

**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

TESI DI LAUREA

# Studio e taratura di una camera anecoica fino a 6 GHz

RELATORE: prof. Alessandro Sona

LAUREANDO: Michele Nerva

Padova, 26 ottobre 2010

A.A. 2009-2010

# Indice

<b>Sommario</b> .....	ix
<b>Introduzione</b> .....	xi
<b>1 INCERTEZZA DI MISURA</b> .....	1
1.1 Introduzione all'incertezza di misura .....	1
1.2 Definizioni .....	2
1.3 Classificazione dei contributi dell'incertezza di misura .....	2
1.3.1 Valutazione dei contributi di tipo A .....	3
1.3.2 Valutazione dei contributi di tipo B .....	4
1.3.3 Combinazione dei contributi per il calcolo dell'incertezza composta .....	6
1.4 Fattore di copertura e incertezza estesa .....	7
1.5 Procedura e riporto dell'incertezza di misura nel certificato di taratura ..	8
1.6 Ripetibilità .....	9
1.7 Attività di taratura: misura di emissione irradiata .....	12
1.7.1 Acquisto EMI R&S ESU8 e antenna SUNOL SCIENCES JB6 .....	12
1.7.2 Incertezza di misura nell'emissione irradiata .....	14
<b>2 CAMERA ANECOICA</b> .....	25
2.1 Caratterizzazione delle antenne .....	25
2.1.1 Definizioni .....	25
2.1.2 Effetti delle riflessioni sul piano di massa .....	26
2.2 Teoria sulla camera anecoica .....	34
2.2.1 Materiale anecoico .....	36
2.3 Modellizzazione delle riflessioni all'interno della camera .....	41
2.4 Studio delle riflessioni nella stima dell'NSA del sito .....	48

<b>3</b>	<b>TARATURA DEL SITO</b> .....	57
3.1	Valutazione del VSWR .....	58
3.1.1	Norme di riferimento .....	58
3.1.2	Strumentazione utilizzata .....	58
3.1.3	Procedura di taratura .....	60
3.1.4	Prove sperimentali e tematiche .....	64
3.2	Valutazione del NSA .....	76
3.2.1	Norme di riferimento .....	80
3.2.2	Strumentazione utilizzata .....	80
3.2.3	Procedura di taratura .....	81
3.2.4	Prove sperimentali e tematiche .....	83
<b>4</b>	<b>TECNICHE DI PROVA E DI MISURA</b> .....	103
4.1	Prova d'immunità ai campi elettromagnetici a radiofrequenza irradiati	103
4.1.1	Norme di riferimento .....	103
4.1.2	Strumentazione utilizzata .....	104
4.1.3	Procedura di taratura .....	105
4.2	Caratteristiche di radiodisturbo - Limiti e metodi di misura .....	112
4.2.1	Norme di riferimento .....	112
4.2.2	Strumentazione utilizzata .....	113
4.2.3	Procedura di taratura .....	113
<b>5</b>	<b>RAPPORTO DI PROVA PER UN INVERTER EOLICO</b> .....	119
5.1	Condizioni operative e setup di prova .....	119
5.2	Sequenza dei test e risultati .....	130
5.2.1	Prova di emissione e risultati - Disturbi irradiati (30MHz – 1000MHz) .....	130
5.2.2	Test di immunità e risultati - Campi irradiati a radiofrequenza da 80 MHz a 2700 MHz .....	135

<b>Allegato A</b>	Scheda di studio di incertezza di misura .....	143
<b>Allegato B</b>	Diagrammi di radiazione dell'antenna trasmittente .....	145
<b>Bibliografia</b>	.....	147
<b>Conclusioni</b>	.....	149
<b>Ringraziamenti</b>	.....	151



# Sommario

In questa tesi si è svolta un'analisi approfondita del principale sito di prova per la misurazione delle emissioni irradiate da un dispositivo elettronico: la camera semianecoica.

All'inizio si sono studiati i documenti di riferimento che i Laboratori accreditati devono seguire per valutare l'incertezza di misura nei processi di calibratura e nelle dichiarazioni da riportare nei certificati di taratura.

Il lavoro della tesi si è svolto presso il Laboratorio Accreditato Sinal EUROTTEST di Brugine (PD) con l'obiettivo di adeguare, con oculate scelte tecniche ed economiche, il sito alle normative CEI EN che entreranno in vigore da ottobre 2011.

Si sono inizialmente acquisite le conoscenze sugli aspetti teorici e pratici legati all'approntamento di una camera semianecoica. Si è quindi realizzato un modello matematico, che simula il comportamento delle rifrazioni all'interno della camera, utile per l'anechoizzazione delle pareti interne (e del soffitto) del sito nei range 30-1000 MHz e 1-6 GHz. In particolare questo modello è risultato fondamentale per la calibratura nel range 1-6 GHz non ancora studiato in letteratura scientifica ma previsto dalla nuova edizione della Norma CEI EN 55022.

Partendo da questo modello si è progettato un allestimento iniziale che è stato poi migliorato in seguito alle informazioni di volta in volta acquisite dai diversi test sperimentali. Esperienze e conoscenze così ottenute hanno permesso di arrivare ad una configurazione finale del sito rientrante nei limiti imposti dalla norma.

Raggiunto questo primo obiettivo di adeguatezza della camera è stato possibile effettuare test di emissione irradiata e di immunità su inverter (eolici e fotovoltaici) e studiare le soluzioni più adeguate per clienti del laboratorio.

Obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di ottenere le condizioni per l'accreditamento futuro della camera semianecoica del laboratorio presso il quale si è svolto.



# Introduzione

La Compatibilità Elettromagnetica si prefigge di studiare le condizioni entro le quali gli apparecchi elettronici conservano le prestazioni previste anche in presenza di disturbi esterni con la garanzia che il dispositivo non disturbi a sua volta le prestazioni di altri apparati operanti nello stesso ambiente. Le misurazioni di emissione irradiate dovrebbero essere idealmente condotte in siti di prova all'aperto ma per ovvie ragioni si utilizzano siti che ne riproducono le caratteristiche chiamati camere anecoiche o semianecoiche. Per simulare le condizioni di un sito all'aperto si preferisce impiegare una camera semianecoica, cioè una camera schermata nei confronti dei campi elettromagnetici esterni e rivestita internamente, con esclusione del pavimento, di materiale anecoico. È proprio su quest'ultima tipologia di sito che verrà concentrata l'attenzione di questa trattazione.

Lo studio si articola in cinque capitoli di cui il primo espone gli elementi fondamentali che caratterizzano l'incertezza di misura nei test di compatibilità e presenta un metodo per calcolarla ed esprimerla correttamente.

Nel secondo capitolo si studia la camera semianecoica nelle sue caratteristiche strutturali e teoriche con particolare attenzione allo studio delle riflessioni sul piano di massa e sulle pareti generate da un'antenna trasmittente e captate da un'antenna ricevente. Vengono modellizzate le riflessioni per comprendere meglio il loro contributo durante le tarature e i test di compatibilità.

Nel terzo capitolo si descrivono le normative di riferimento, la strumentazione utilizzata e la procedura per la calibrazione della camera semianecoica nei range 30-1000 MHz e 1-6 GHz. Vengono eseguite prove sperimentali per la stima dei valori fondamentali nella taratura della camera. Particolare attenzione viene rivolta al range 1-6 GHz in quanto, in questo intervallo di frequenze, la taratura non è mai stata analizzata in Laboratorio.

Nel quarto capitolo si descrivono le tecniche di analisi e di misura riguardanti la prova di immunità ai campi elettromagnetici a radiofrequenza irