriti

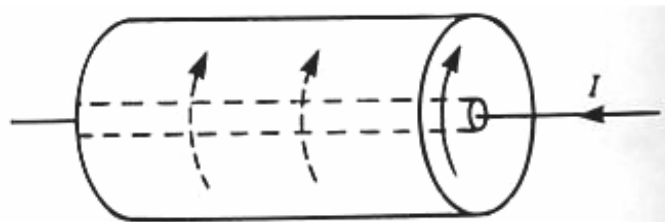
- Materiali ferromagnetici, ceramici, non conduttori.
- Impiegate per: attenuare le componenti di disturbo a elevata frequenza; lasciare inalterate le componenti a frequenza più basse del segnale.

- Modi di impiego:

1) Anello posto all'esterno di un tratto di conduttore e messo in serie a un filo;

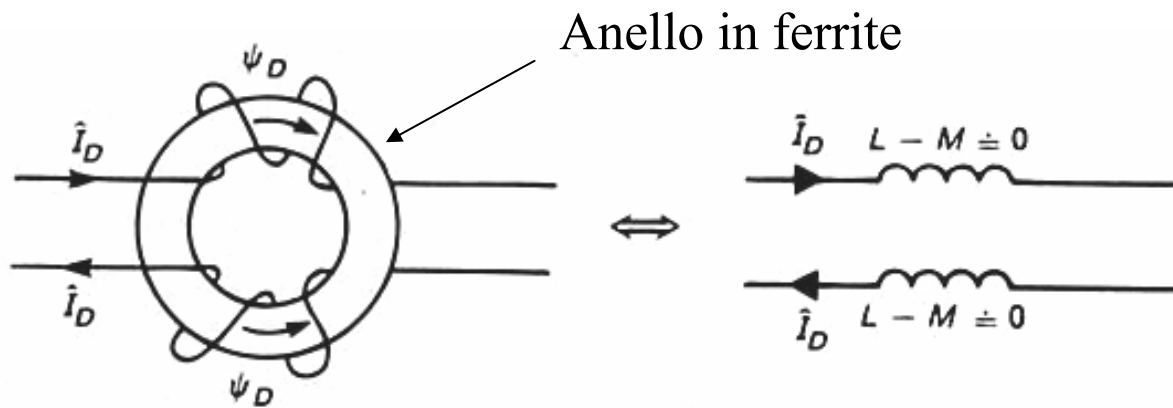
costituisce un'impedenza di tipo serie per le alte frequenze;

problema: agisce allo stesso modo per le componenti di modo comune e di modo differenziale (le I_D ad alta freq. possono essere essenziali al funzionamento dello strumento, mentre le I_c non sono funzionali ed emettono anche disturbi radiati)

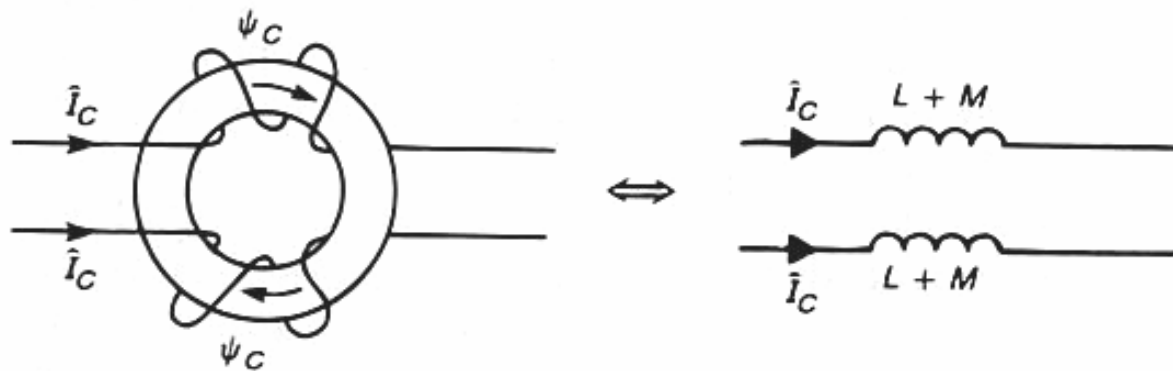


Filtri per la riduzione dei fenomeni di emissione e suscettibilità condotta

2) Bobine di blocco del modo comune;

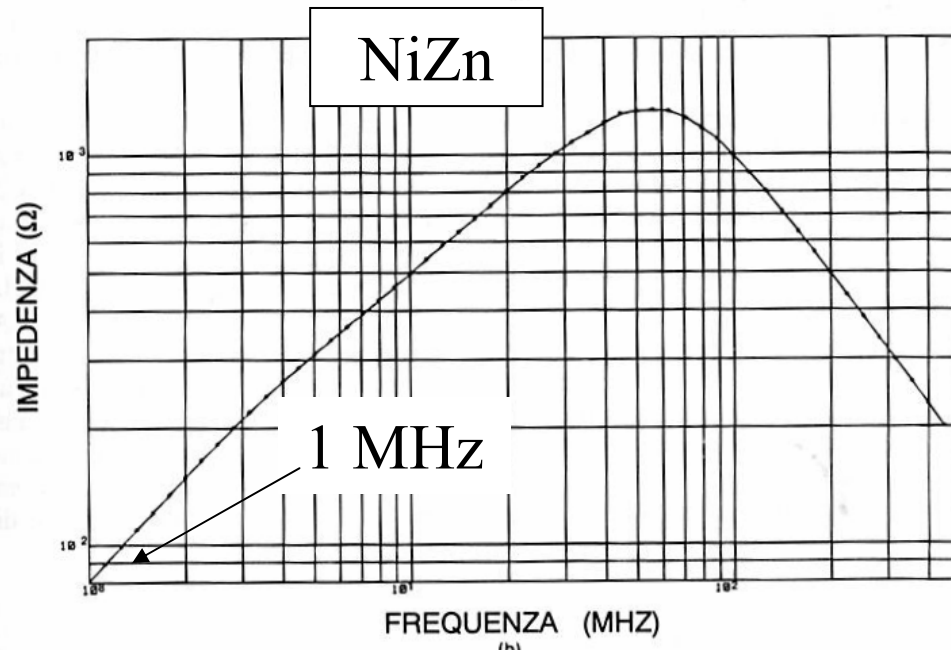
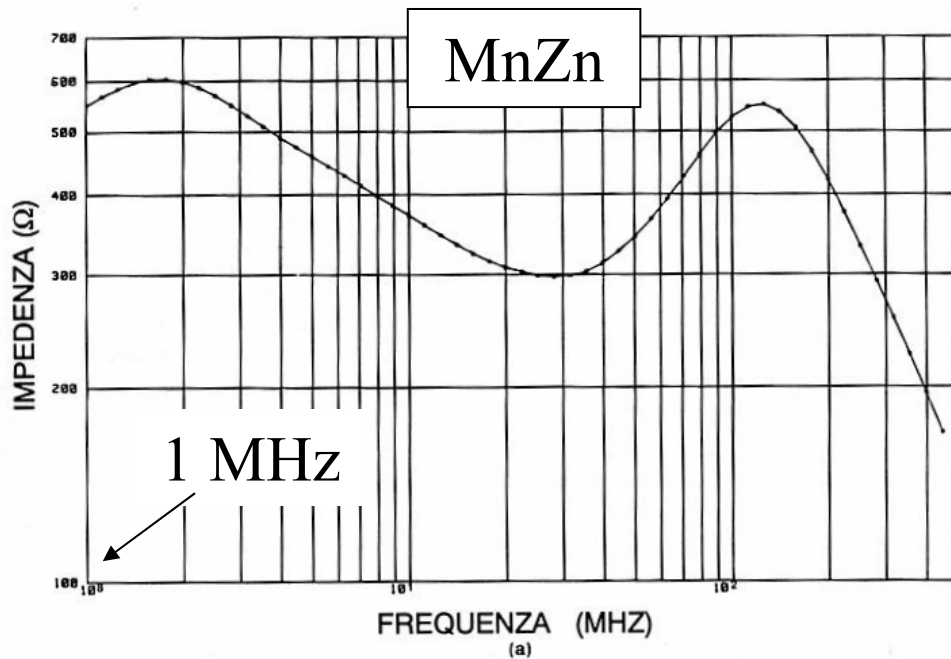


Le correnti di modo differenziale trovano una reattanza nulla



Le correnti di modo comune trovano una considerevole reattanza che le limita

Filtri per la riduzione dei fenomeni di emissione e suscettibilità condotta



Impedenza di induttori in ferrite costituiti da 5 avvolgimenti al variare della frequenza

L'impiego di un tipo di nucleo o dell'altro dipende dalle frequenze di lavoro (riduzione emissione condotte o radiate)

Unità didattica:

**Fenomeni elettromagnetici
radiati.**

Onde piane e uniformi

In generale il campo elettrico e il campo magnetico sono funzioni dello spazio e del tempo di questo tipo:

$$\vec{E} = E_x(x, y, z, t)\vec{a}_x + E_y(x, y, z, t)\vec{a}_y + E_z(x, y, z, t)\vec{a}_z$$

$$\vec{H} = H_x(x, y, z, t)\vec{a}_x + H_y(x, y, z, t)\vec{a}_y + H_z(x, y, z, t)\vec{a}_z$$

Un'onda elettromagnetica è definita piana quando in un qualsiasi punto dello spazio i vettori del campo elettrico e del campo magnetico giacciono su di un piano, e considerando due punti diversi dello spazio i due piani relativi sono tra loro paralleli.

Tale onda elettromagnetica è definita anche uniforme quando i valori del campo elettrico e del campo magnetico sono indipendenti dalla posizione sul piano.

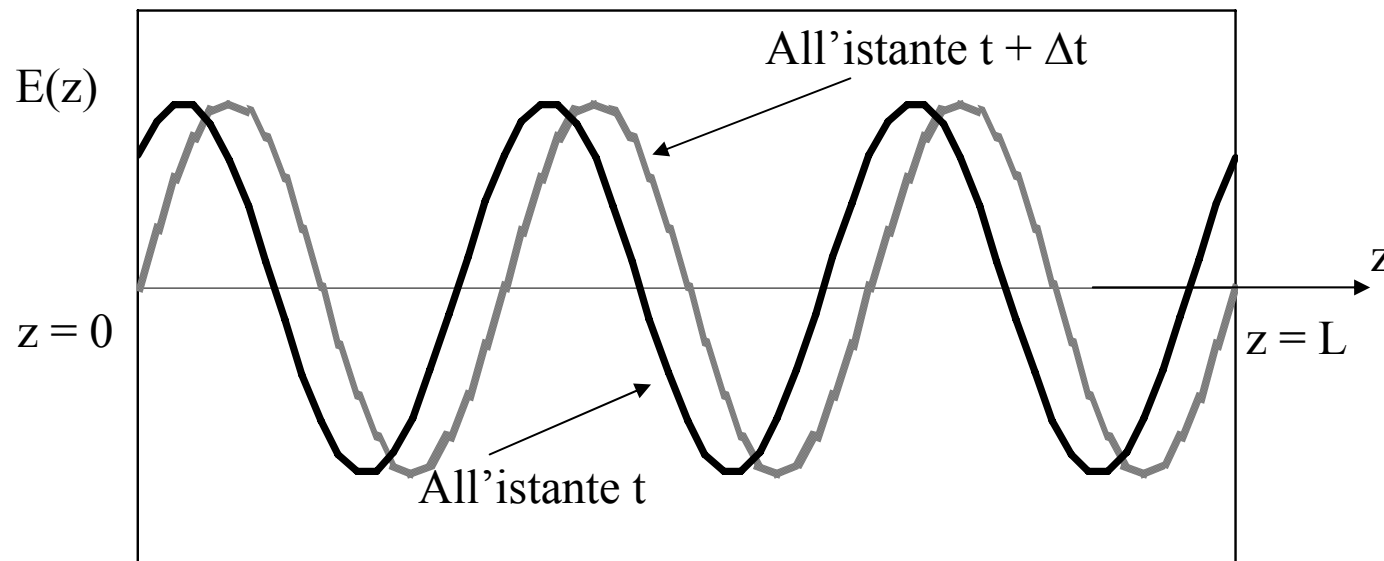
E' inoltre possibile dimostrare che se il campo elettrico è diretto lungo l'asse x, il campo magnetico avrà direzione lungo l'asse y e la propagazione avviene lungo z:

$$\vec{E} = E_x(z, t)\vec{a}_x$$

$$\vec{H} = H_y(z, t)\vec{a}_y$$

Onde piane e uniformi

In queste condizioni se il campo elettrico e il campo magnetico variano nel tempo con legge sinusoidale si verifica un fenomeno di propagazione ondosa del tutto simile a quello studiato nel caso delle linee di trasmissione.



Onde piane e uniformi

Nelle ipotesi sopra specificate è possibile esprimere due relazioni che legano campo elettrico e campo magnetico:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_x(z, t)}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y(z, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y(z, t)}{\partial z} = -\sigma E_x(z, t) - \varepsilon \frac{\partial E_x(z, t)}{\partial t} \end{array} \right.$$

A regime sinusoidale le espressioni diventano:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\dot{E}_x(z)}{dz} = -j\omega\mu\dot{H}_y(z) \\ \frac{d\dot{H}_y(z)}{dz} = -(\sigma + j\omega\varepsilon)\dot{E}_x(z) \end{array} \right.$$

Onde piane e uniformi - Impedenza intrinseca del mezzo

E' possibile disaccoppiare le due equazioni derivandole rispetto a z:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \dot{E}_x(z)}{dz^2} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\dot{E}_x(z) \\ \frac{d^2 \dot{H}_y(z)}{dz^2} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\dot{H}_y(z) \end{array} \right.$$

Analogamente a quanto visto con le linee di trasmissione la soluzione di queste due equazioni differenziali è la seguente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_x = \bar{E}^+ e^{-[j\omega\mu(\sigma+j\omega\varepsilon)]z} + \bar{E}^- e^{[j\omega\mu(\sigma+j\omega\varepsilon)]z} \\ \dot{H}_y = \frac{\bar{E}^+}{\bar{\eta}} e^{-[j\omega\mu(\sigma+j\omega\varepsilon)]z} + \frac{\bar{E}^-}{\bar{\eta}} e^{[j\omega\mu(\sigma+j\omega\varepsilon)]z} \end{array} \right.$$

$$\bar{\eta} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$$

Impedenza intrinseca del mezzo nel quale si propaga l'onda elettromagnetica; nel vuoto vale 377Ω .

Onde piane e uniformi - Costante di propagazione

A questo punto è possibile tornare nel dominio del tempo:

$$\begin{cases} E_x(z, t) = \Re\left[\dot{E}_x e^{j\omega t}\right] = \bar{E}^+ e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta^+) + \bar{E}^- e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \theta^-) \\ H_y(z, t) = \Re\left[\dot{H}_y e^{j\omega t}\right] = \frac{\bar{E}^+}{\eta} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta^+ - \theta_\eta) - \frac{\bar{E}^-}{\eta} e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \theta^- - \theta_\eta) \end{cases}$$

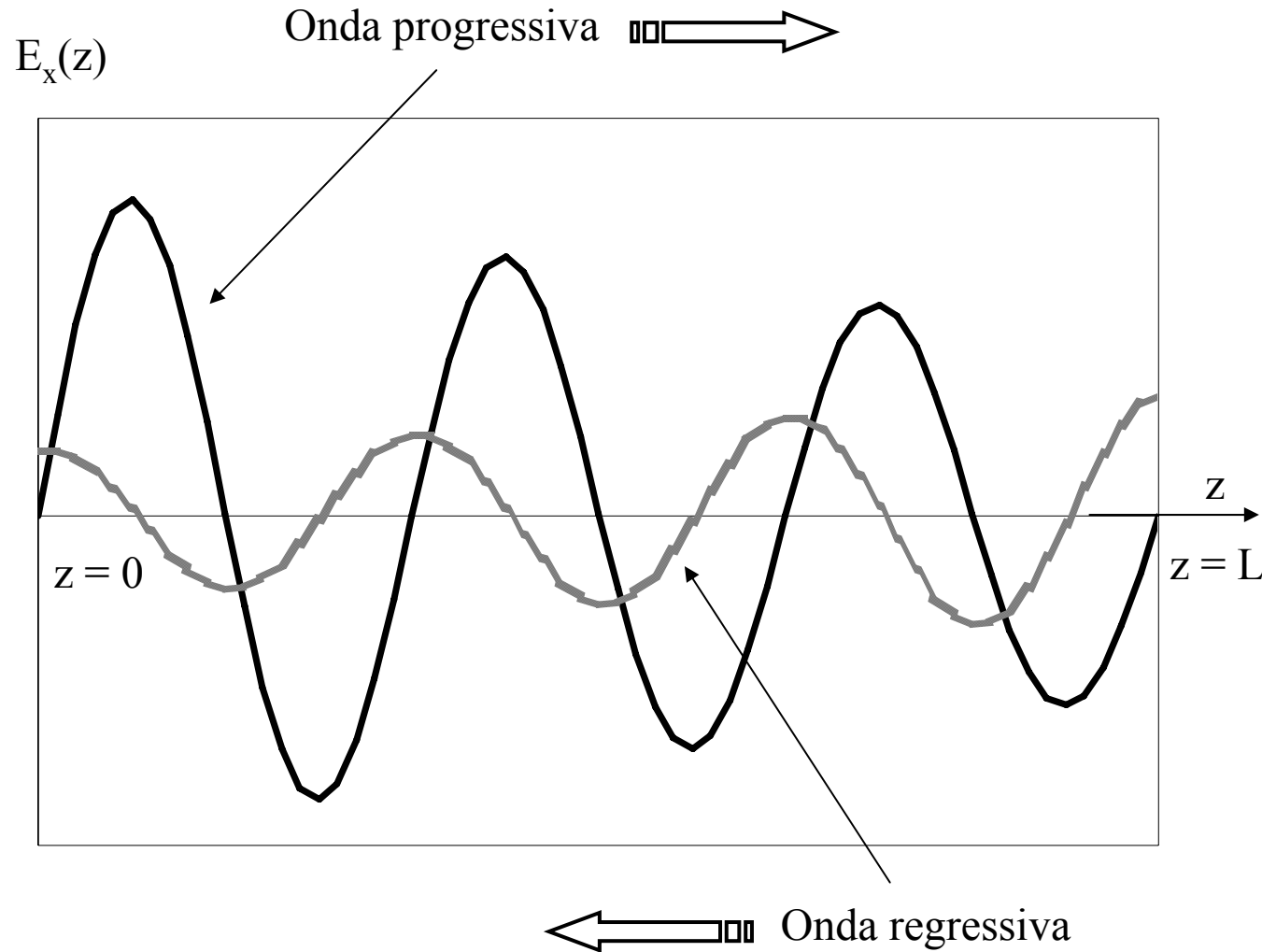
dove:

$$\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \implies \text{Questo numero complesso è la costante di propagazione}$$

Come per le linee di trasmissione le espressioni di campo elettrico e campo magnetico sono caratterizzate dalla somma di due termini, il primo rappresenta un'onda **progressiva** smorzata, il secondo rappresenta un'onda **regressiva** smorzata.

Lo smorzamento dipende da α ed è presente solo se $\sigma \neq 0$. In un mezzo perfettamente isolante α risulta 0 e non c'è smorzamento per l'onda piana e uniforme.

Onde piane e uniformi



Lo stesso comportamento si ha anche per il campo magnetico

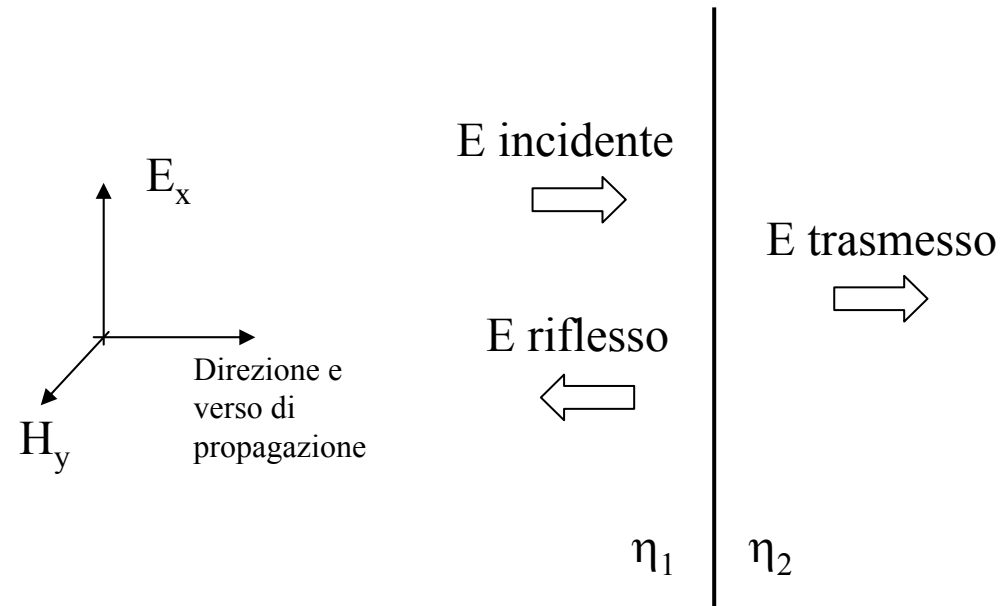
L'onda regressiva è presente solo se l'onda progressiva incontra un mezzo avente impedenza intrinseca diversa da quello in cui si sta propagando

Onde piane e uniformi - Coefficiente di riflessione

Se si considera un'onda piana e uniforme che incide su di una superficie piana e indefinita di separazione tra due mezzi diversi, è possibile definire il coefficiente di riflessione come il rapporto tra il campo riflesso e quello incidente ed ha la seguente espressione:

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{E}_{\text{riflesso}}}{\dot{E}_{\text{incidente}}} = \frac{\dot{\eta}_2 - \dot{\eta}_1}{\dot{\eta}_2 + \dot{\eta}_1}$$

$$\bar{\eta} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$$



E' evidente che l'interfaccia tra due mezzi aventi la stessa impedenza intrinseca non produce onde riflesse.

Osservando l'espressione dell'impedenza intrinseca si può notare come all'interfaccia tra un mezzo isolante ed uno conduttore la variazione di η è estremamente elevata => coefficiente di riflessione elevato (schermi).

Onde piane e uniformi - Densità di potenza

La densità di potenza associata ad un'onda elettromagnetica è esprimibile attraverso il vettore di Poynting:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Nel caso di regime sinusoidale è possibile definire la densità di potenza media associata all'onda elettromagnetica come densità di potenza media del vettore di Poynting:

$$\vec{S}_{\text{media}} = \frac{1}{2} \Re \left[\dot{\vec{E}} \times \vec{H}^* \right] \quad [\text{W/m}^2]$$

Nel caso di onda piana e uniforme in assenza di onda regressiva è facile osservare che:

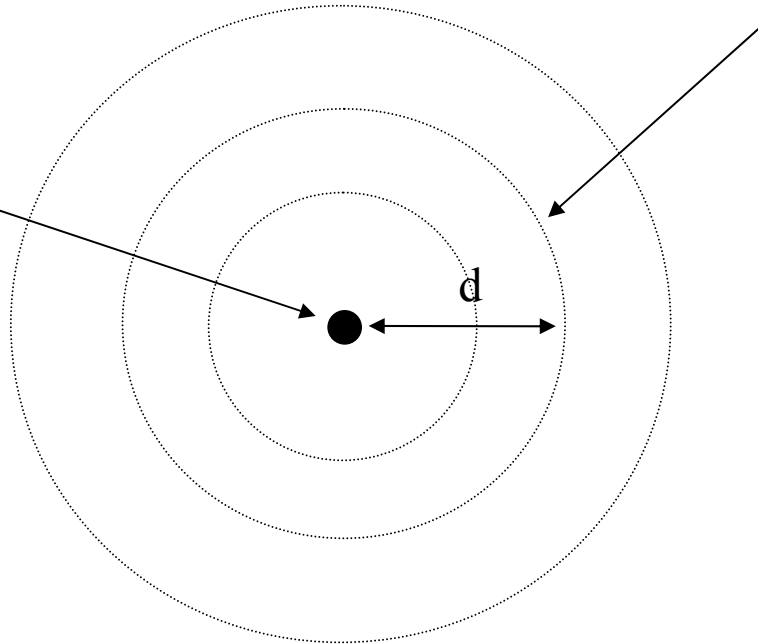
$$\frac{\dot{\vec{E}}}{\dot{\vec{H}}} = \eta$$

Per cui nel caso di onda piana e uniforme nel vuoto la densità di potenza media vale:

$$\vec{S}_{\text{media}} = \frac{|\dot{\vec{E}}|^2}{2\eta_0} \quad [\text{W/m}^2]$$

Antenne, sorgente puntiforme e isotropa

Sorgente
puntiforme
e isotropa



Su questa superficie
sferica la densità di
potenza vale:

$$\vec{S}_{\text{media}} = \frac{P_T}{4\pi d^2}$$

Dove P_T è la potenza
elettrica fornita
all'emettitore isotropo

Se il raggio della sfera d è sufficientemente grande rispetto alla lunghezza d'onda del campo, su di una porzione limitata di sfera è possibile in prima approssimazione considerare di essere in campo lontano ossia valgono le stesse proprietà dell'onda piana e uniforme

Antenne - campo lontano

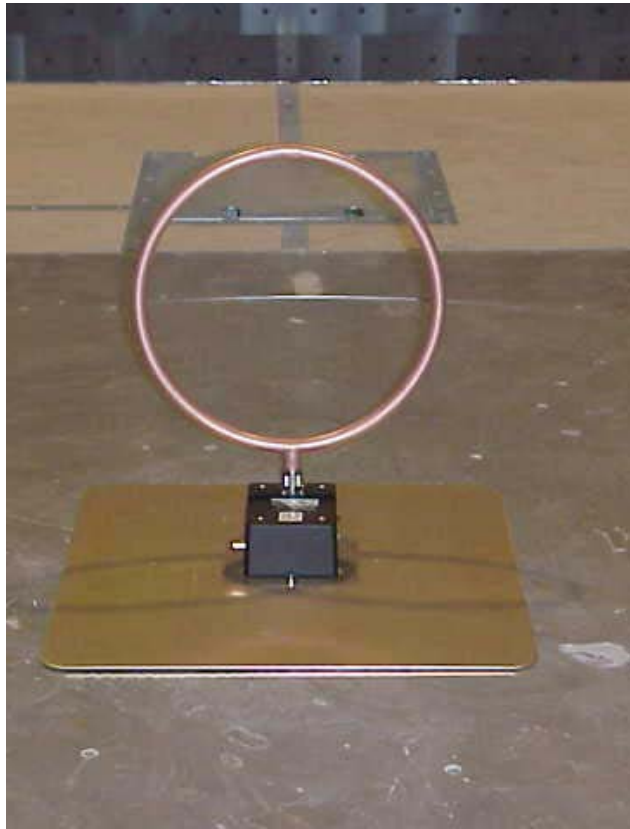
Se il raggio della sfera d è sufficientemente grande rispetto alla lunghezza d'onda del campo, su di una porzione limitata di sfera è possibile in prima approssimazione considerare di essere in campo lontano regione in cui valgono le stesse proprietà dell'onda piana e uniforme. Nella pratica si considera il confine oltre il quale si è in campo lontano la distanza massima tra le due seguenti quantità:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\lambda \\ \frac{2D^2}{\lambda} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \lambda \text{ è la lunghezza d'onda} \\ D \text{ è la dimensione massima} \\ \text{dell'emettitore} \end{array}$$

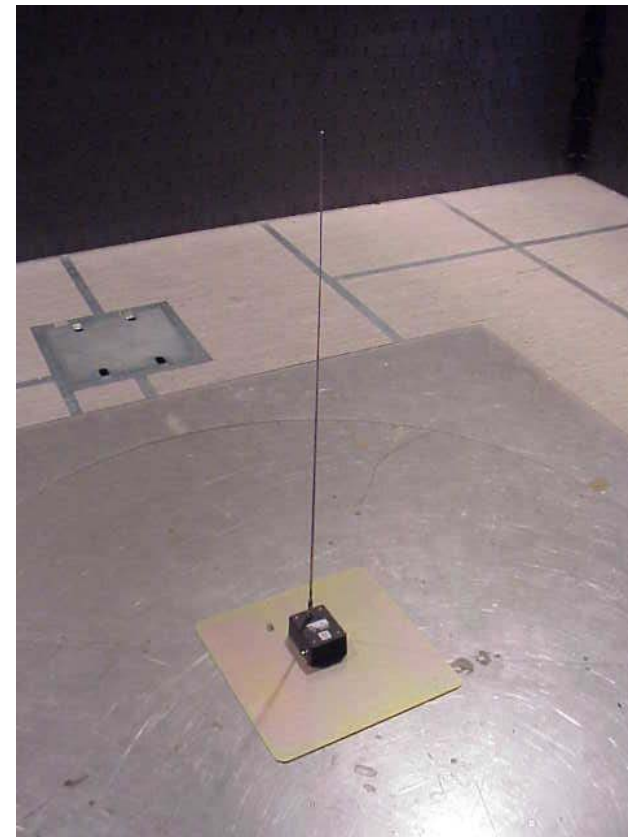
Per cui nella regione di campo lontano, a distanza d da un emettitore puntiforme ed isotropo si ha:

$$\vec{S}_{\text{media}} = \frac{|\dot{\vec{E}}|^2}{2\eta_0} \quad \Rightarrow \quad |\dot{\vec{E}}| = \sqrt{2\eta_0 S_{\text{media}}} = \sqrt{\frac{2\eta_0 P_T}{4\pi d^2}}$$

Antenne comunemente utilizzate nella compatibilità elettromagnetica



Antenna “loop” utilizzata per misurare o irradiare campi magnetici tipicamente nella banda 10 kHz – 30 MHz



Antenna “rod” utilizzata per misurare o irradiare campi elettrici tipicamente nella banda 10 kHz – 30 MHz

Antenne comunemente utilizzate nella compatibilità elettromagnetica

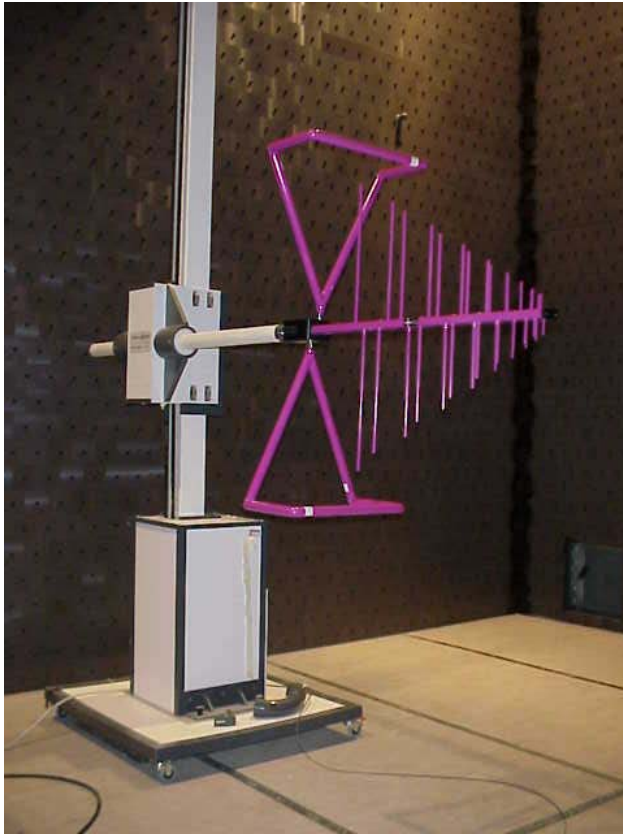


Antenna “biconica” utilizzata per misurare o irradiare campi elettrici tipicamente nella banda 25 MHz – 300 MHz



Antenna “log-periodica” utilizzata per misurare o irradiare campi elettrici tipicamente nella banda 200 MHz – 1 GHz

Antenne comunemente utilizzate nella compatibilità elettromagnetica



Antenna “bilog” utilizzata per misurare o irradiare campi elettrici tipicamente nella banda 25 MHz – 1 GHz



Antenna “horn” utilizzata per misurare o irradiare campi elettrici tipicamente nella banda 700 MHz – 18 GHz

Antenne - guadagno

In realtà le antenne utilizzate nella pratica possono essere considerate puntiformi ponendosi a grande distanza da esse, ma non possono essere considerate isotrope. Non irradiano la potenza a loro applicata allo stesso modo in tutte le direzioni. Per tener conto di questo si definisce per loro il **guadagno** $G(\theta, \phi)$, un parametro funzione della direzione individuata dalle coordinate sferiche θ e ϕ .

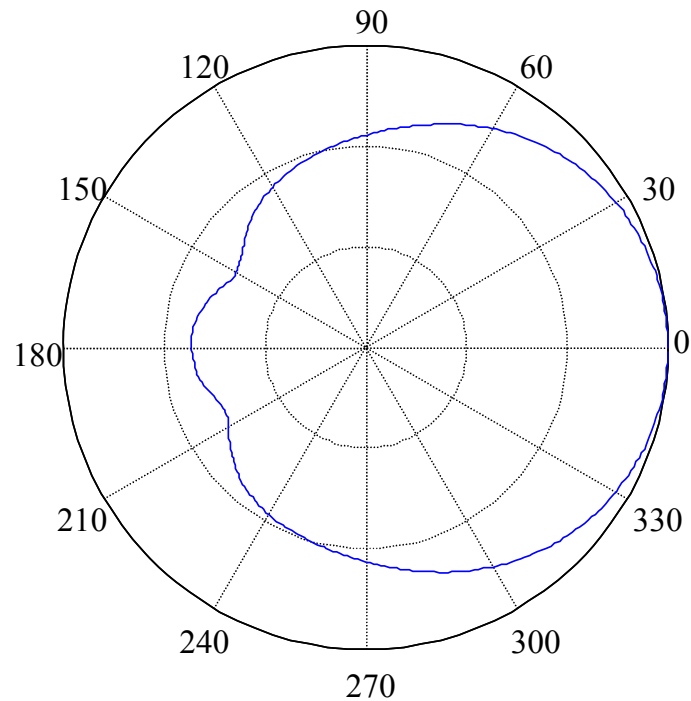
In queste condizioni il campo elettrico prodotto da una sorgente a distanza d vale:

$$|\dot{\mathbf{E}}| = \sqrt{\frac{2\eta_0 G(\theta, \phi) P_T}{4\pi d^2}}$$

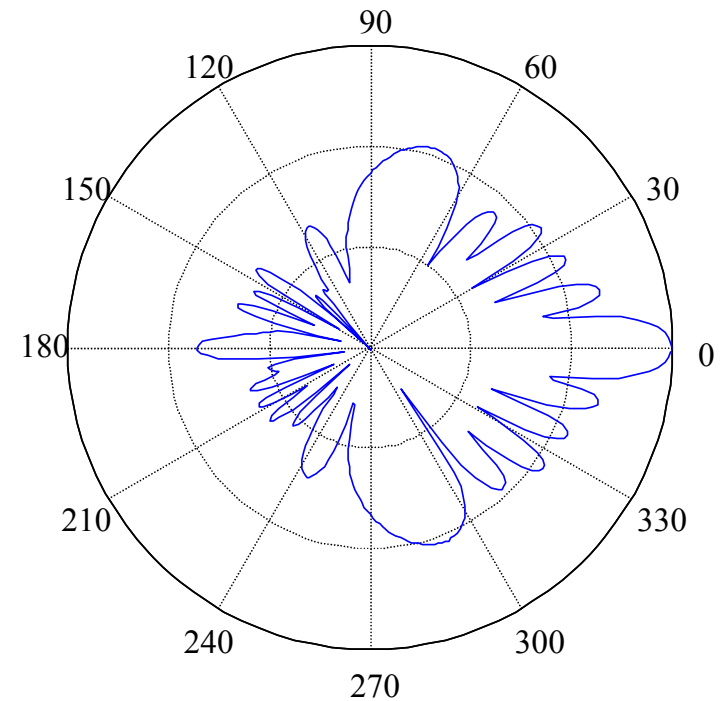
Allo stesso modo anche in ricezione un'antenna non isotropa ha un guadagno, dipendente dalla direzione dalla quale giunge la propagazione dell'onda elettromagnetica, che esprime l'efficienza con la quale l'antenna è in grado di captare il campo elettromagnetico.

Antenne - diagramma di irradiazione

Esempio: diagrammi d'irradiazione per antenne di telefonia cellulare, esprimono il valore del guadagno G in dB in funzione dell'angolo sul piano orizzontale e sul piano verticale



orizzontale



verticale

Antenne - fattore d'antenna

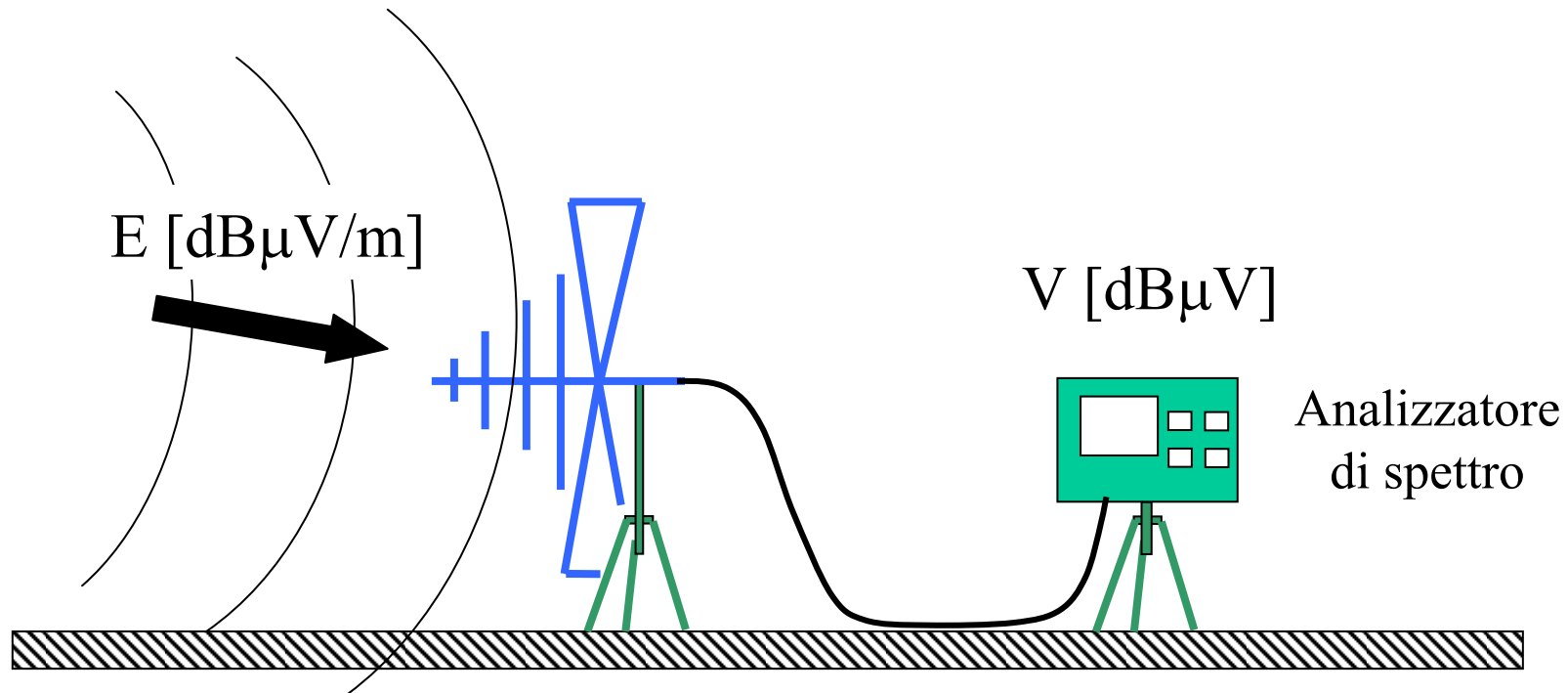
Il fattore d'antenna è un parametro essenziale per la misura di campi elettromagnetici attraverso l'uso di antenne.

L'antenna converte il campo elettrico o il campo magnetico che la investe in un segnale elettrico (una tensione) che viene inviato a un ricevitore (misuratore, es. analizzatore di spettro).

Il fattore d'antenna tiene conto di questa conversione e permette, dalla misura del segnale elettrico in tensione, di risalire al valore del campo elettrico o del campo magnetico agente sull'antenna.

Il fattore d'antenna dipende dalla frequenza della radiazione elettromagnetica e viene determinato e fornito insieme all'antenna dal costruttore.

Antenne - fattore d'antenna

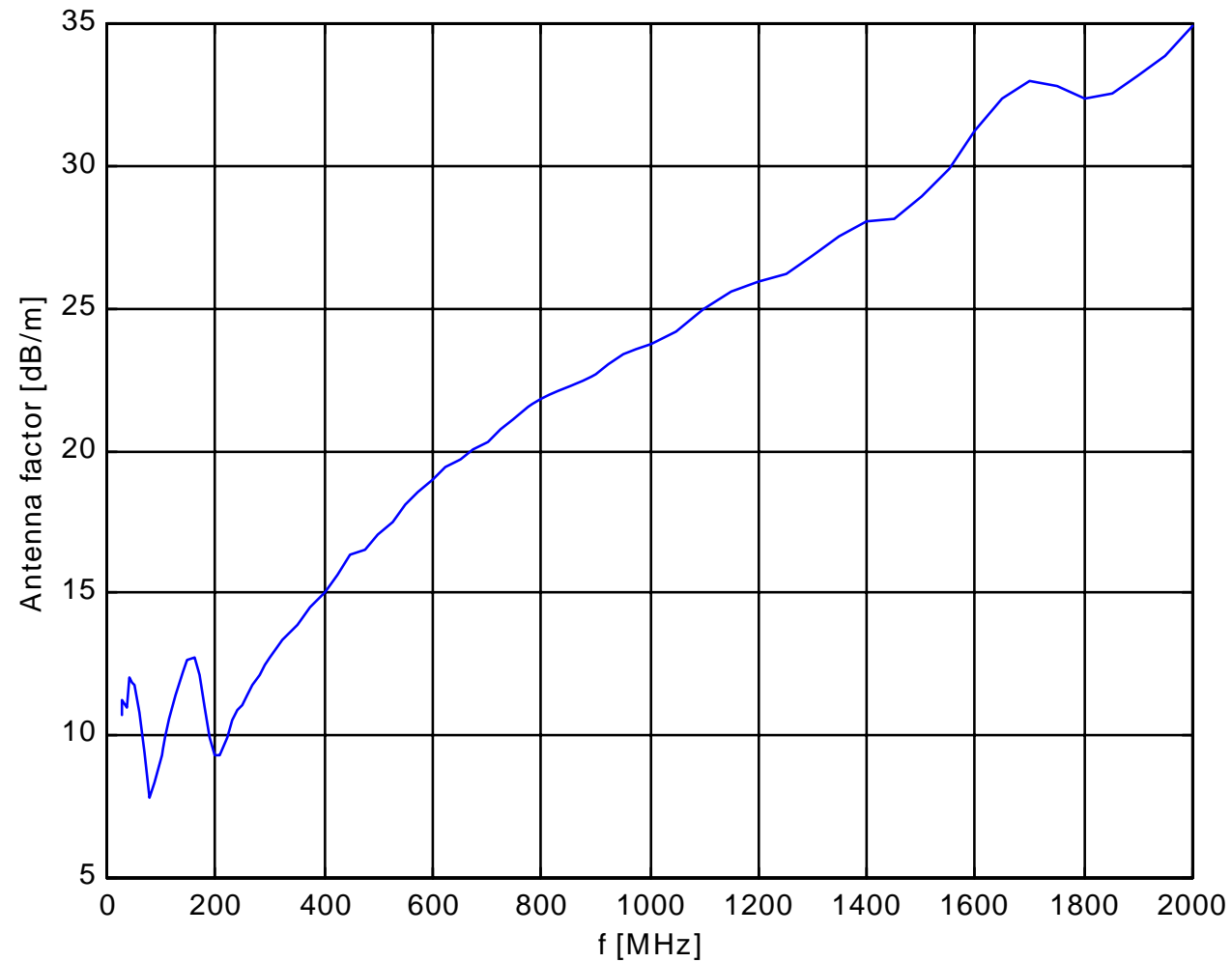


$$E \text{ [dB}\mu\text{V/m]} = V \text{ [dB}\mu\text{V]} + \mathbf{AF} \text{ [dB/m]} + AC \text{ [dB]}$$

E = campo elettrico incidente sull'antenna alla frequenza f^* , V = tensione misurata dall'analizzatore di spettro alla frequenza f^* , AF = antenna factor alla frequenza f^* , AC = attenuation cable alla frequenza f^* .

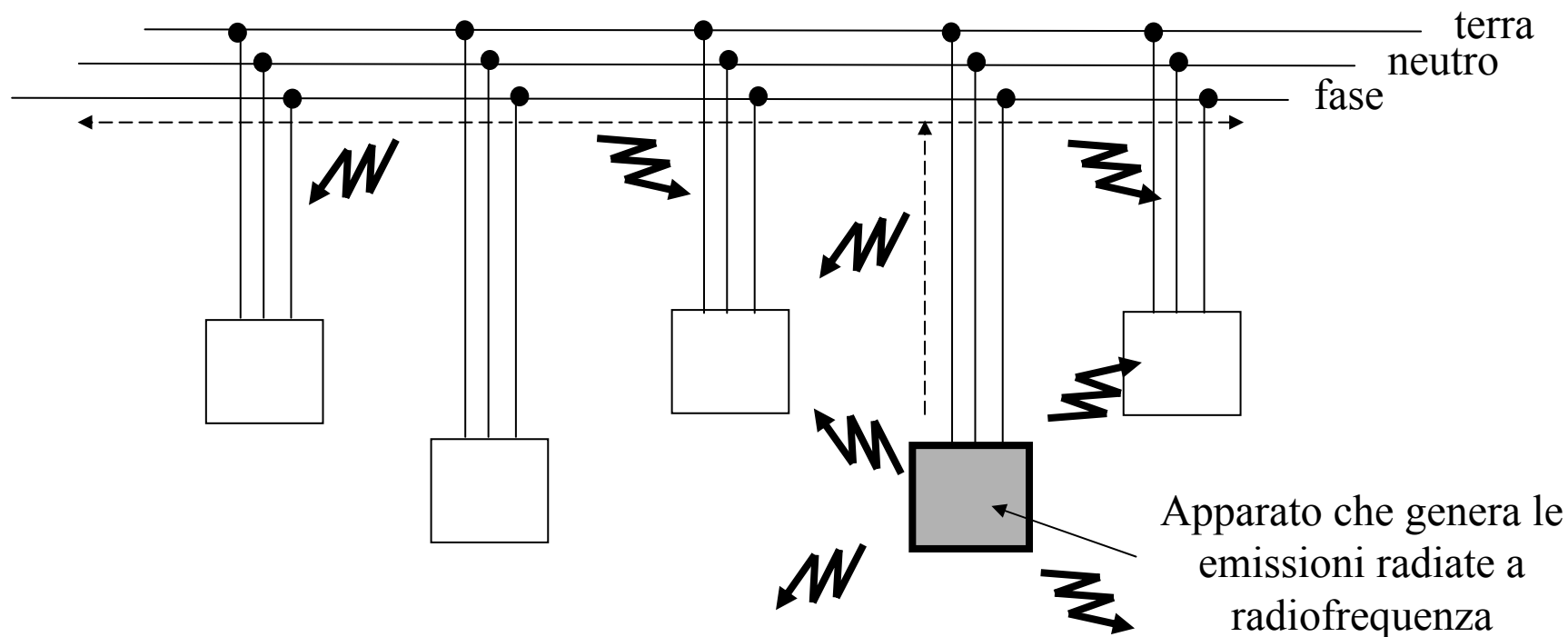
Antenne - fattore d'antenna

Esempio: Fattore d'antenna di una antenna bilog 30 MHz – 2 GHz



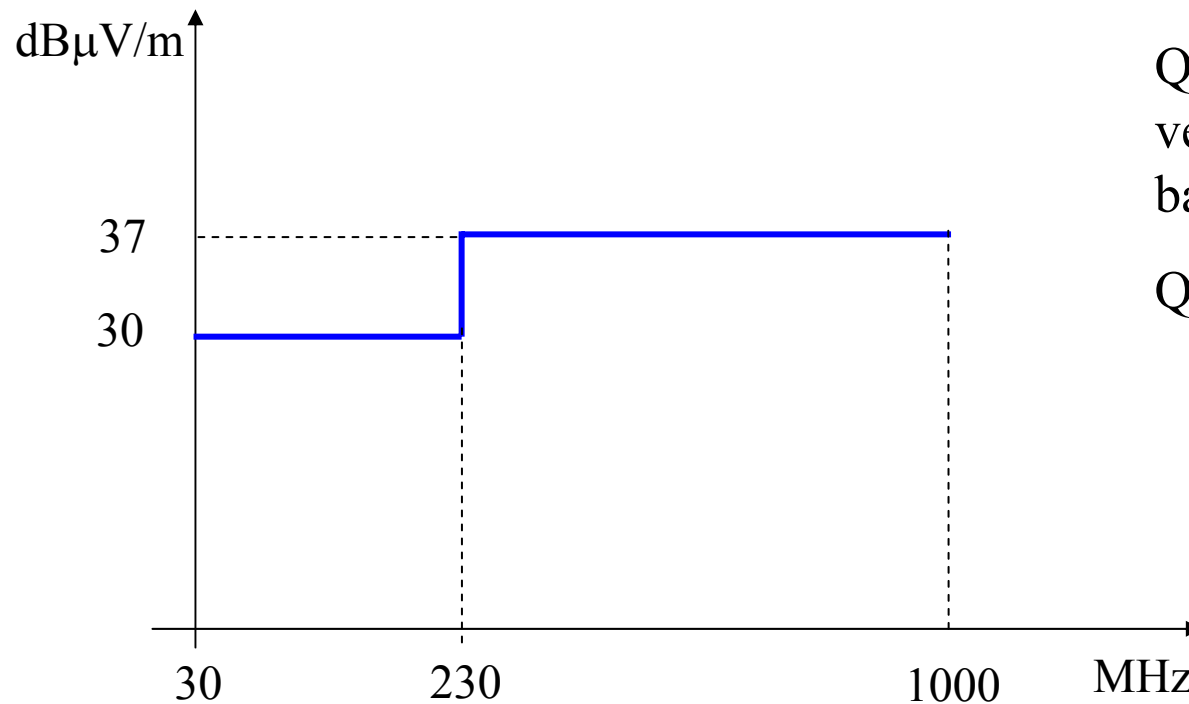
Emissioni radiate a radiofrequenza

Un apparato elettrico può generare delle emissioni radiate a radiofrequenza e veicularle attraverso l'aria direttamente a partire da esso o a partire dai cavi di connessione ad esso collegati. Altri apparati presenti nei pressi dell'apparato inquinante possono essere suscettibili ai disturbi da esso generato ed evidenziare dei malfunzionamenti.



Emissioni radiate a radiofrequenza - CEI EN 55022

Esempio di alcuni tracciati limite della normativa che regola le emissioni radiate a radiofrequenza prodotte da una apparecchiatura elettrica od elettronica utilizzata in ambiente domestico, commerciale o industriale:

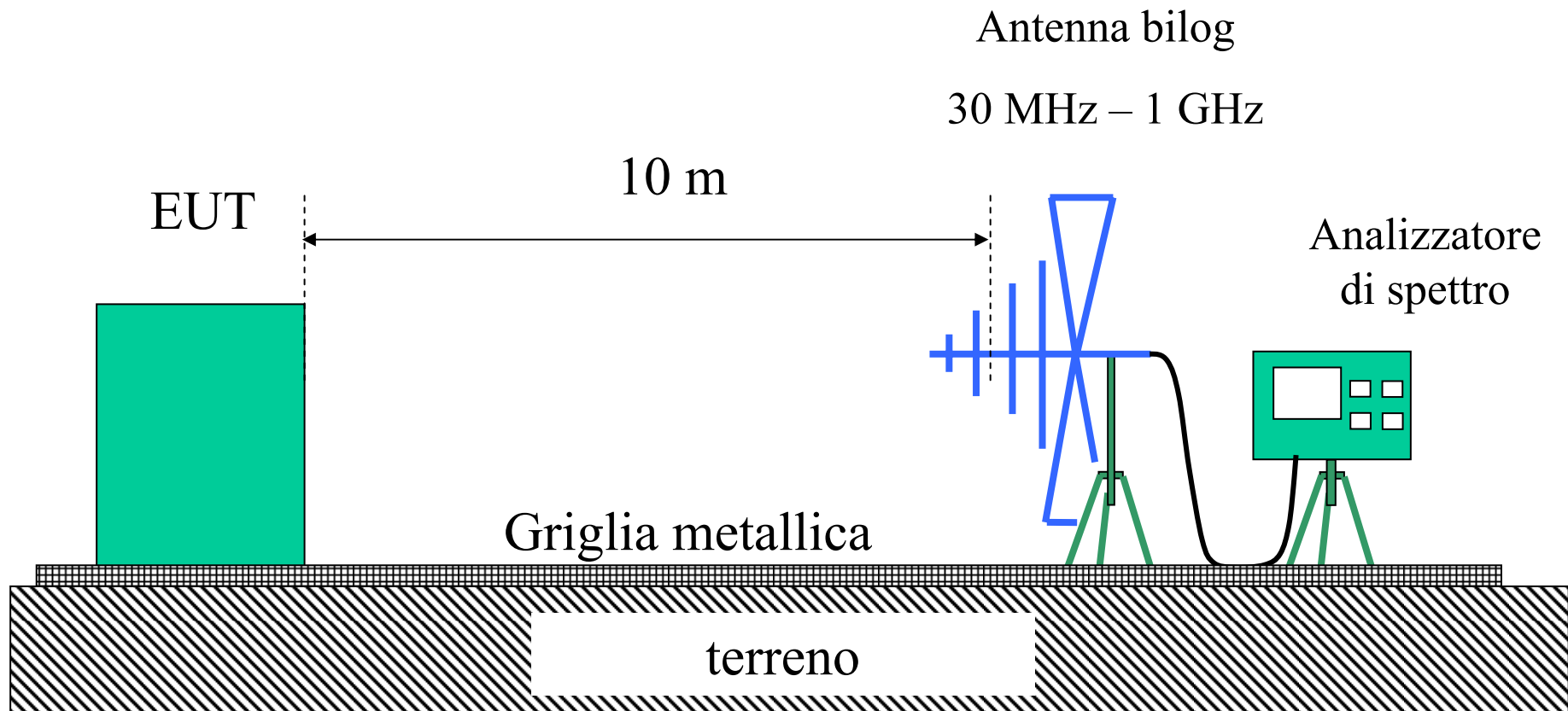


Queste emissioni radiate vengono controllate nella banda 30 MHz – 1 GHz

QP (Quasi picco)

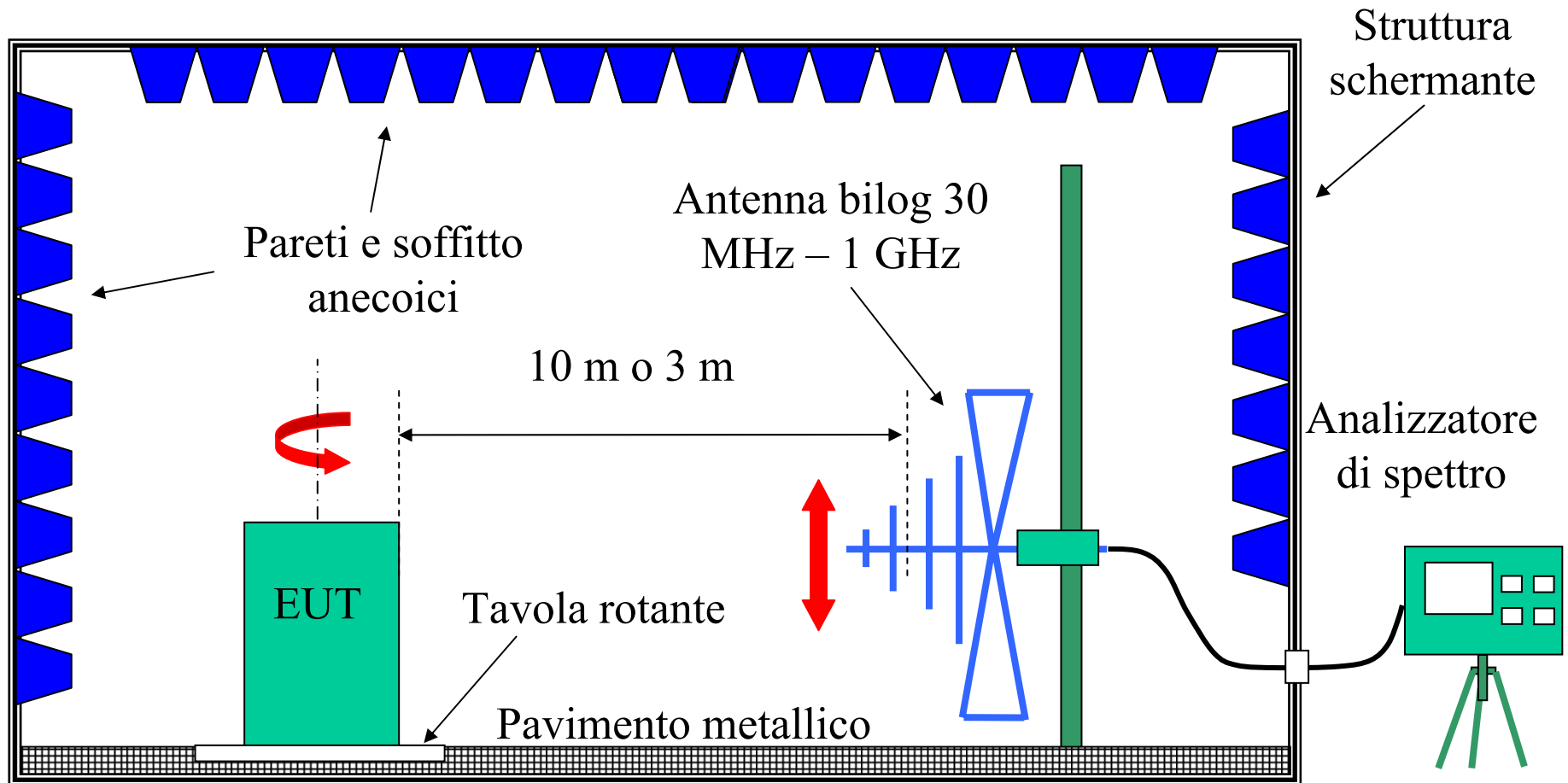
Emissioni radiate a radiofrequenza - CEI EN 55022

Sito di prova: Sito aperto, con livelli bassi di inquinamento elettromagnetico e distanza di prova 10 m.

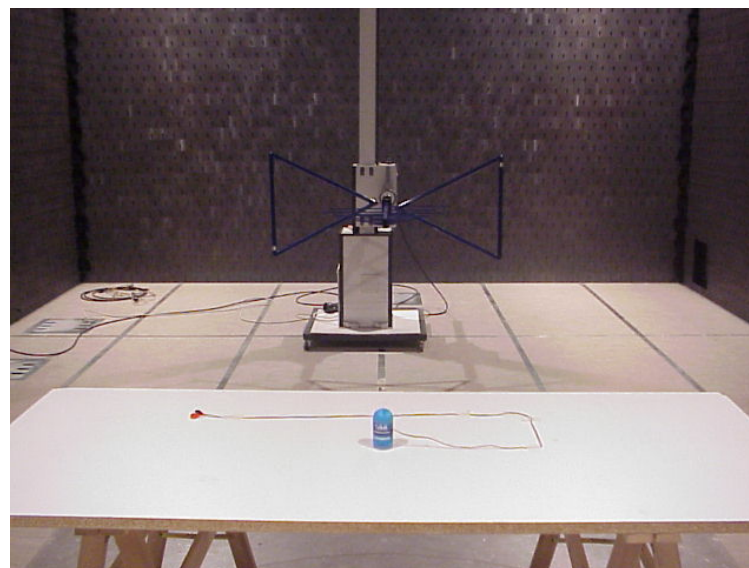
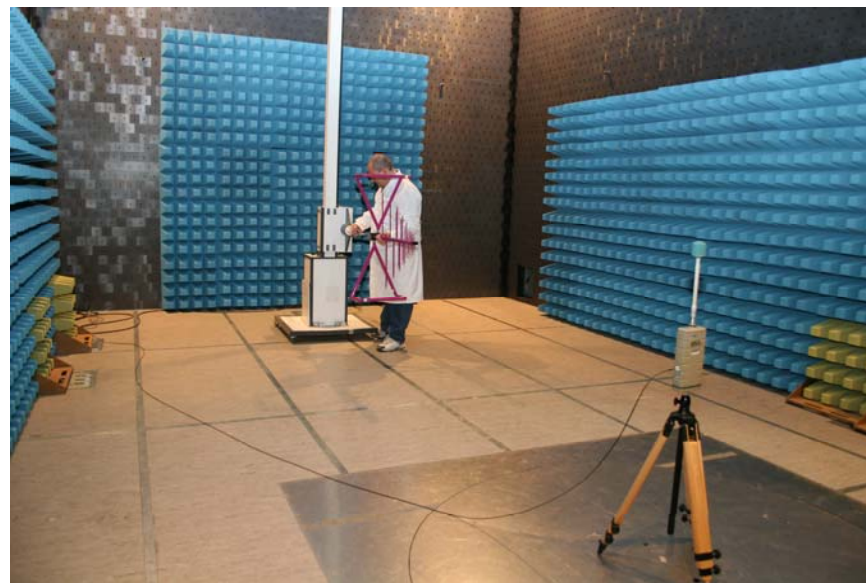


Emissioni radiate a radiofrequenza - CEI EN 55022

Sito di prova: Camera schermata e semianecoica, distanza di prova 10 m o 3 m (nel caso si utilizzi una distanza di 3 m i livelli limite vengono innalzati).

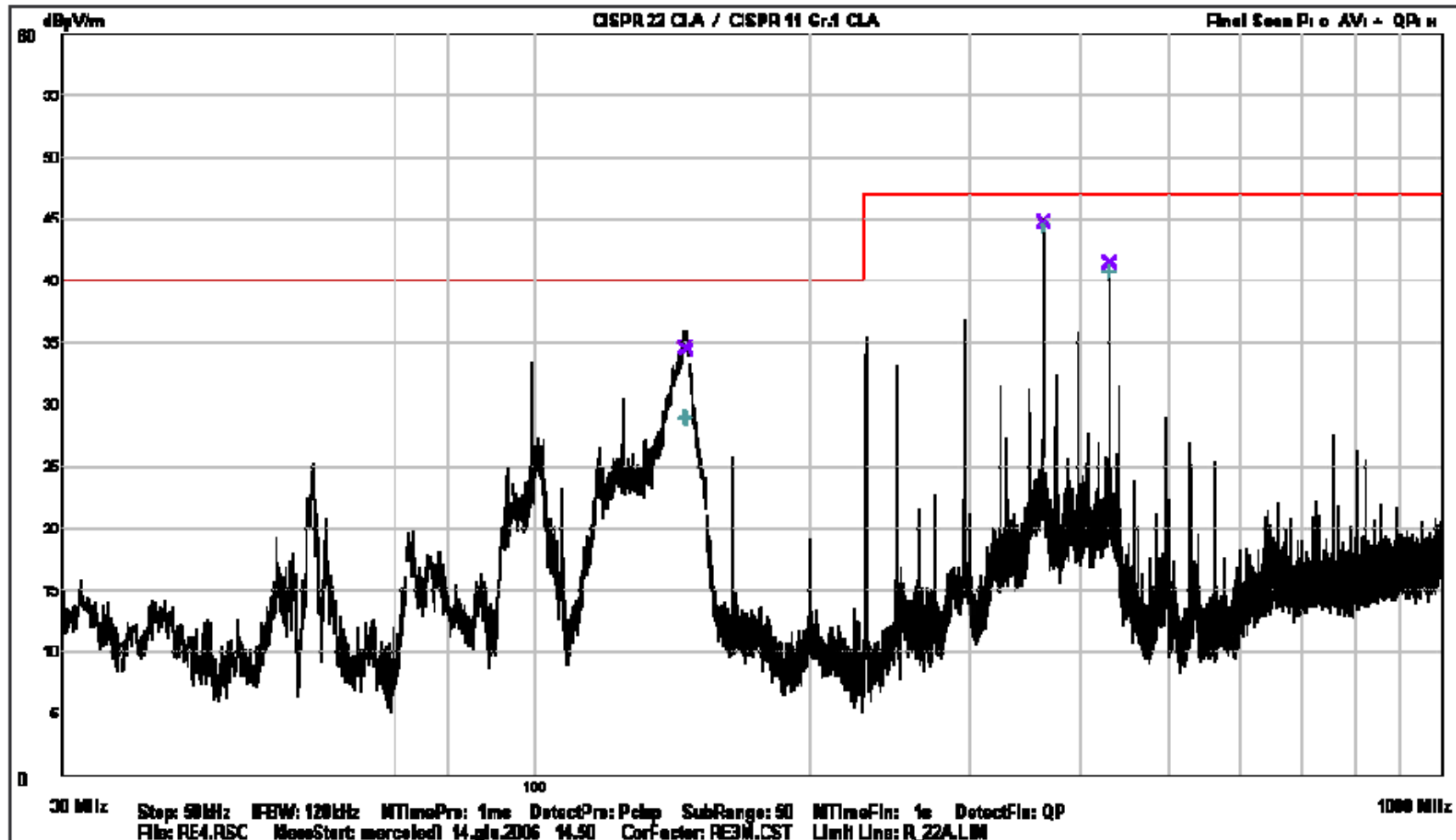


Emissioni radiate a radiofrequenza



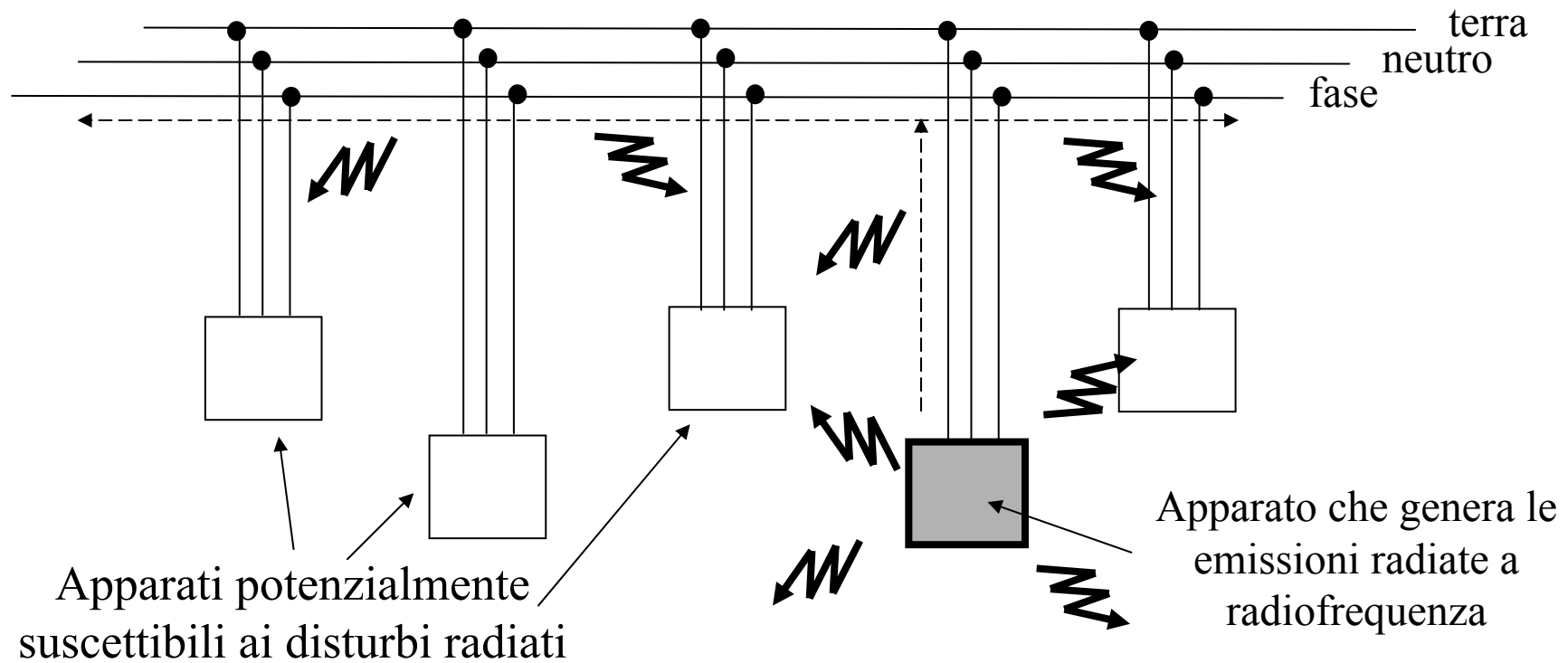
Emissioni radiate a radiofrequenza - CEI EN 55022

Esempio di un tracciato risultato di un test di emissione radiata:



Suscettibilità radiata a radiofrequenza

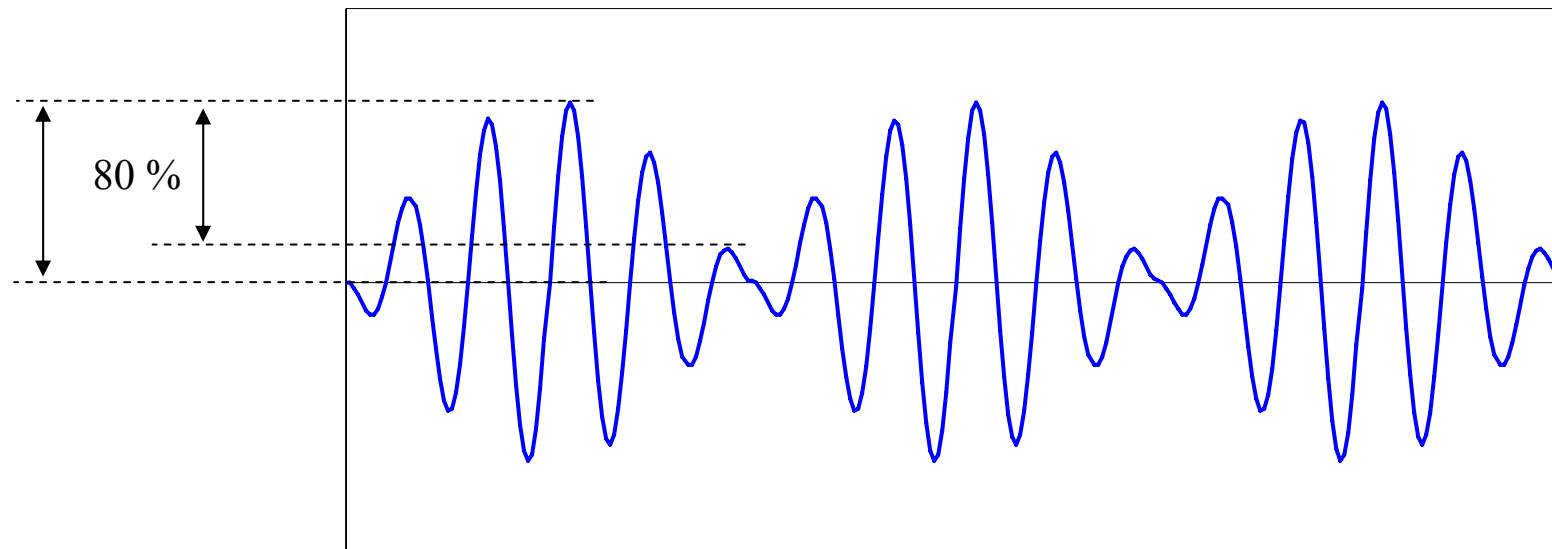
Un apparato elettrico può essere suscettibile a campi elettromagnetici a radiofrequenza prodotti da altri apparati posti nelle vicinanze.



Suscettibilità radiata a radiofrequenza, (CEI EN 61000 - 4 - 3)

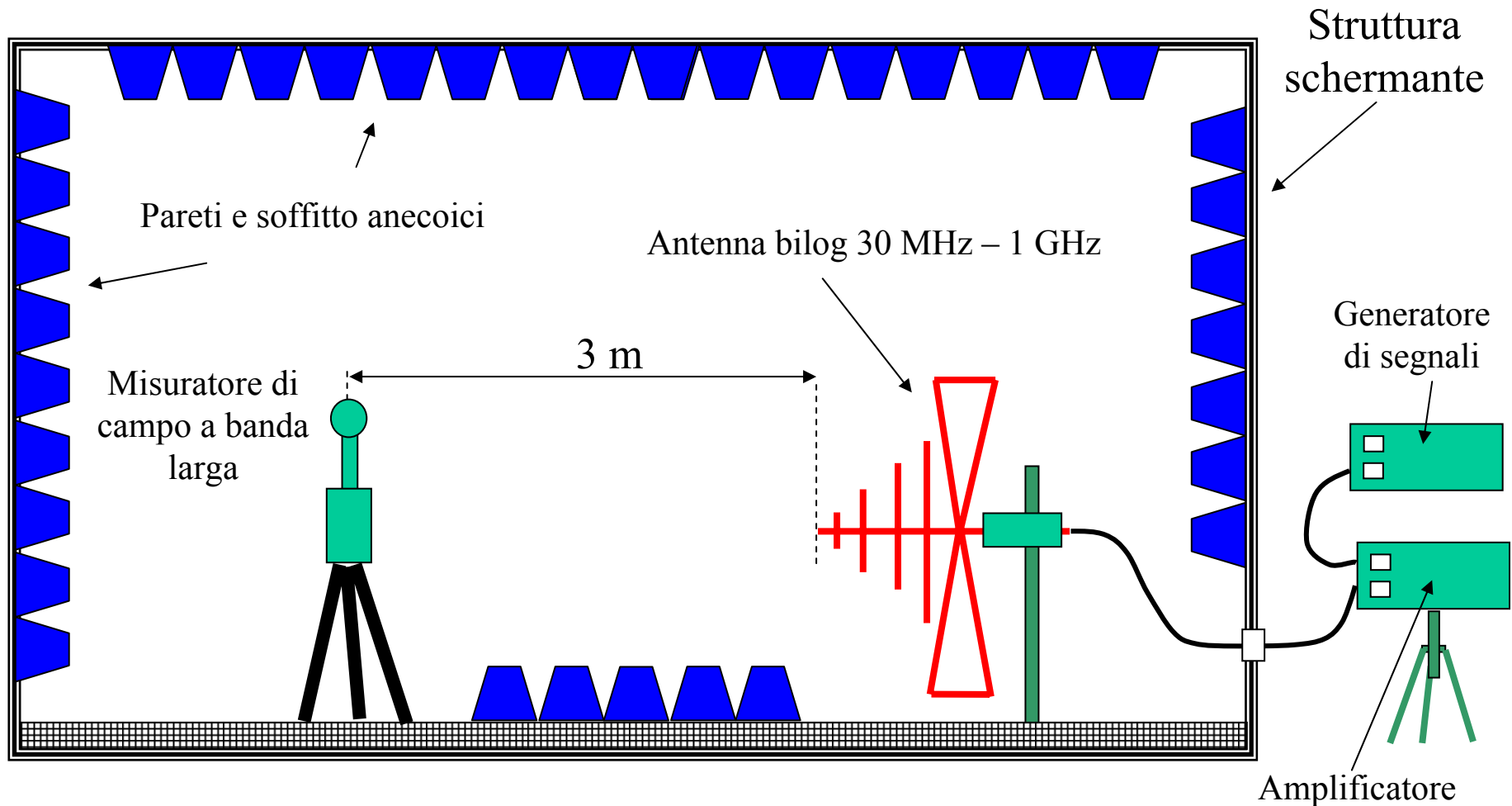
Esempio di un tipo di segnale di disturbo indicato dalle normative che regolano le prove di suscettibilità radiata a radiofrequenza per apparecchiature utilizzate in ambiente domestico, commerciale e industriale.

- Segnale sinusoidale modulato in ampiezza (AM)
- Modulazione 80 %;
- Modulante 1 kHz;
- Portante 30 MHz – 1 GHz;
- Ampiezza portante senza modulazione 3 V/m, 6 V/m, 10 V/m, misurata in corrispondenza della posizione in cui verrà sistemato l'EUT.



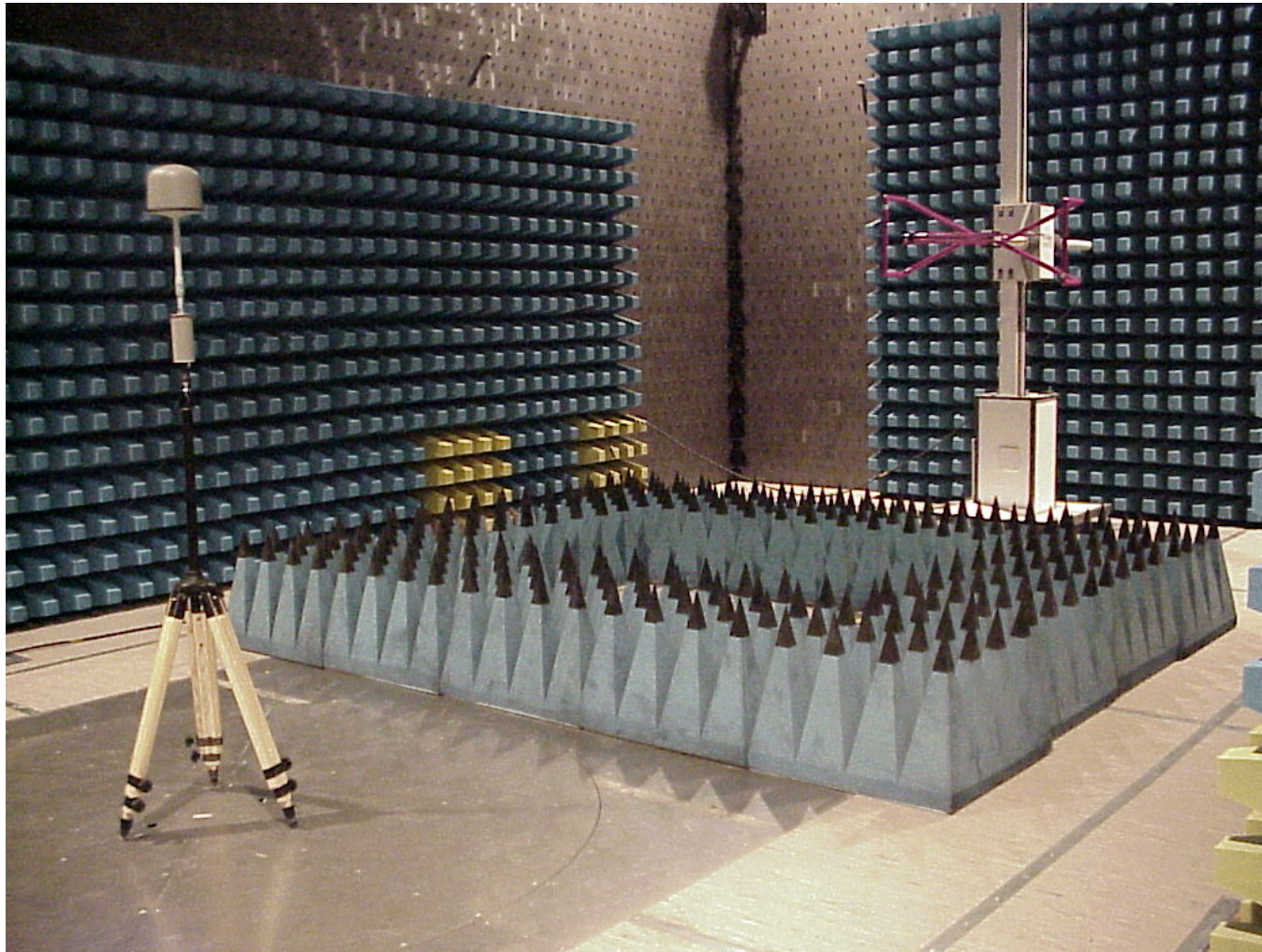
Suscettibilità radiata a radiofrequenza, (CEI EN 61000 - 4 - 3)

Sito di prova: Camera schermata e semianecoica, distanza di prova 3 m.



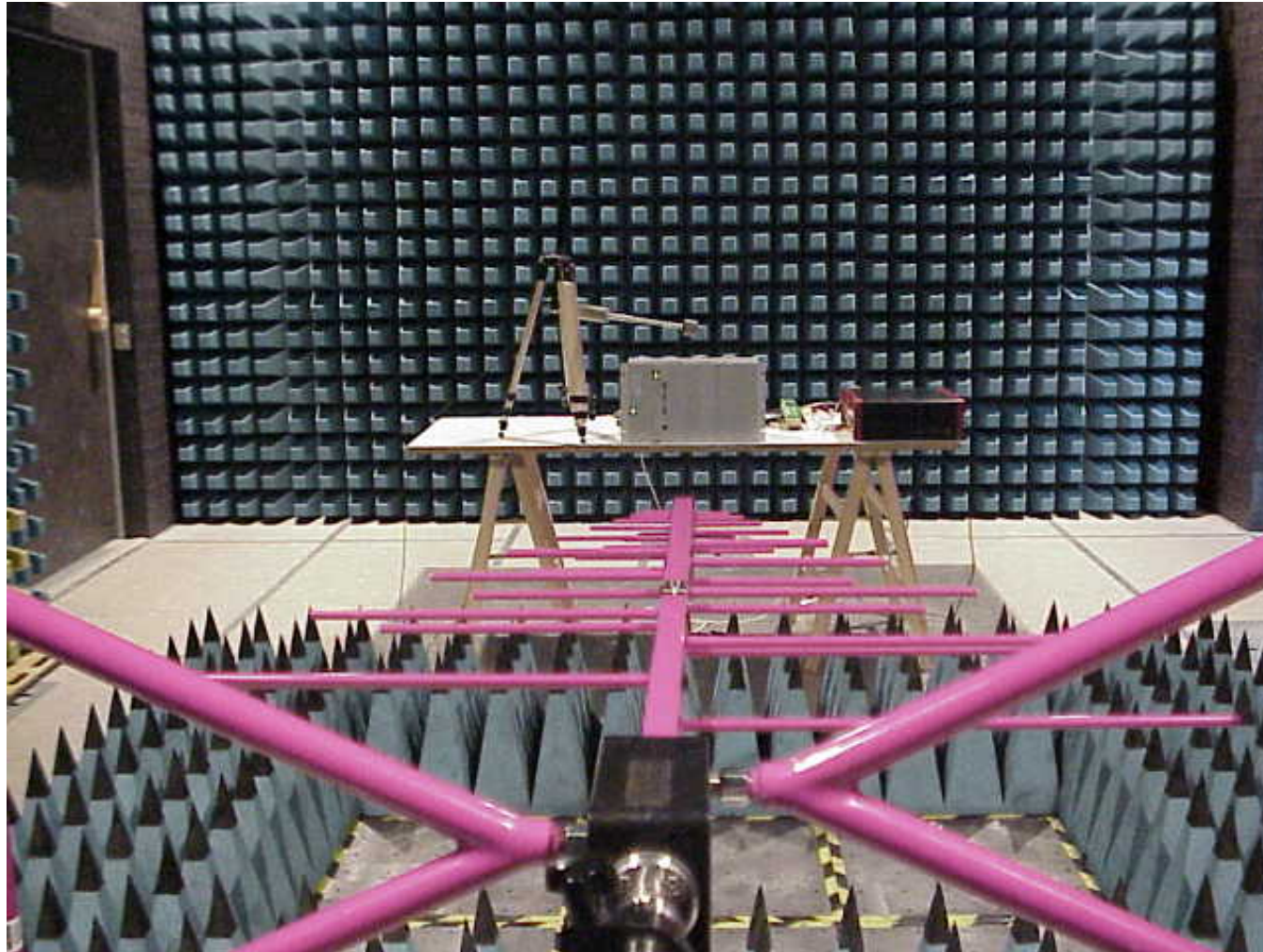
Suscettibilità radiata a radiofrequenza, (CEI EN 61000 - 4 - 3)

Impostazione dei livelli di generazione per ottenere l'ampiezza di campo elettrico desiderata (3 V/m, 6 V/m, 10 V/m) ad ogni frequenza nell'intervallo 30 MHz – 1 GHz



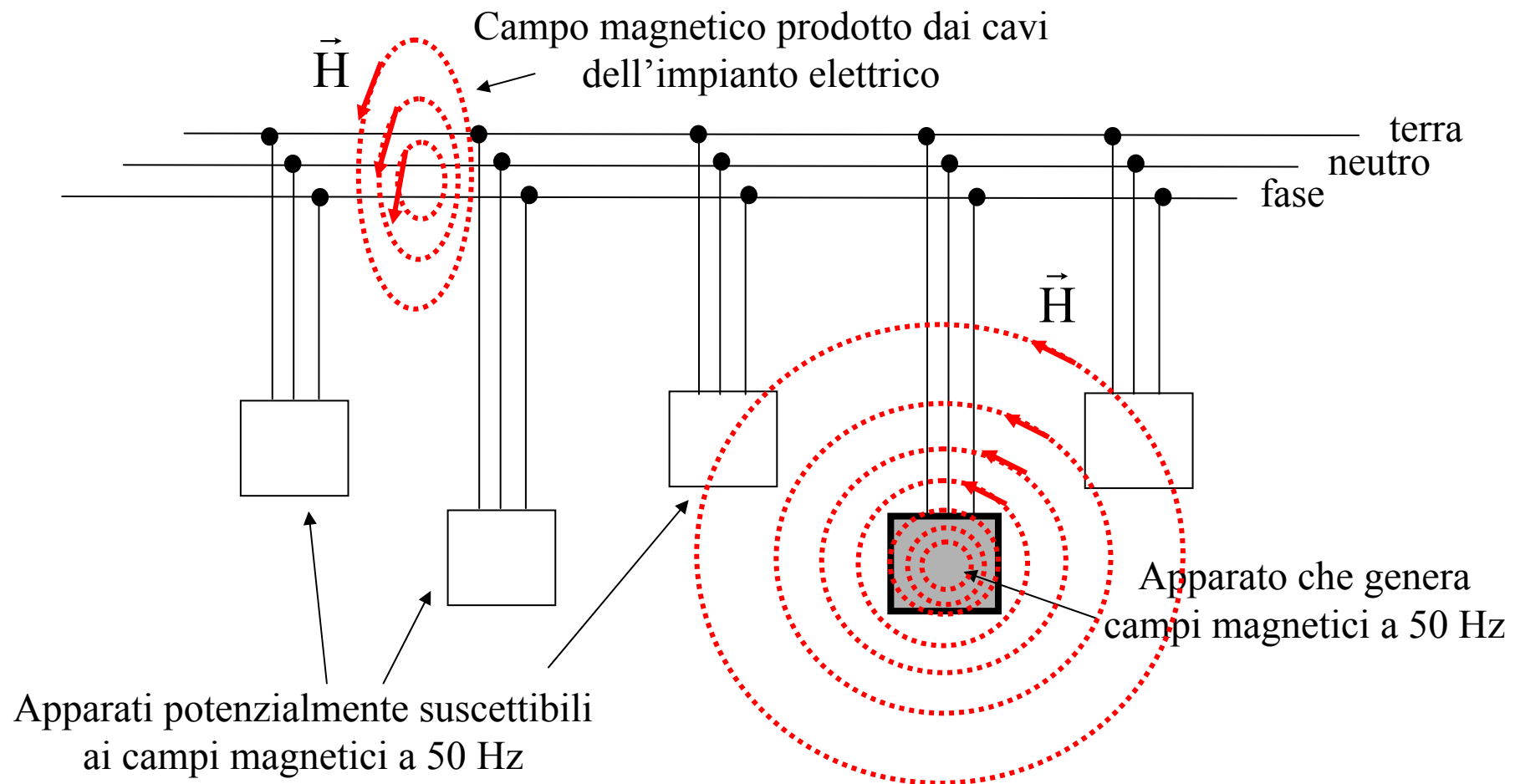
Suscettibilità radiata a radiofrequenza, (CEI EN 61000 - 4 - 3)

Irradiazione dell'EUT applicando la modulazione sopra specificata

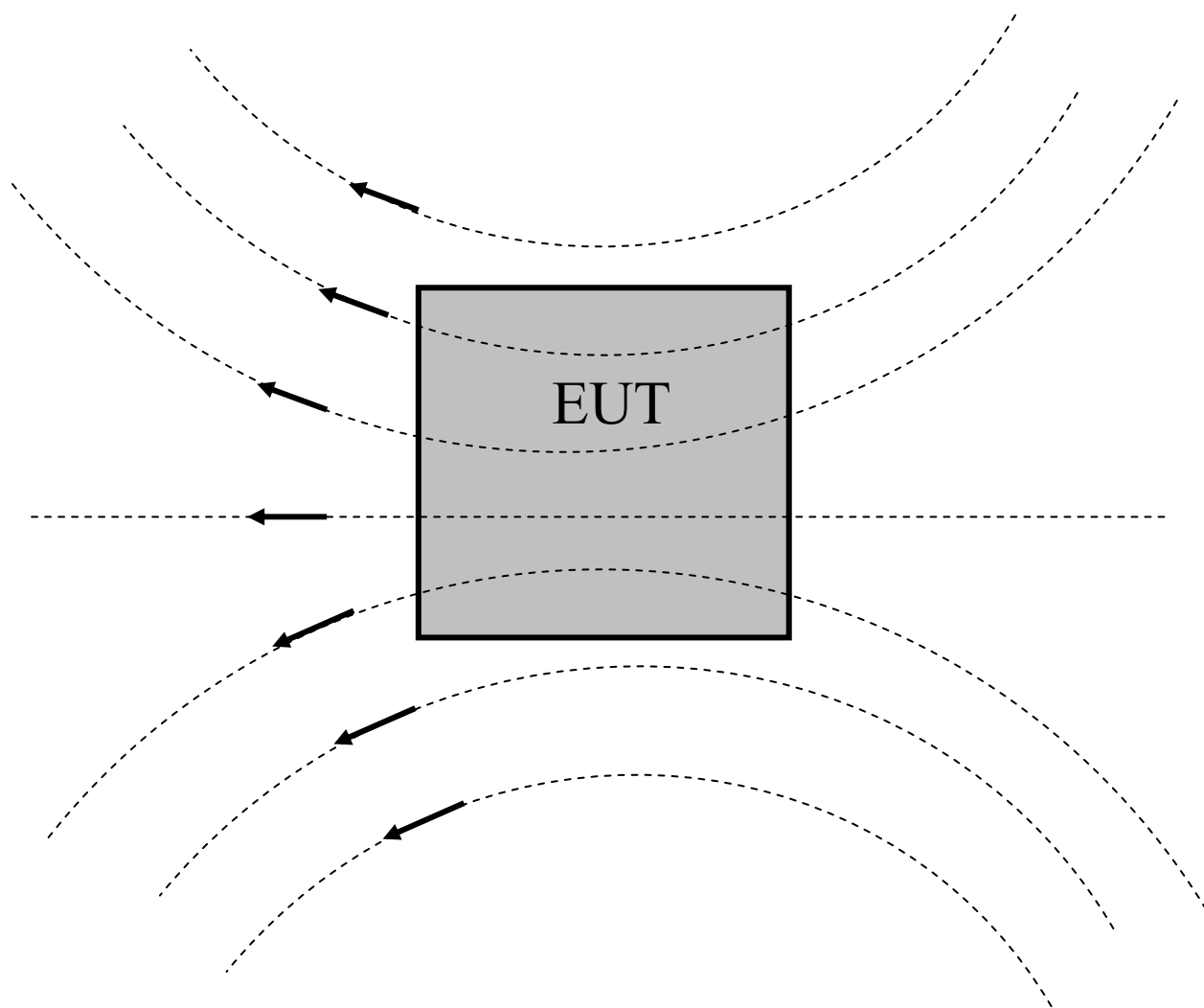


Suscettibilità radiata a 50 Hz

Un apparato elettrico può essere suscettibile a campi magnetici a 50 Hz prodotti da altri apparati o da impianti elettrici.



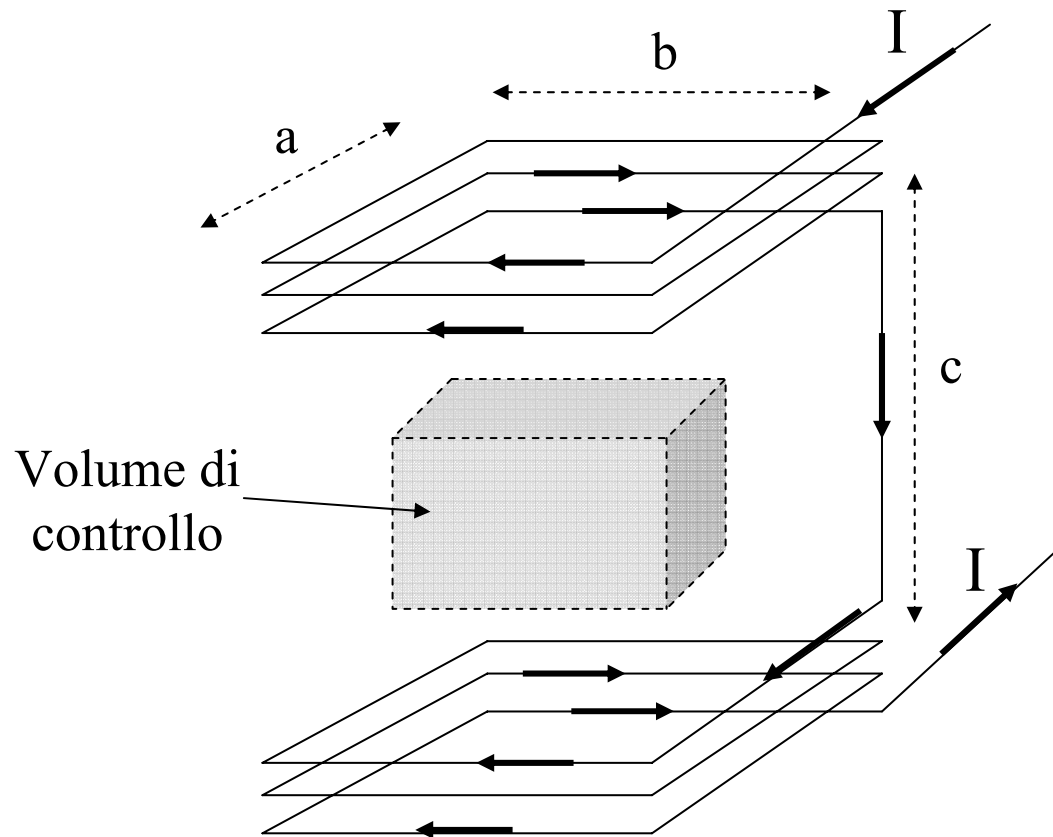
Suscettibilità radiata a 50 Hz, (CEI EN 61000 - 4 - 8)



Le normative che regolano le prove di immunità radiata a 50 Hz di apparecchiature utilizzate in ambienti domestici commerciali ed industriali prevedono di immergere l'EUT in un campo magnetico a 50 Hz uniforme su tutto il suo volume e pari a 3 A/m

Suscettibilità radiata a 50 Hz, (CEI EN 61000 - 4 - 8)

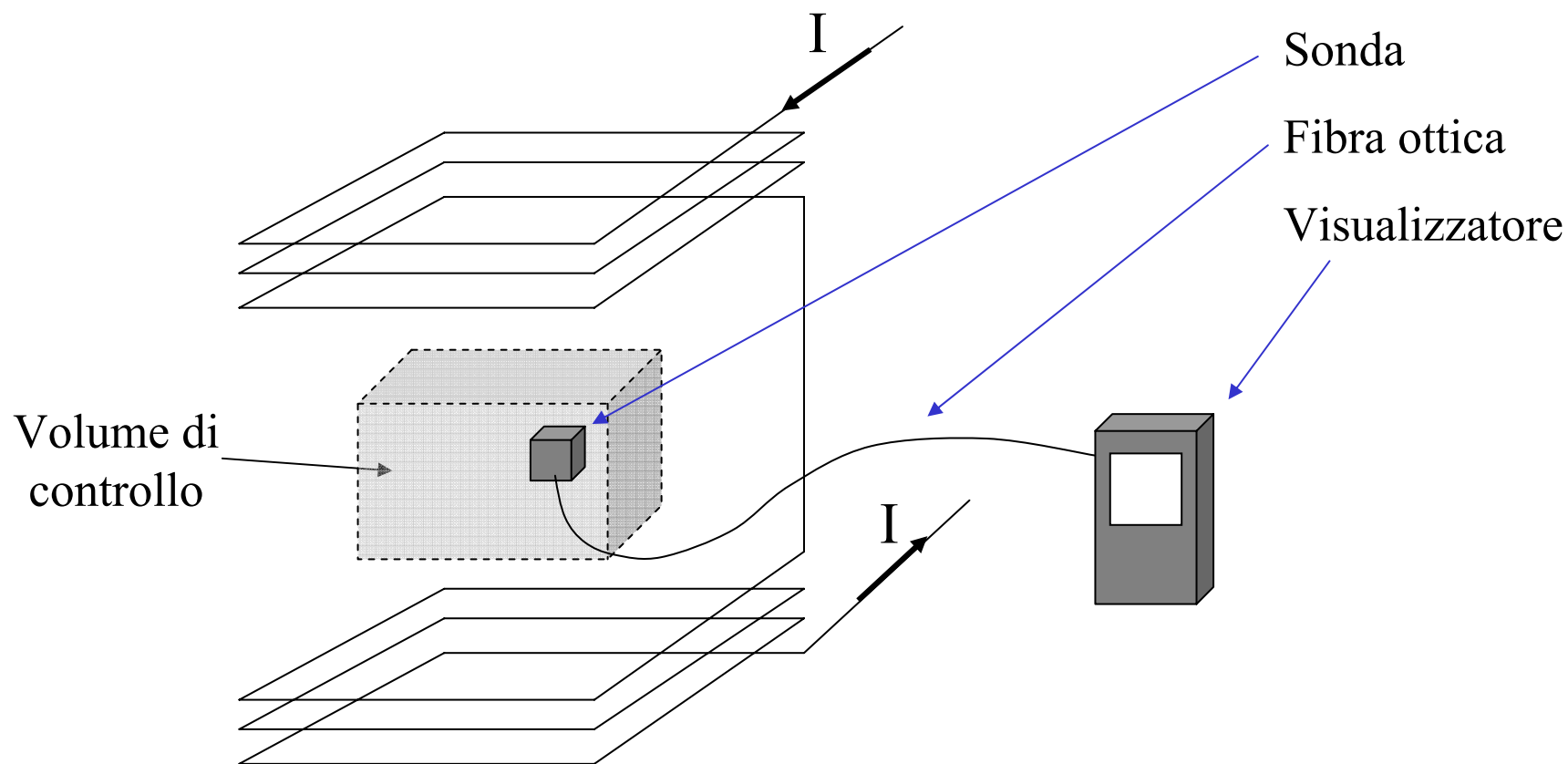
Per generare un campo magnetico uniforme su di un dato volume è possibile utilizzare degli “Helmoltz coil”



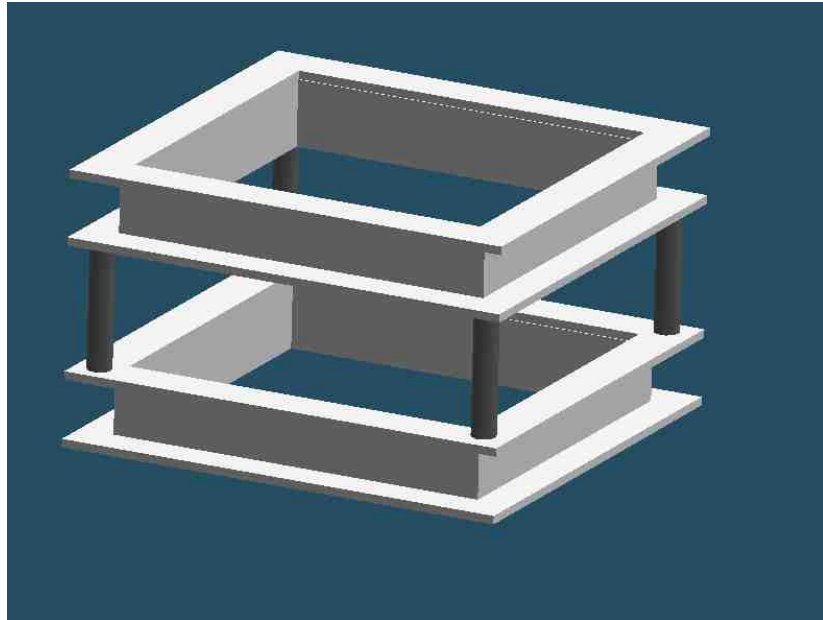
Scegliendo opportunamente i parametri a , b , c , I (corrente a 50 Hz) e n (numero di spire) è possibile ottenere un campo magnetico dell'intensità voluta e con un grado di uniformità all'interno del volume di controllo sufficientemente elevato per l'esecuzione del test.

Suscettibilità radiata a 50 Hz, (CEI EN 61000 - 4 - 8)

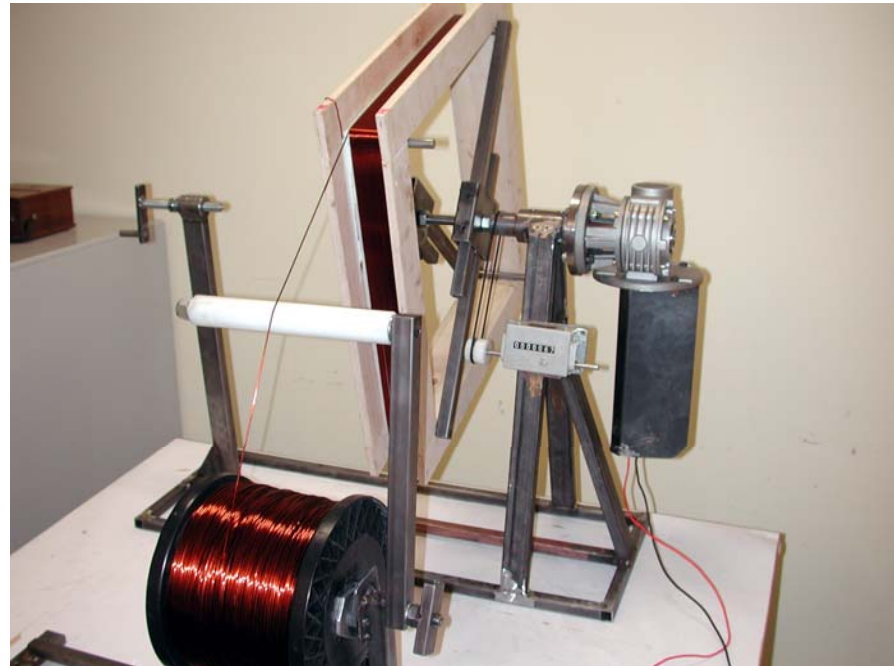
L'uniformità di campo all'interno del volume di controllo viene verificata usando un misuratore di campo



Suscettibilità radiata a 50 Hz, (CEI EN 61000 - 4 - 8)



Realizzazione di un
“Helmoltz coil”



Misuratori di campo a banda larga per alta frequenza, 100 kHz - 18 GHz



Sensore

Visualizzatore

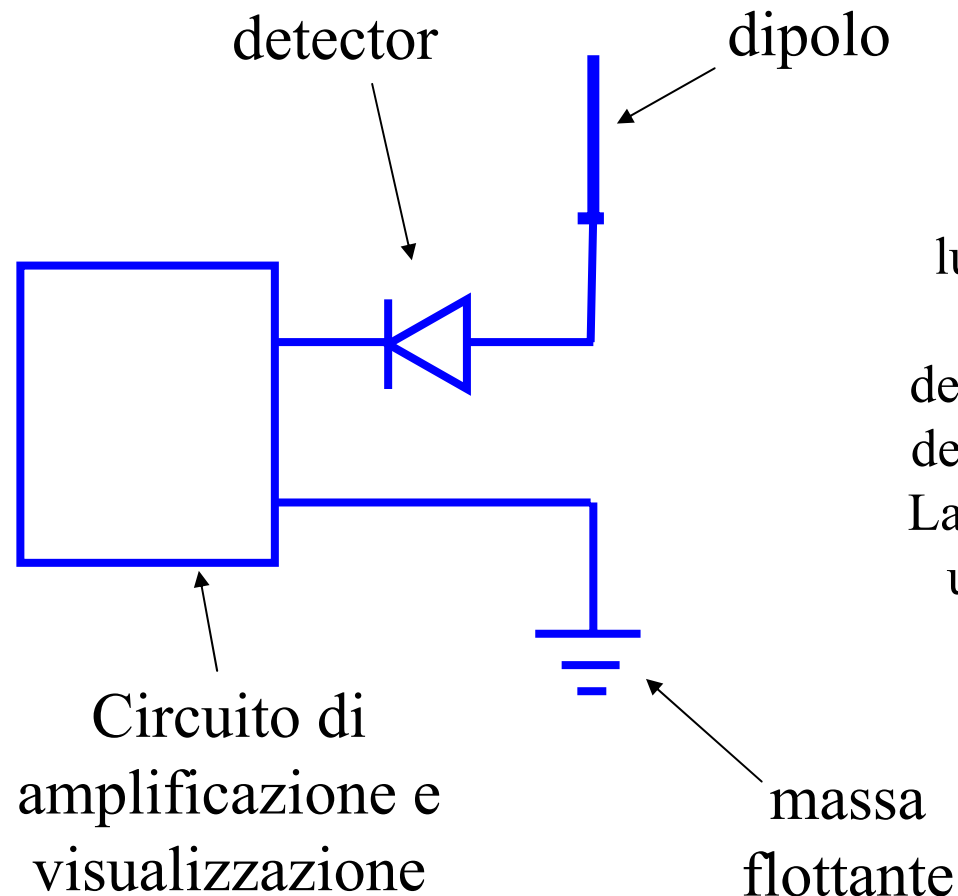
Sostegno in legno e plastica

Il valore di campo elettrico visualizzato può essere considerato come la somma quadratica di tutte le componenti spettrali incidenti sulla sonda:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2}$$

Misuratori di campo a banda larga per alta frequenza, 100 kHz - 18 GHz

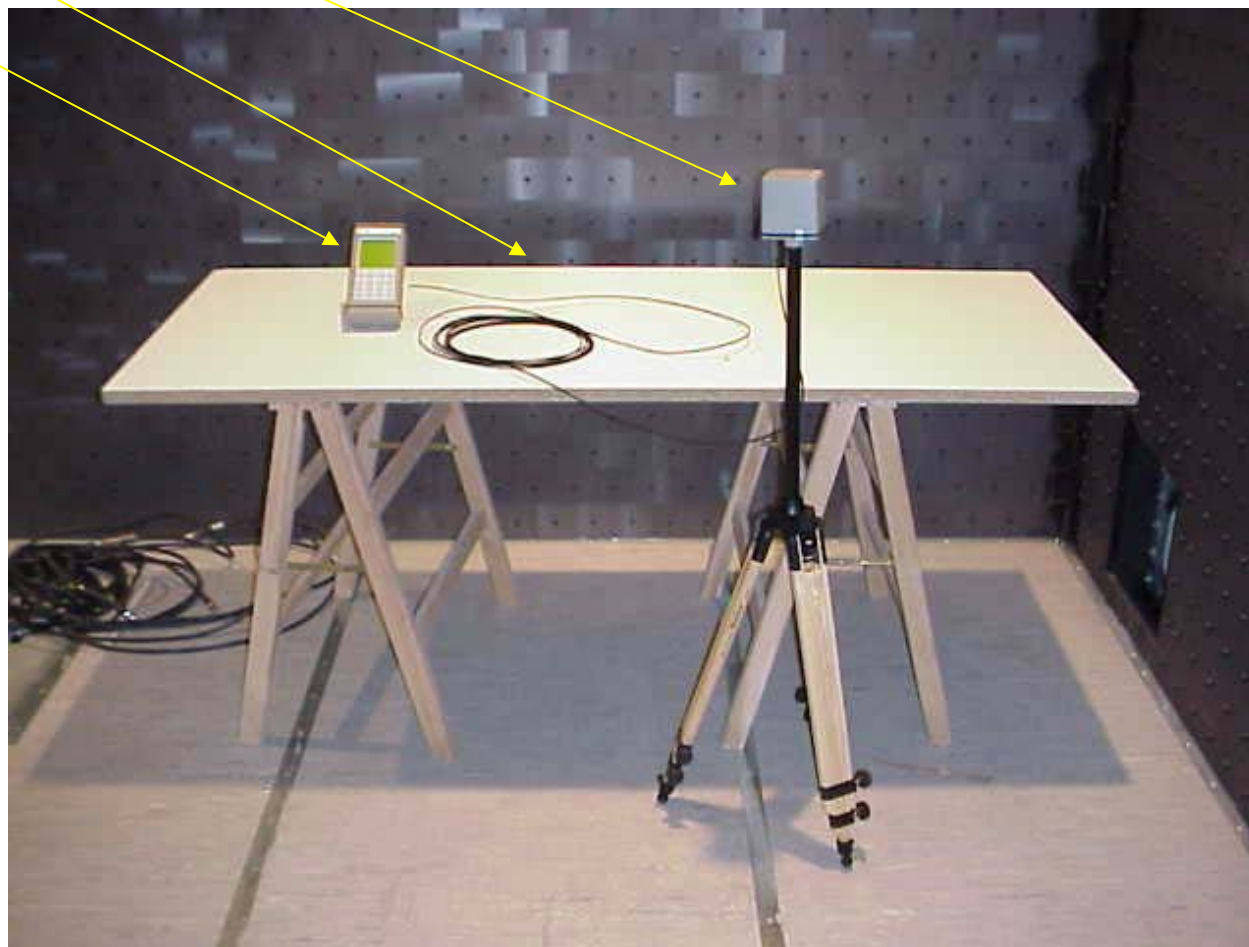
Principio di funzionamento:



La sonda contiene generalmente tre dipoli per captare il campo elettrico lungo tre assi. Ogni dipolo è collegato ad un detector a diodi, tutti i segnali derivanti da tutte le componenti spettrali del campo elettrico vengono raddrizzati. La loro sovrapposizione viene inviata ad un circuito di amplificazione e poi di visualizzazione su di un display

Misuratori di campo a banda larga per bassa frequenza, 5 Hz - 100 kHz

Sonda
Fibra ottica
Visualizzatore



Misuratori di campo a banda larga per bassa frequenza, 5 Hz - 100 kHz

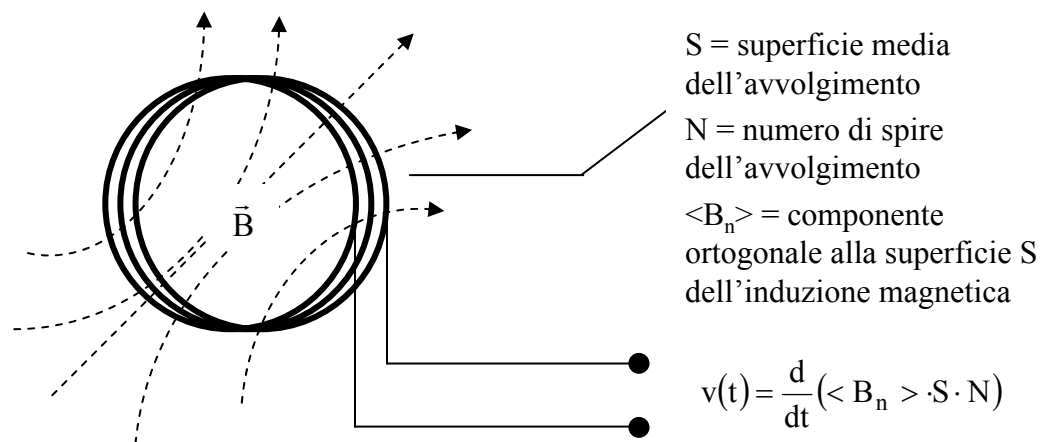
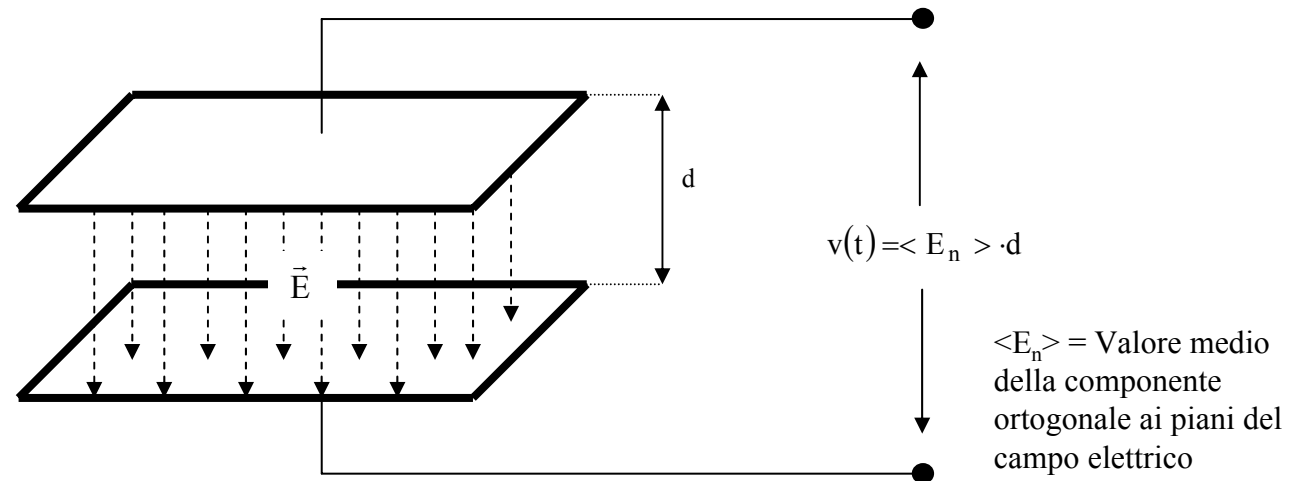
Principio di funzionamento:

Per il campo elettrico sono presenti tre sonde capacitive dirette lungo tre assi

Per il campo magnetico sono presenti tre sonde induttive dirette secondo i tre assi

Può essere visualizzato il valore totale derivante dalla sovrapposizione di tutti i contributi spettrali

Su alcuni modelli è presente un DSP (Digital Signal Processor) che permette la visualizzazione dello spettro



Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici

I sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici servono:

- a ridurre i fenomeni di emissione troppo intensi da parte di una apparecchiatura elettrica.
- a ridurre la suscettibilità di una apparecchiatura elettrica dall'azione di un campo elettromagnetico esterno.
- a creare un ambiente protetto da campi elettromagnetici esterni.

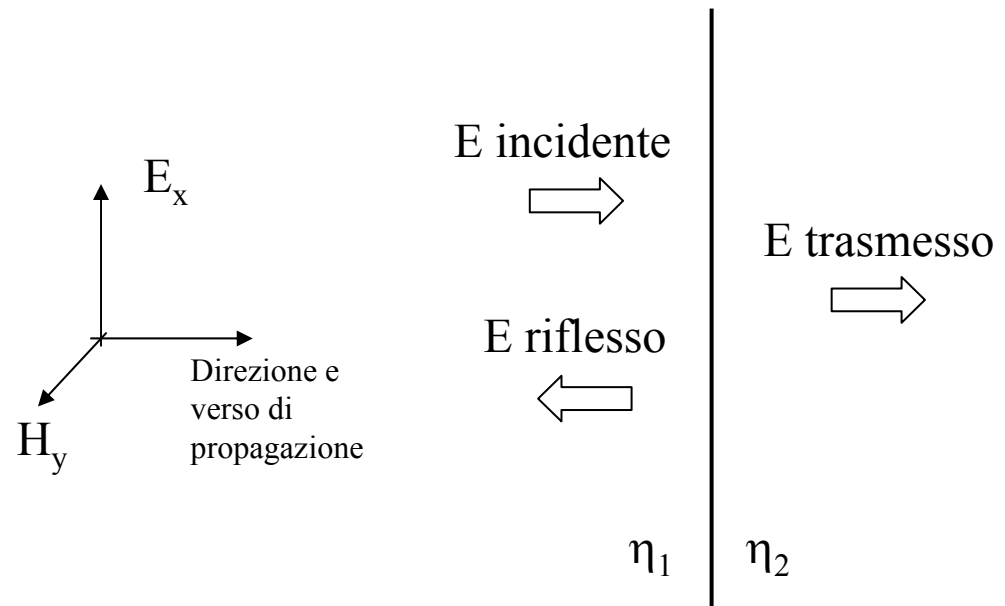
I sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici si realizzano con modalità e materiali diversi per i seguenti casi:

- campi elettromagnetici a radiofrequenza e microonde
- campi elettromagnetici a regime statico o quasi-statico

Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - Radiofrequenza e microonde

$$\bar{\eta} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad \dot{\Gamma} = \frac{\dot{E}_{\text{riflesso}}}{\dot{E}_{\text{incidente}}} = \frac{\dot{\eta}_2 - \dot{\eta}_1}{\dot{\eta}_2 + \dot{\eta}_1}$$

Per realizzare uno schermo efficiente bisogna utilizzare un materiale che abbia una impedenza intrinseca molto diversa da quella dell'aria. I materiali metallici avendo una elevata conducibilità elettrica soddisfano bene questa condizione.



Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - Radiofrequenza e microonde

L'efficienza di schermatura è definita come :

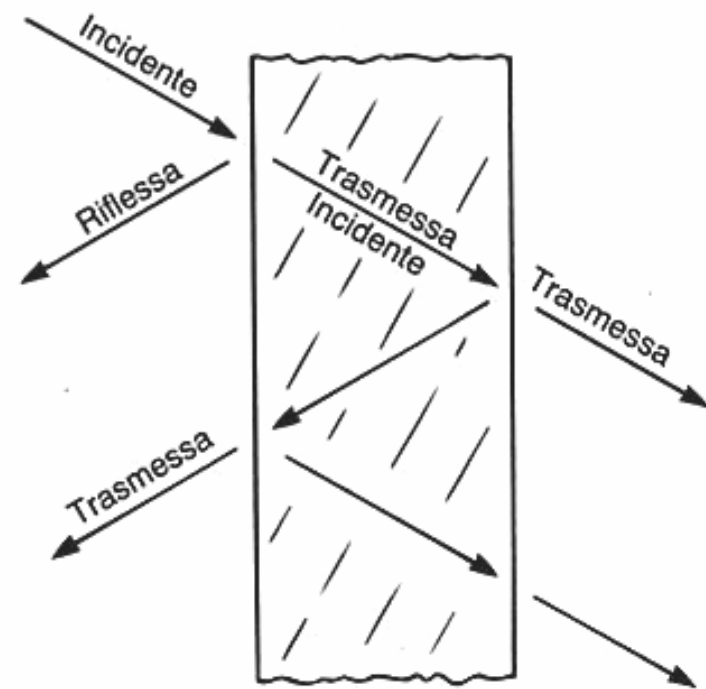
$$SE=20\log_{10} \frac{|\hat{E}_{\text{incidente}}|}{|\hat{E}_{\text{trasmesso}}|}$$

Componenti dell'efficienza di schermatura:

$$SE \text{ [dB]} = R \text{ [dB]} + A \text{ [dB]} + M \text{ [dB]}$$

dove:

- R [dB] perdite per riflessione
- A [dB] perdite per assorbimento
- M [dB] perdite per riflessione multiple.



Per ridurre i fenomeni di emissione e suscettibilità radiata di una apparecchiatura elettrica, si chiude la stessa all'interno di un involucro metallico.

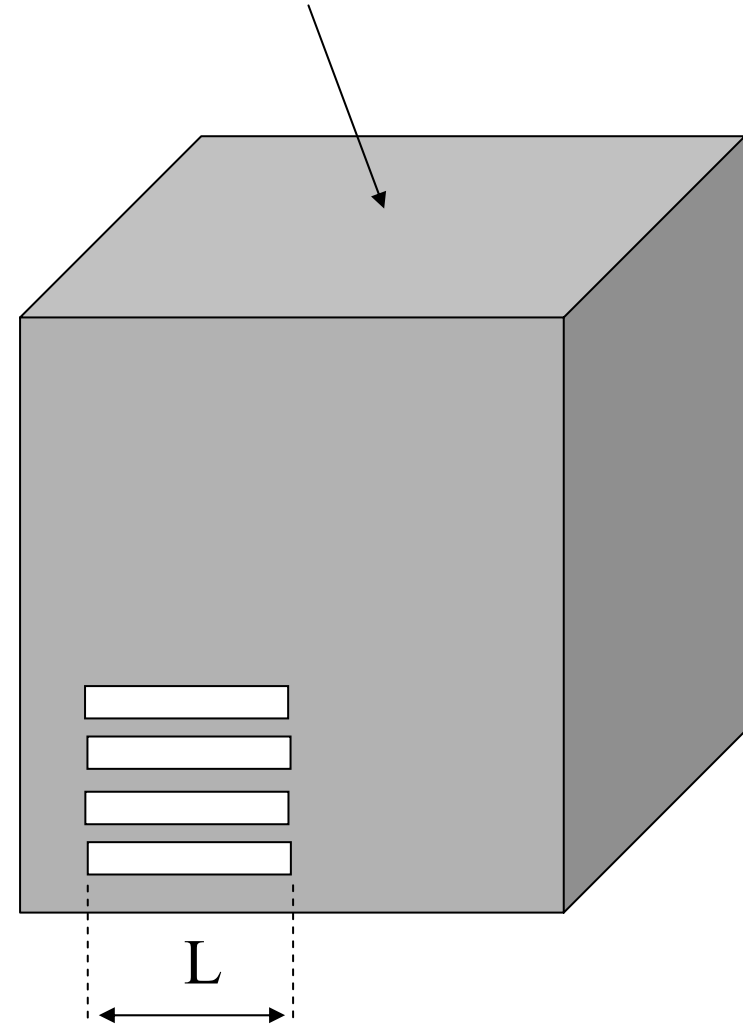
Nella realizzazione di questi involucri bisogna prestare attenzione:

- alle aperture, a volte indispensabili per lo scambio termico con l'esterno,
- ai passaggi dei cavi di alimentazione e segnale per l'alimentazione dell'apparato e lo scambio dati con l'esterno.
- alla presenza di eventuali portelli apribili.

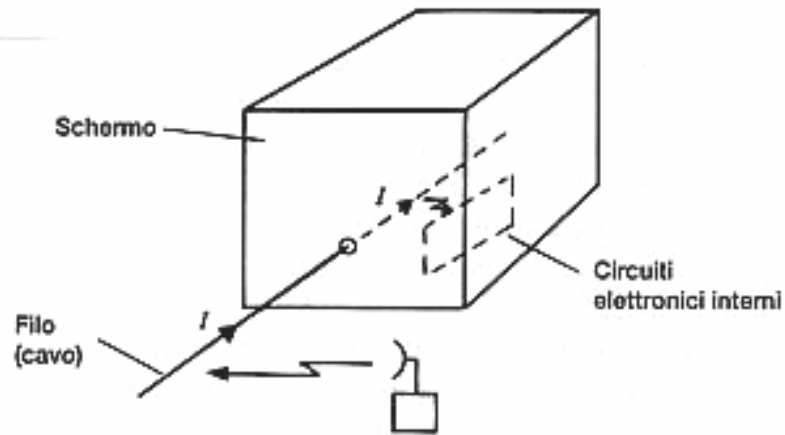
Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - Radiofrequenza e microonde

Per ottenere una schermatura efficiente la dimensione “L” delle aperture sull’involucro non deve superare metà lunghezza d’onda della radiazione elettromagnetica incidente.

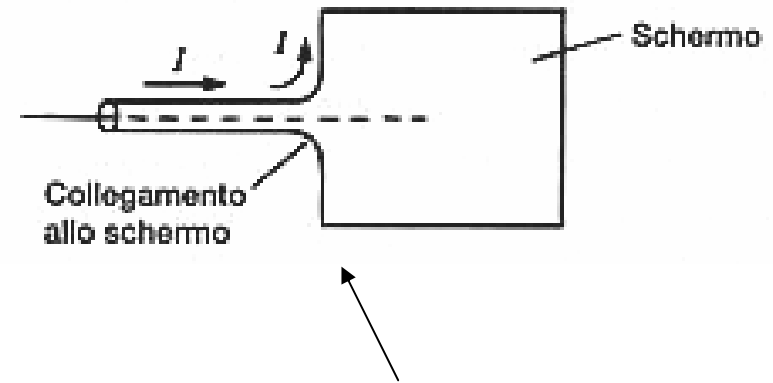
Struttura schermante



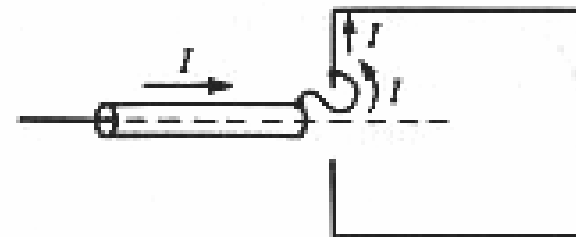
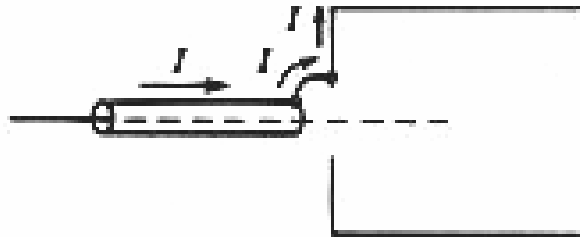
Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - Radiofrequenza e microonde



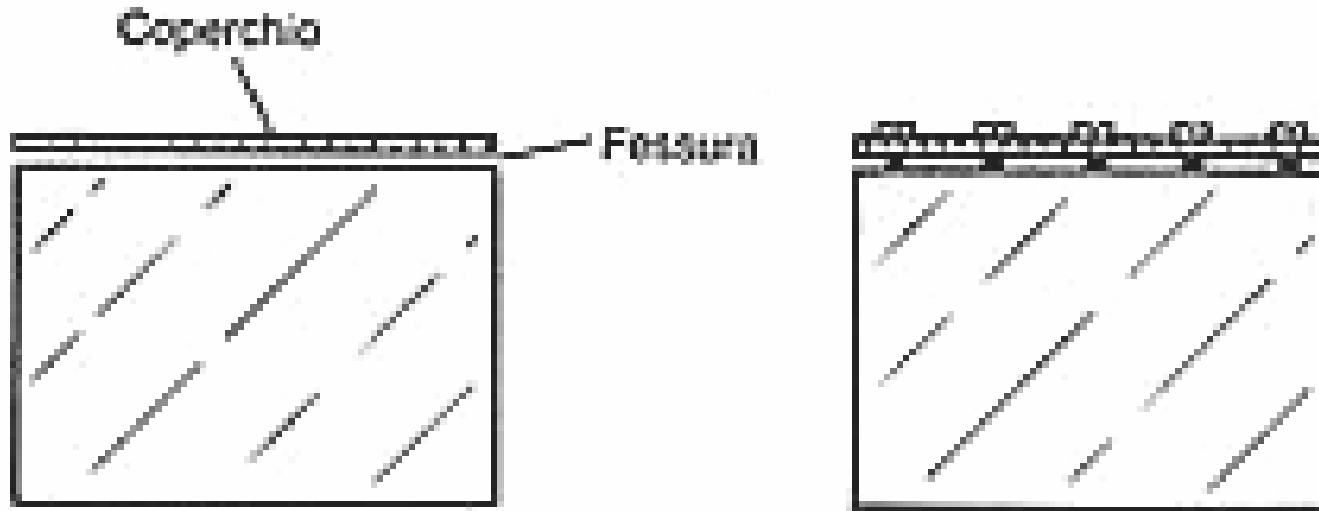
Configurazione potenzialmente suscettibile



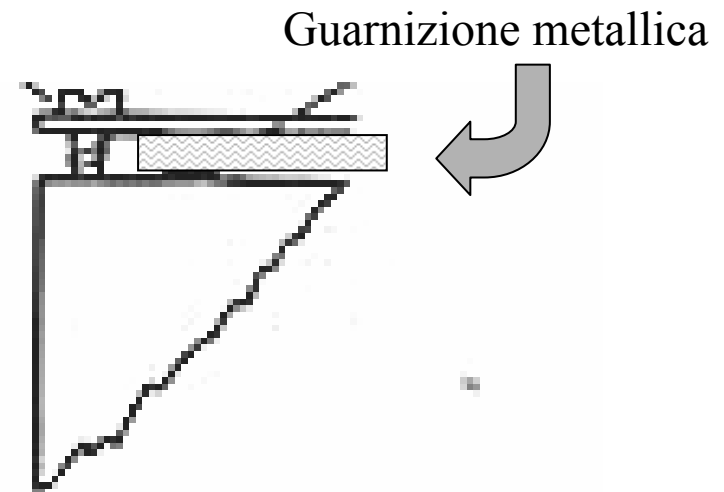
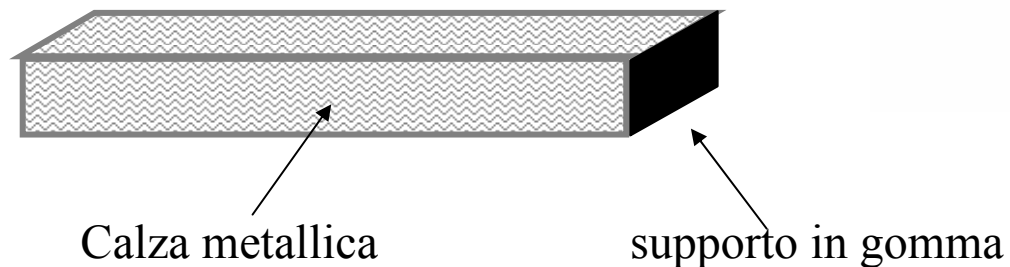
Possibili soluzioni



Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - Radiofrequenza e microonde

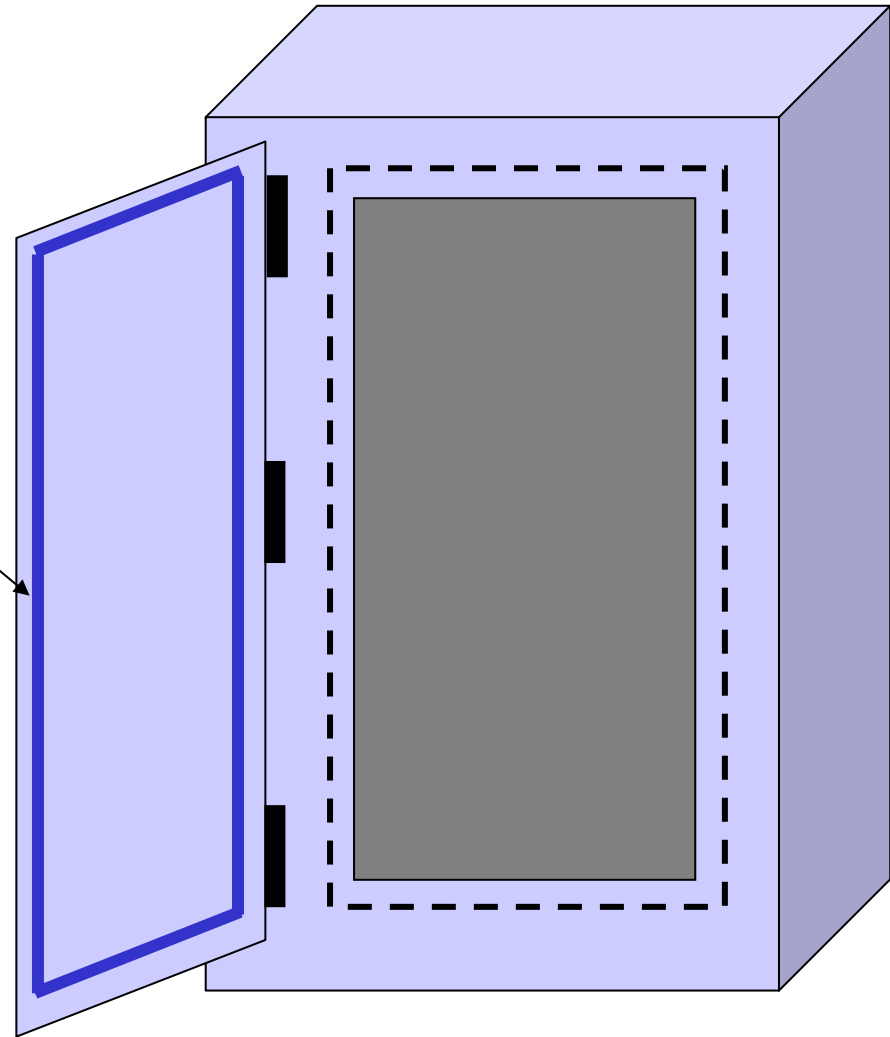


Nell'assemblaggio di involucri schermanti i pannelli vanno stretti gli uni sugli altri frapponendo una guarnizione metallica (es.: calza metallica su supporto in gomma)



Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - Radiofrequenza e microonde

La guarnizione, chiamata generalmente guarnizione EMI (Electromagnetic Interferences), diventa indispensabile per garantire la tenuta su porte e pannelli apribili.



Per le camere schermate, gli shelter, le cabine e i box da utilizzare come contenitori a tenuta EMI per apparecchiature elettroniche, esistono specifiche normative che indicano le procedure di test per verificarne le prestazioni.

Ad esempio:

- CEI EN 50147-1
- MIL-STD-285
- IEEE std 299 - 1997

Generalmente la procedura di test prevede l'uso di una antenna emittente e una ricevente, di una misura tra le due antenne in assenza di schermo e di una seconda misura in presenza di schermo. La variazione di segnale è un indice dell'efficienza di schermatura

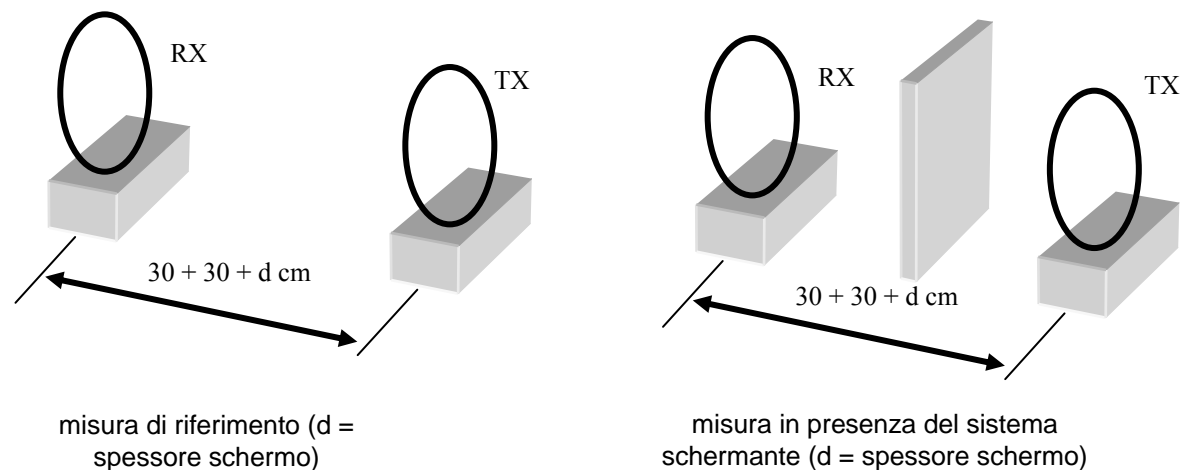
Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - verifiche e normative

Efficienza di schermatura (SE) = P_r [dBm] – P_s [dBm]

dove

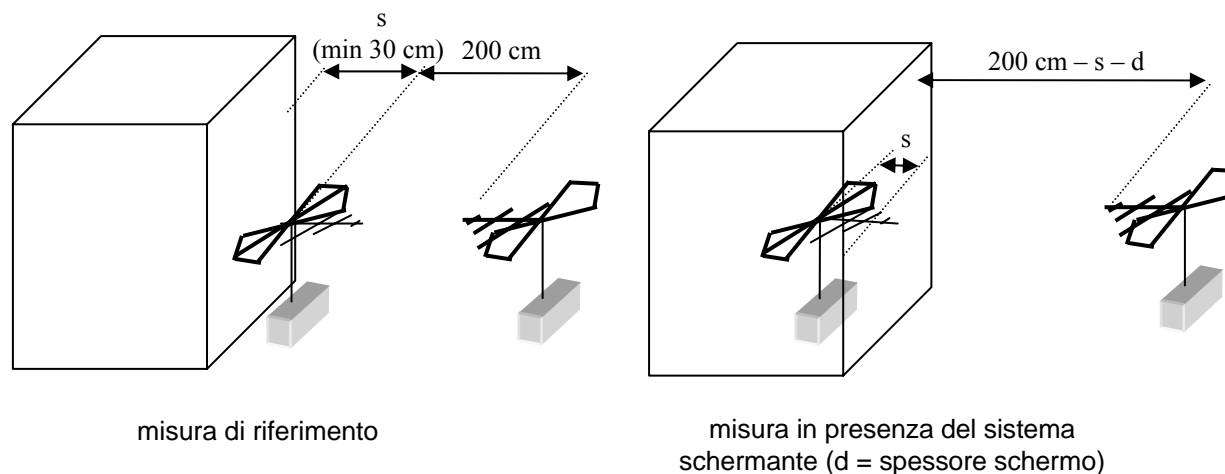
P_r = potenza misurata dall'antenna ricevente in assenza di schermo,

P_s = potenza misurata dall'antenna ricevente in presenza di schermo

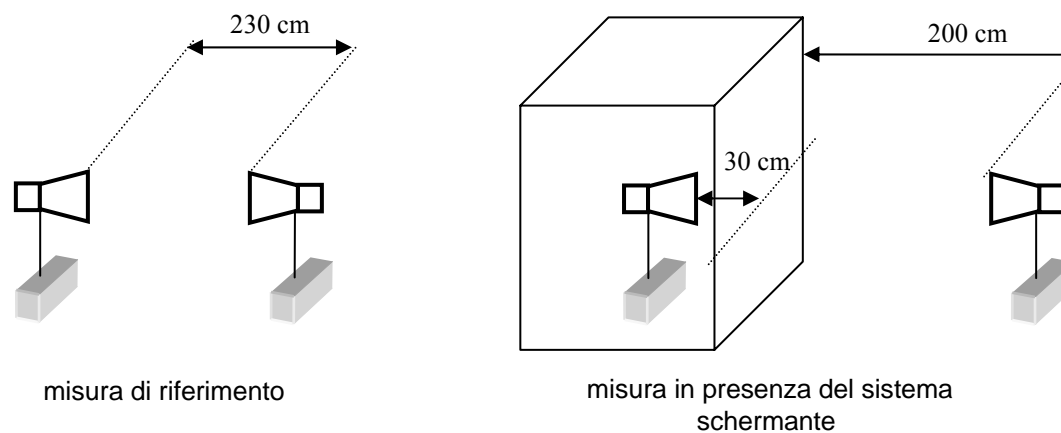


Misura di SE di campo magnetico tipicamente nella banda 10 kHz – 30 MHz

Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - verifiche e normative



Misura di SE di campo elettrico tipicamente nella banda 20 MHz – 1 GHz



Misura di SE di campo elettrico tipicamente nella banda 1 GHz – 10 GHz

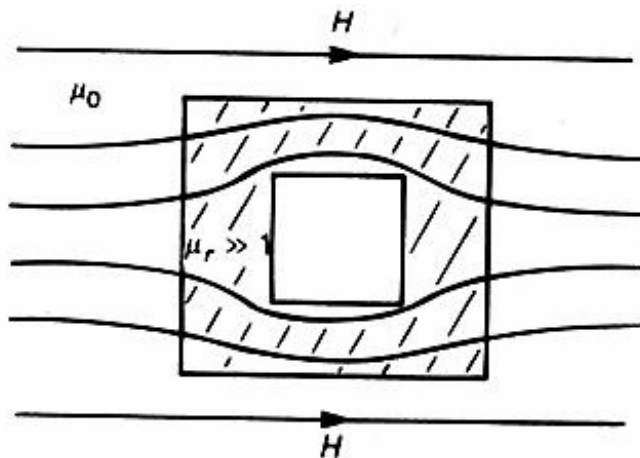
Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - regime statico o quasi statico

A bassa frequenza (indicativamente DC – 100 kHz) è molto semplice schermare il campo elettrico, lo è meno per il campo magnetico.

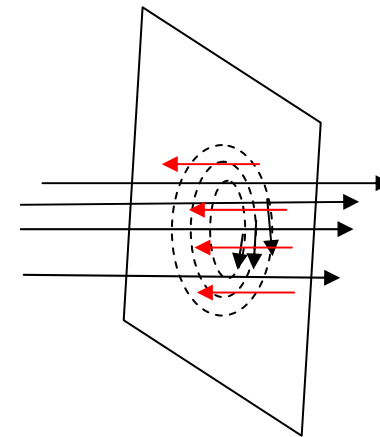
Il fenomeno fisico che regola l'efficacia di schermatura è completamente diverso dalle radiazioni ad alta frequenza.

Vi sono due modalità per schermare il campo magnetico:

- 1) Usare materiali ad elevata permeabilità magnetica in modo da deviare al proprio interno le linee di flusso magnetico (fig. a)
- 2) Usare un materiale ad elevata conducibilità elettrica in modo da permettere la generazione di correnti indotte che creano un flusso magnetico antagonista (fig. b).



a)

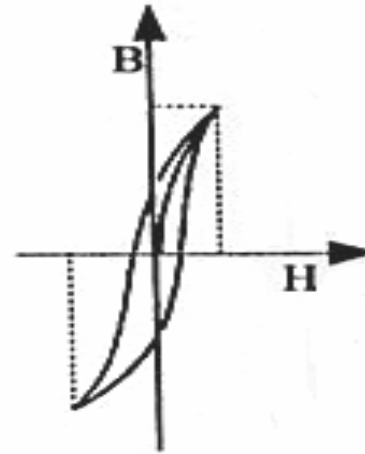


b)

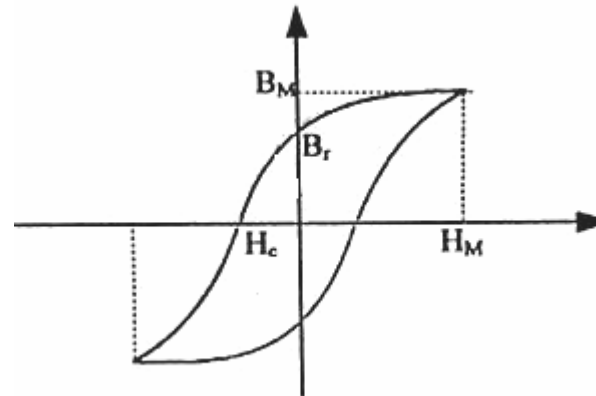
Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - regime statico o quasi statico

I materiali magnetici sono caratterizzati da una elevata permeabilità magnetica

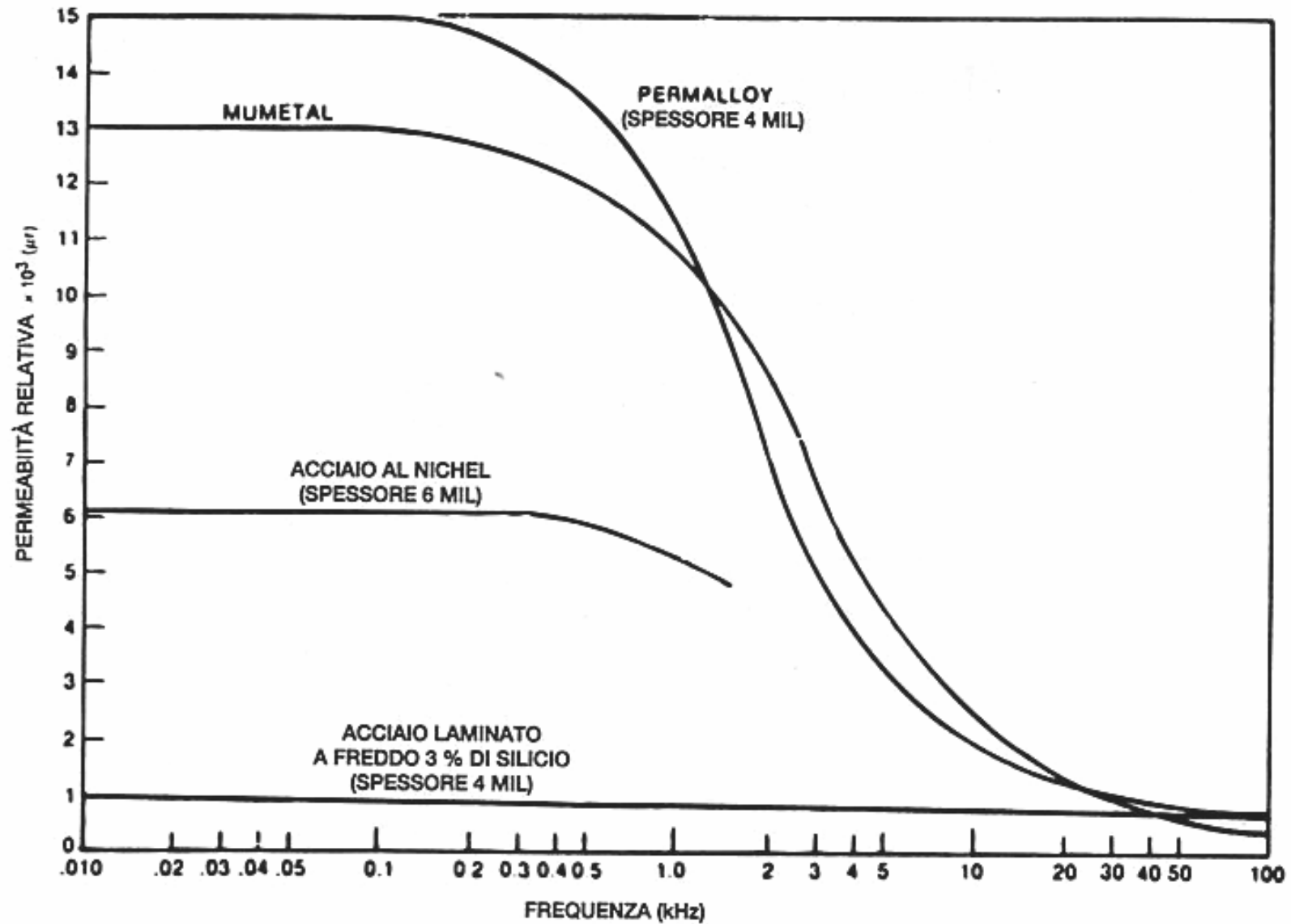
Materiali magnetici dolci:



Materiali magnetici duri:



Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - regime statico o quasi statico

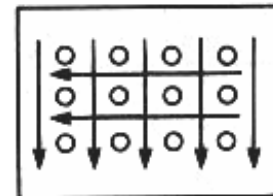
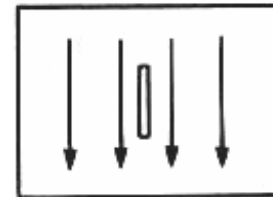
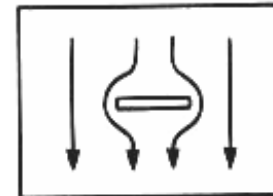
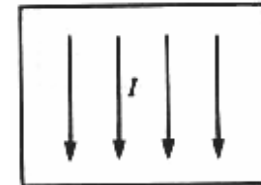


Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - regime statico o quasi statico

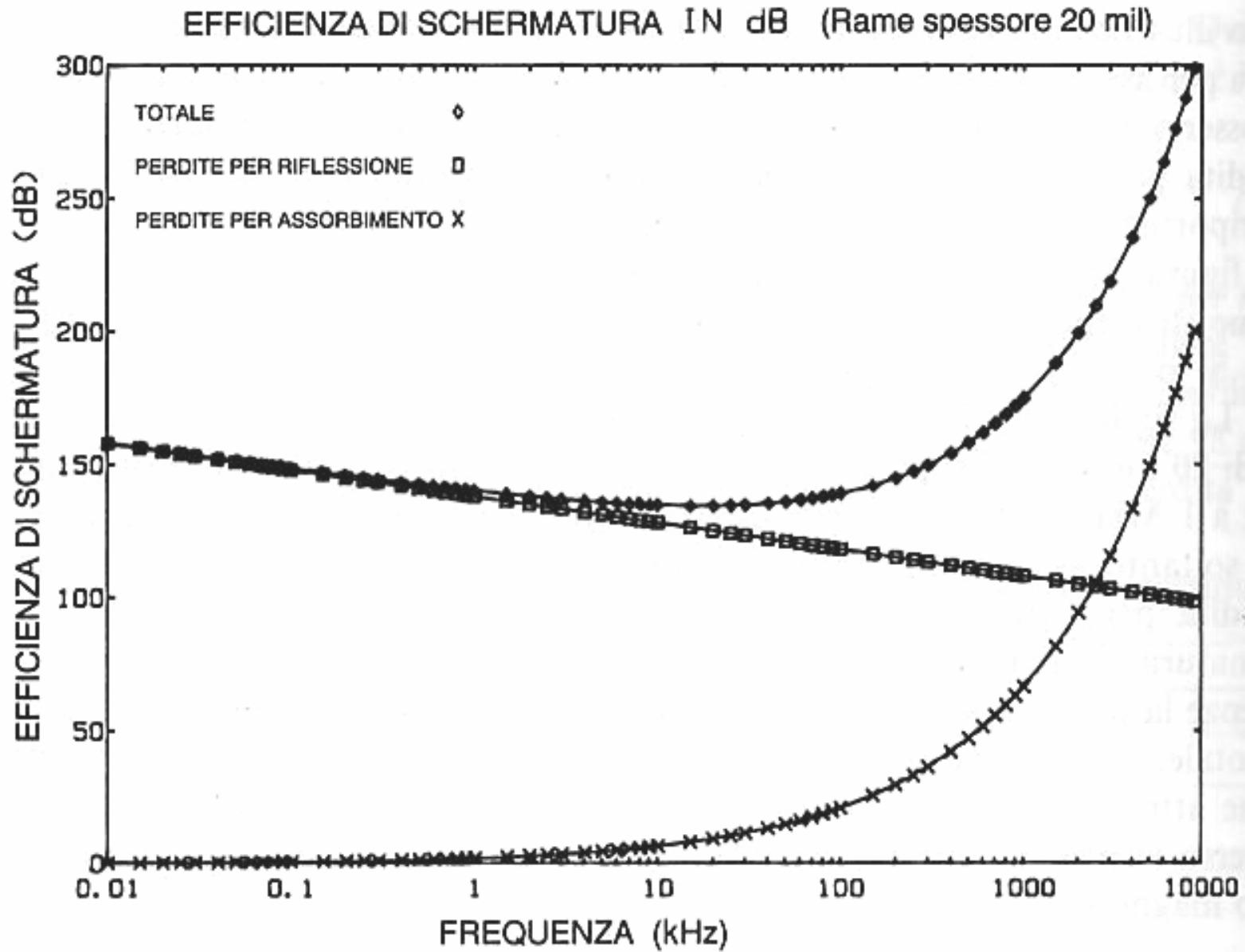
Per le schermature che prevedono l'uso di materiali ad elevata conducibilità elettrica bisogna prestare attenzione alle eventuali aperture.

Se la direzione del campo inquinante è nota bisogna predisporre le aperture in senso parallelo alle correnti indotte in modo da non ostacolarle.

Se non si conosce la direzione del campo inquinante si preferisce predisporre delle aperture a griglia



Sistemi di schermatura dei campi elettromagnetici - regime statico o quasi statico



Gli impianti fissi che generano inquinamento elettromagnetico nell'ambiente si dividono in due categorie:

- 1) Gli impianti per il trasporto, la distribuzione e l'utilizzo dell'energia elettrica che producono campi elettromagnetici a 50 Hz:

elettrodotti, stazioni di trasformazione, cabine elettriche, impianti elettrici industriali e civili.

- 2) Gli impianti di telecomunicazione e radar che producono campi elettromagnetici per frequenze che vanno dal MHz a decine di GHz:

Impianti per la diffusione radiofonica e televisiva, impianti di telefonia cellulare, sistemi radar.

Compatibilità elettromagnetica ambientale

Presidenza del Consiglio dei Ministri
GU n.200 del 30 Agosto 2003

Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 HZ) generati dagli elettrodotti

Nel caso di esposizione a campi elettrici e magnetici alla frequenza di 50 Hz generati da elettrodotti, non deve essere superato il limite di esposizione di **100 μT** per l'introduzione magnetica e **5 kV/m** per il campo elettrico, intesi come valori efficaci.

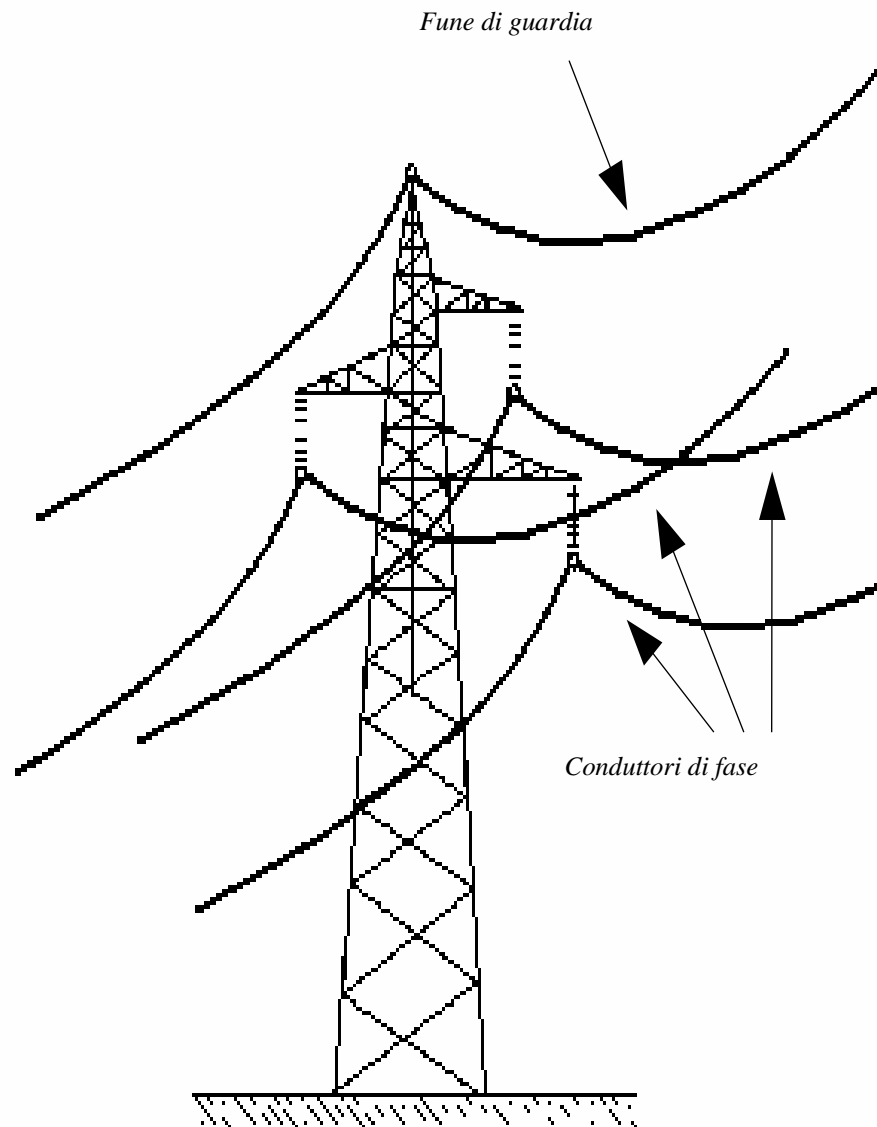
Nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove arre di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz, è fissato l'obiettivo di qualità di **3 μT** per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio

DECRETO 10 settembre 1998, n. 381

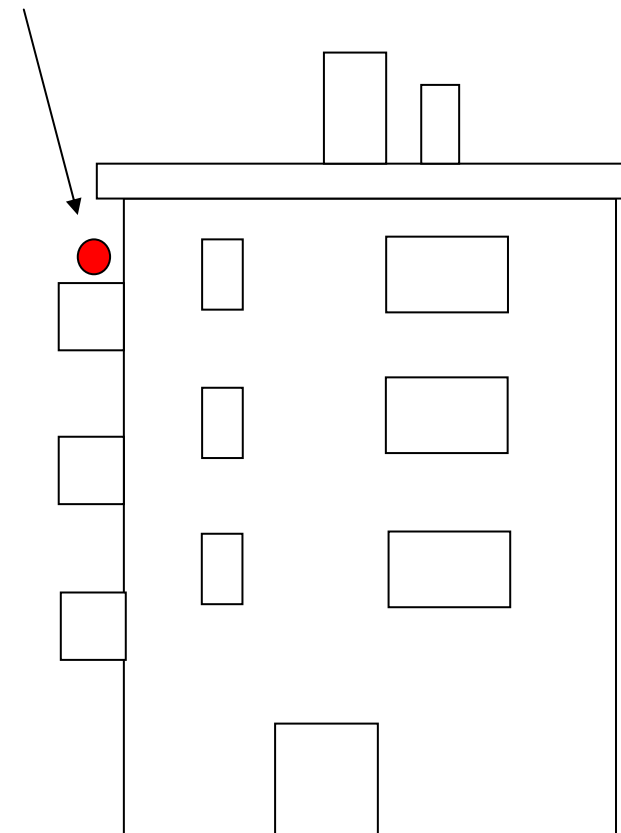
Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana. (pubblicato sulla G.U. n. 257 del 03 novembre 1998)

in corrispondenza di edifici adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore non devono essere superati i seguenti valori, indipendentemente dalla frequenza, mediati su un'area equivalente alla sezione verticale del corpo umano e su qualsiasi intervallo di sei minuti: **6 V/m** per il campo elettrico, **0,016 A/m** per il campo magnetico intesi come valori efficaci

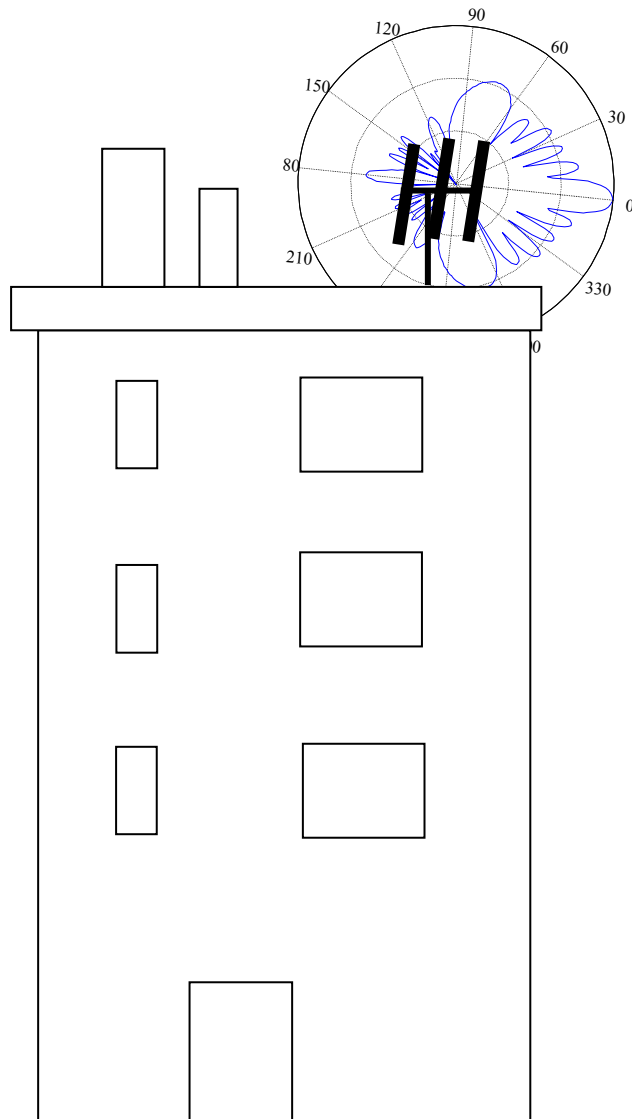
Compatibilità elettromagnetica ambientale



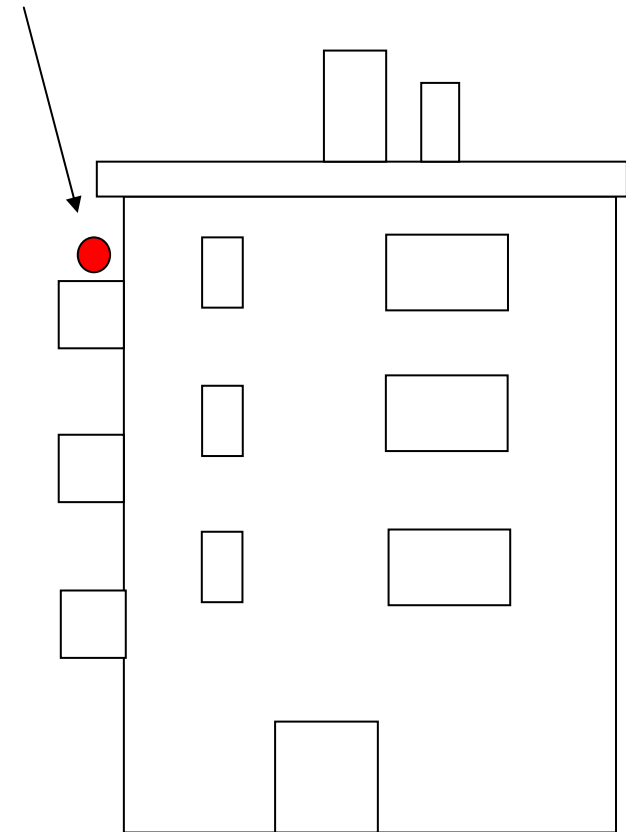
Le verifiche vengono fatte con misuratori di campo elettrico e magnetico nei punti delle abitazioni più prossimi ai conduttori delle linee elettriche



Compatibilità elettromagnetica ambientale



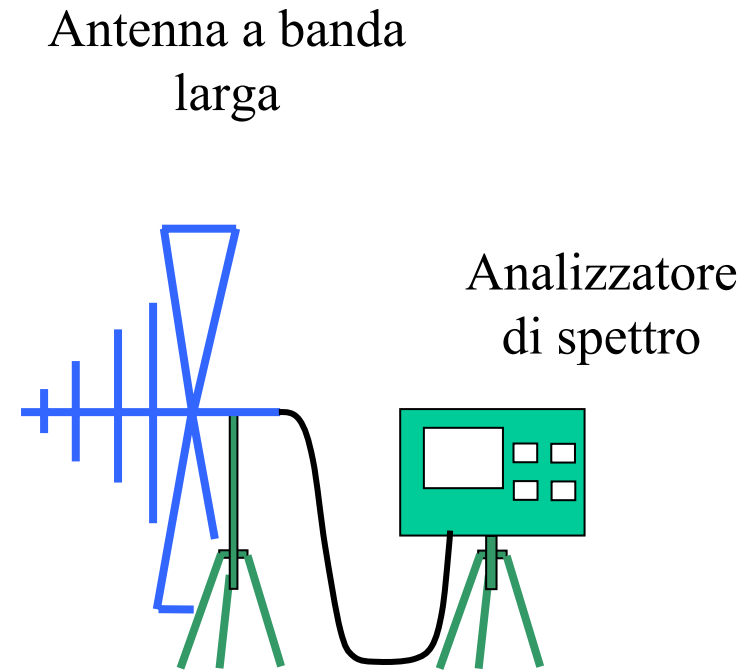
Le verifiche vengono fatte con misuratori di campo elettrico e magnetico nei punti delle abitazioni più prossime al campo d'azione del lobo principale dell'antenna.



Compatibilità elettromagnetica ambientale

Se il misuratore di campo rileva un valore di campo elettrico superiore a quello limite indicato dalla normativa, per individuare il contributo di ogni singola emittente bisogna utilizzare un antenna a banda larga e un analizzatore di spettro.

Dopo questa analisi è possibile avviare un'azione di risanamento.

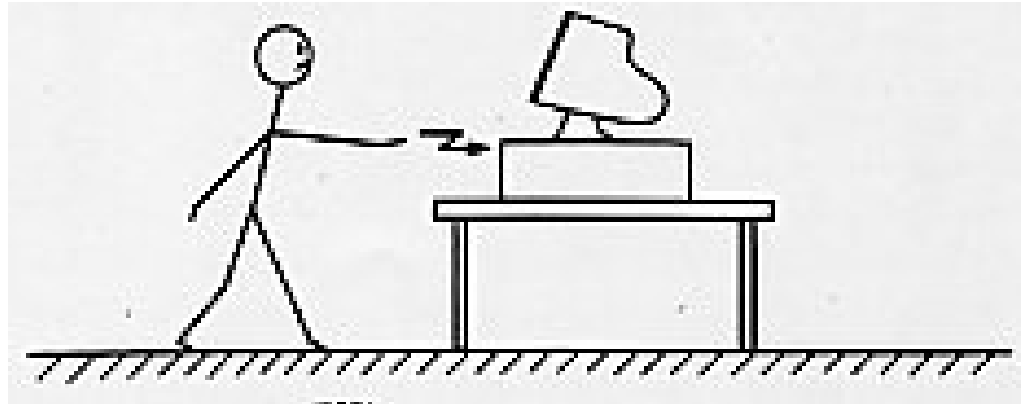


Unità didattica:

Scariche elettrostatiche.

Scariche elettrostatiche

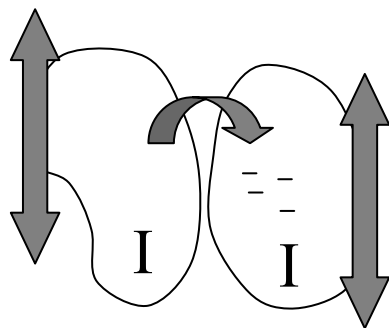
Le scariche elettrostatiche che possono essere indotte dal corpo umano su di una apparecchiatura elettrica possono provocare la rottura di alcuni componenti al suo interno, in particolar modo di componenti elettronici particolarmente delicati e sensibili.



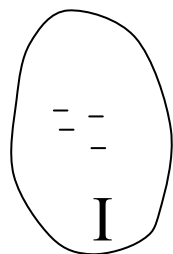
E' di conseguenza necessario proteggere adeguatamente le apparecchiature da questi fenomeni.

Scariche elettrostatiche

Come si genera una scarica elettrostatica ?

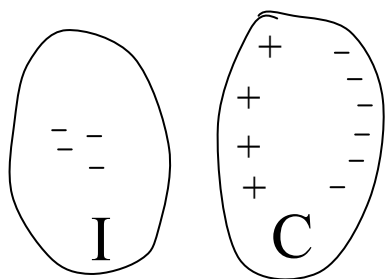


L'azione meccanica di strofinio tra due corpi isolanti può provocare il passaggio di alcune cariche elettriche da uno corpo all'altro.

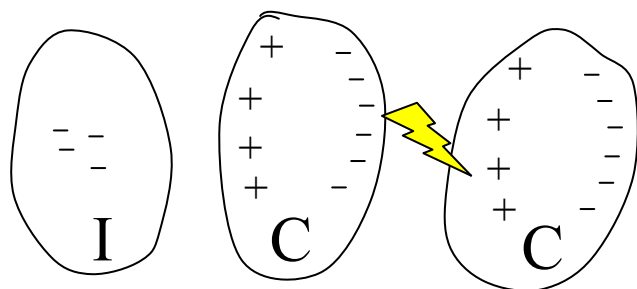


Al termine dell'azione meccanica uno dei due corpi risulta carico elettrostaticamente.

Scariche elettrostatiche



Se in prossimità del corpo carico elettrostaticamente si porta un corpo conduttore su di esso si ha una separazione di cariche per induzione.

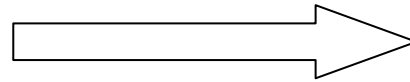


Se si avvicina un secondo corpo conduttore al primo si ha anche su di esso una separazione di cariche e di seguito se la distanza è sufficientemente ravvicinata si ha la scarica elettrostatica (passaggio rapido di cariche da una parte all'altra).

Scariche elettrostatiche

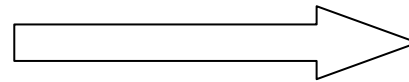
La capacità di un materiale di scambiare cariche elettriche per azione meccanica dipende dalla scala triboelettrica:

Materiali positivi (tendono
a perdere elettroni)



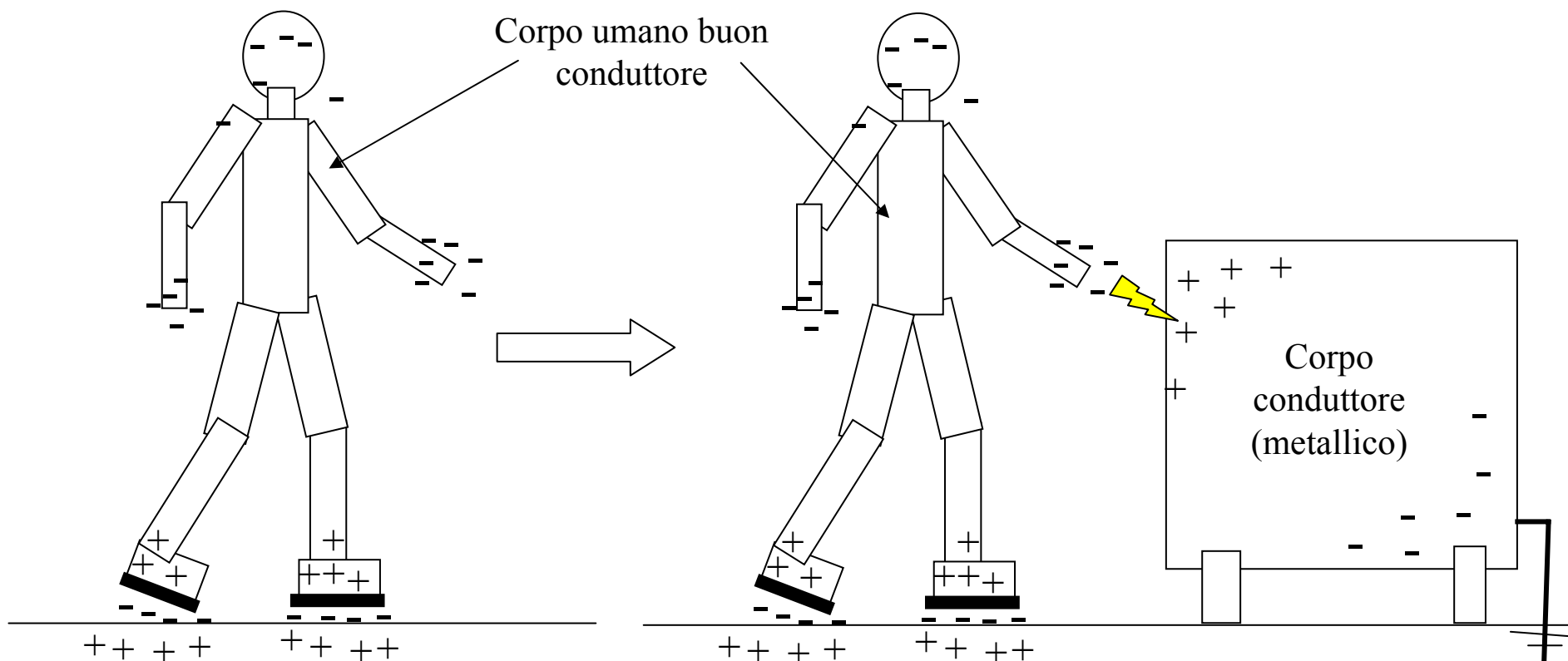
Aria
Amianto
Mica
Nylon
Pelliccia
Seta
Carta
Cotone
Acciaio
Gomma
Vetroresina
Ottone
Acrilico
Poliestere
Orlon
Polietilene
Polipropilene
Silicio
Teflon

Materiali negativi (tendono
ad acquisire elettroni)



Scariche elettrostatiche

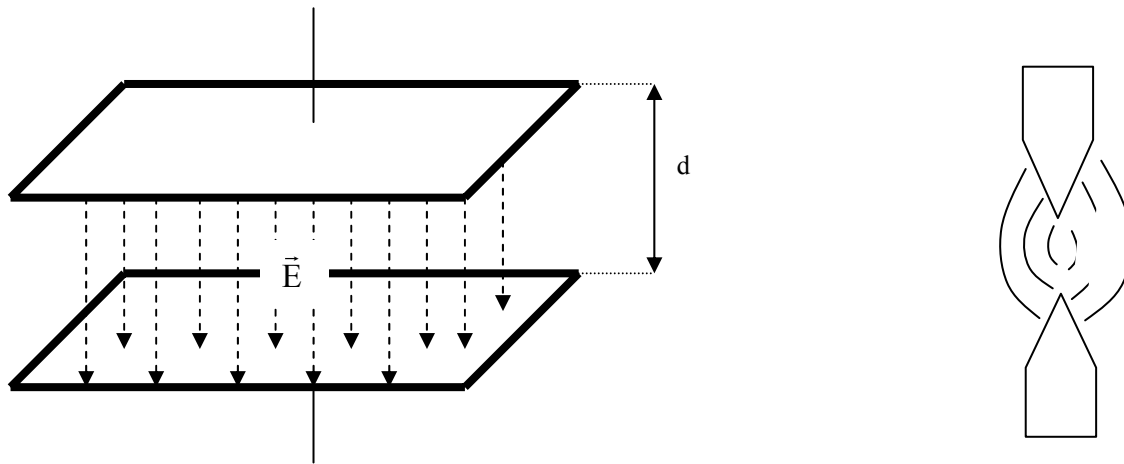
Questo fenomeno avviene molto spesso sul corpo umano, esempio:
una persona che cammina con scarpe con suola di gomma



Scariche elettrostatiche

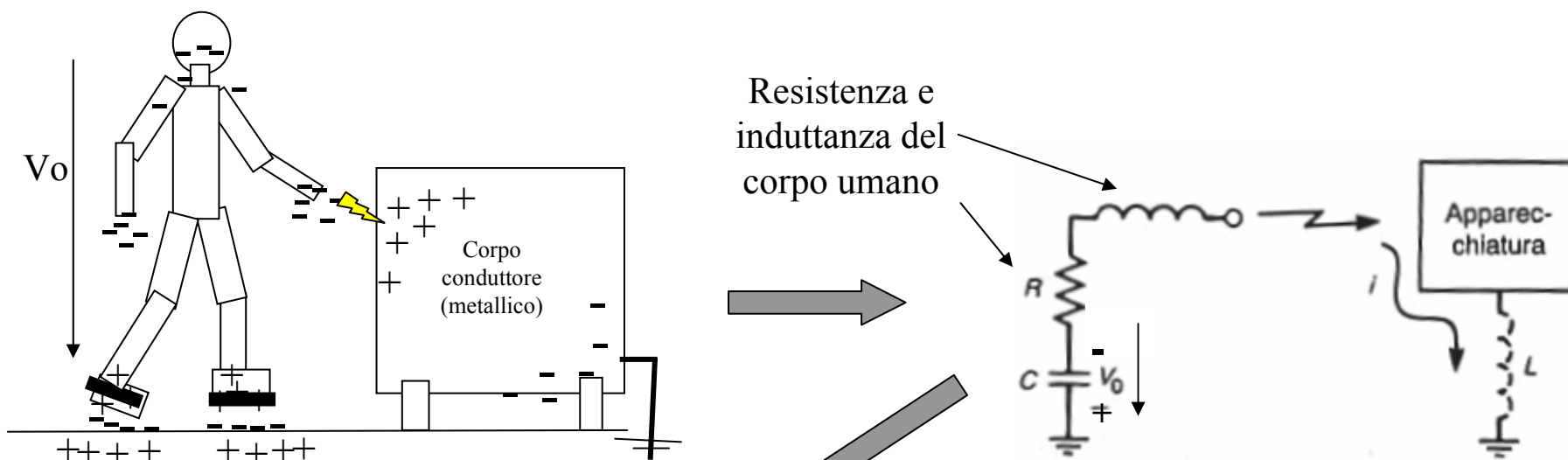
La tensione elettrostatica che si instaura tra corpo umano e apparecchiatura metallica un istante prima della scarica raggiunge alcuni kV.

La rigidità dielettrica dell'aria è di 30 kV/cm, ma questo valore è valido tra due piastre cariche piane e parallele



L'effetto di una geometria a punta (dita umane) rende il campo elettrico non uniforme tanto da favorire la scarica anche con soli pochi kV.

Scariche elettrostatiche



$$V_0 + Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{c} = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i(0) = 0 \quad \text{Condizioni iniziali} \\ L \left(\frac{di}{dt} \right)_0 + Ri(0) + V_0 = 0 \end{array} \right. \longrightarrow \left(\frac{di}{dt} \right)_0 = \frac{V_0}{L}$$

Scariche elettrostatiche

$$\begin{cases} i = K_1 e^{\alpha_1 t} + K_2 e^{\alpha_2 t} \\ L\alpha^2 + R\alpha + \frac{1}{C} = 0 \end{cases}$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{-R \pm \sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}}}{2L}$$

Reali, distinti, negativi

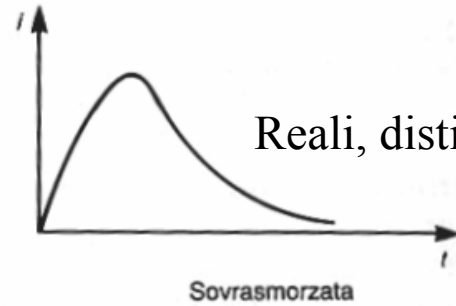
Reali, coincidenti

Complessi coniugati

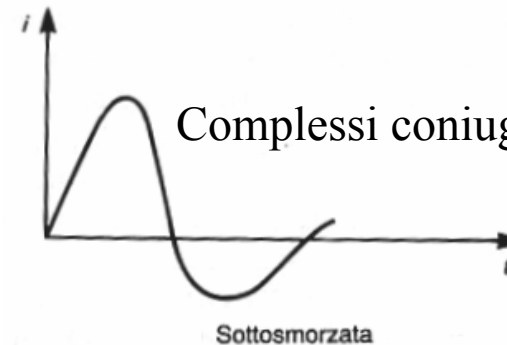
$$i(0) = 0$$

$$K_1 + K_2 = 0$$

$$i = K(e^{\alpha_1 t} + e^{\alpha_2 t})$$



Reali, distinti, negativi

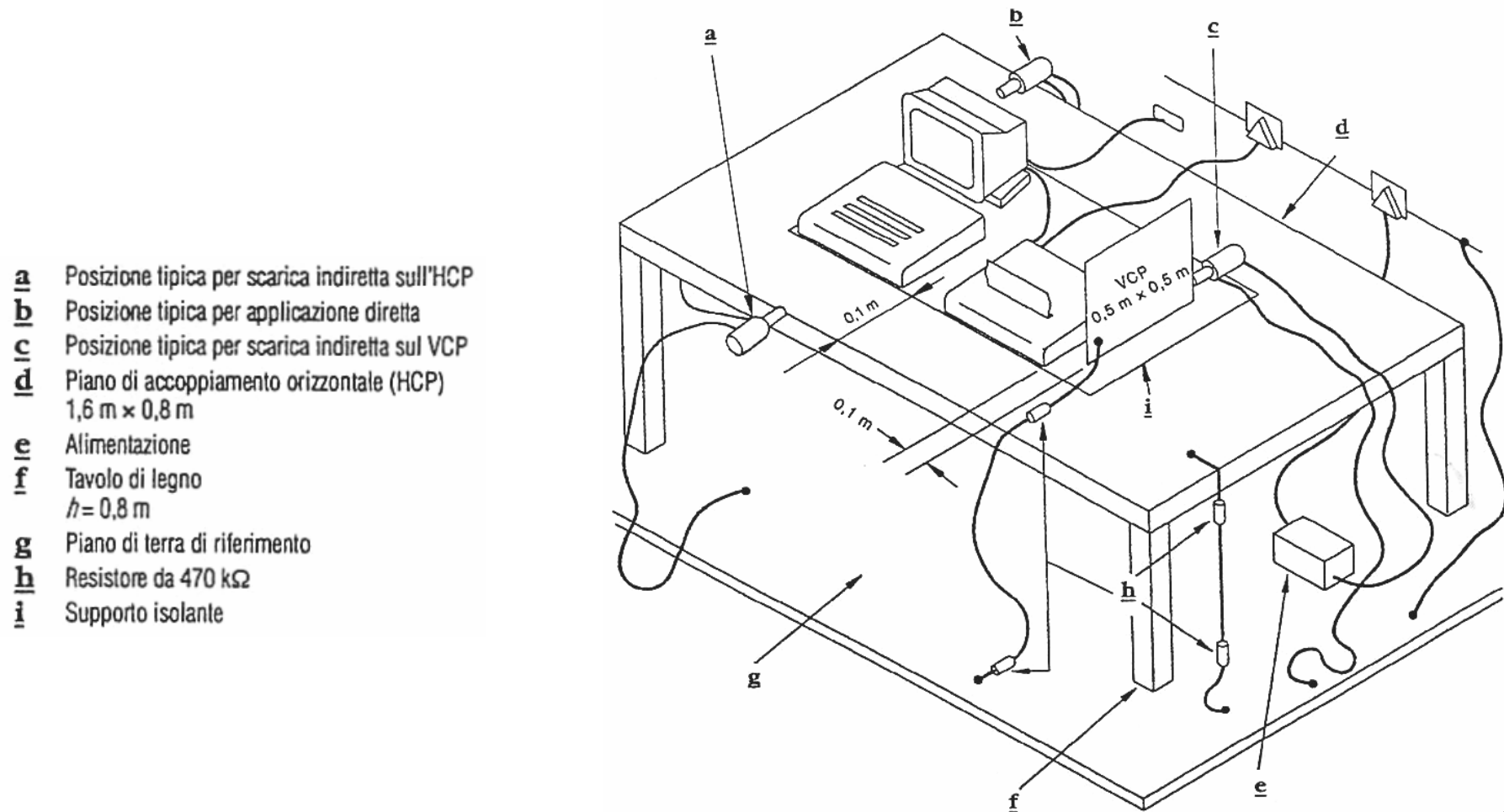


Complessi coniugati

A seconda della costituzione del corpo umano (R, L, C) la scarica elettrostatica è di intensità e tipologia diversa.

Scariche elettrostatiche - CEI EN 61000 - 4 - 2

Prova per la verifica della suscettibilità di una apparecchiatura alle scariche elettrostatiche, si applicano tipicamente +/- 4 kV a contatto e +/- 8 kV in aria



Scariche elettrostatiche - CEI EN 61000 - 4 - 2



Unità didattica:

Normative di riferimento.

Normative di riferimento

Comitati e commissioni per la produzione di normative tecniche:

- IEC (Comitato elettrotecnico internazionale)
- FCC (Commissione federale per le comunicazioni - USA)
- CENELEC (Comitato europeo di normalizzazione elettrica)
- CEI (Comitato elettrotecnico italiano)

Direttive e leggi:

- Direttiva Europea 89/336/CEE
- Decreto legge N. 476 del 4 Dicembre 1992

Normative di riferimento

Marchatura CE di un apparato elettrico: verifica della Compatibilità Elettromagnetica

Per la marcatura CE di una apparecchiatura elettrica o elettronica immessa sul mercato europeo tra le altre cose devono essere soddisfatti i requisiti di compatibilità elettromagnetica previsti nella **Direttiva Europea 89/336/CEE** (e sue successive modifiche 93/68/CEE, 93/97/CEE). Tale obbligo in Italia è prescritto dal **Decreto Legislativo del 4 Dicembre 1992, N.476**.

Questa direttiva suddivide le apparecchiature elettriche ed elettroniche in due categorie:

- 1) apparecchi radiotrasmittenti;
- 2) tutti gli altri.

Normative di riferimento

1) Nel caso in cui si voglia effettuare la marcatura CE di un apparecchio radiotrasmittente il costruttore deve ottenere il rilascio di un attestato di certificazione CE da parte di un "Organismo Notificato" accreditato dal Ministero delle Telecomunicazioni (art. 10.5 della 89/336/CEE) il quale provvederà esso stesso all'effettuazione delle prove di verifica necessarie.

2) Nel caso in cui si voglia effettuare la marcatura CE di un qualsiasi altro apparecchio elettrico o elettronico le strade possibili da seguire sono due:

2a) Il fabbricante può scegliere di effettuare su i propri prodotti le prove prescritte dalle norme tecniche armonizzate in materia di EMC in proprio o presso un'altro laboratorio (in questo caso il laboratorio non deve necessariamente essere accreditato, è sufficiente che esegua le prove secondo le specifiche indicate dalle normative da applicare). In questo caso il fabbricante stesso rilascia una dichiarazione CE di conformità (autocertificazione). Questa dichiarazione deve essere tenuta a disposizione dell'autorità competente durante i dieci anni successivi all'immissione sul mercato degli apparecchi corredata da una opportuna documentazione tecnica comprendente i rapporti di prova EMC (art. 10.1 della 89/336/CEE).

Normative di riferimento

2b) Il fabbricante sceglie di non eseguire in tutto o in parte le prove previste dalle norme tecniche armonizzate. In questo caso il fabbricante deve ottenere il rilascio di un attestato di certificazione CE da parte di un "Organismo Competente" (art. 10.2 della 89/336/CEE).

I test di Compatibilità elettromagnetica vanno eseguiti secondo le disposizioni di una normativa tecnica specifica del prodotto da verificare. Qualora non sia stata ancora realizzata una normativa specifica per il prodotto da verificare vengono applicate tutte le prove previste all'interno delle normative generiche che sono:

CEI-EN-61000-6-3: Norma generica per la valutazione dell'emissione di apparecchi utilizzati in ambiente domestico, commerciale e dell'industria leggera. (Contiene l'elenco e i valori limite di tutte le prove di emissione sia radiata che condotta da effettuare)

CEI-EN-61000-6-1: Norma generica per la valutazione dell'immunità di apparecchi utilizzati in ambiente domestico, commerciale e dell'industria leggera. (Contiene l'elenco e tutti i valori delle prove di immunità sia condotta che radiata da effettuare)

Gli esempi descritti durante il corso fanno riferimento a queste due normative tecniche generiche.

TEST	Normativa Generica	Normativa Base
Armoniche di corrente	CEI EN 61000 – 6 – 3	CEI EN 61000 – 3 – 2
Fluttuazioni di tensione e Flicker	CEI EN 61000 – 6 – 3	CEI EN 61000 – 3 – 3
Emissione condotta 150 kHz ÷ 30 MHz	CEI EN 61000 – 6 – 3	CEI EN 55022
Immunità condotta 150 kHz ÷ 80 MHz	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 6
Impulso di sovratensione SURGE	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 5
Treni di impulsi di sovratensione BURST	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 4
Buchi di tensione e brevi interruzioni	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 11
Emissione radiata 30 MHz ÷ 1 GHz	CEI EN 61000 – 6 – 3	CEI EN 55022
Immunità radiata 30 MHz – 1 GHz	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 3
Immunità radiata 50 Hz	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 8
Scariche elettrostatiche ESD	CEI EN 61000 – 6 – 1	CEI EN 61000 – 4 – 2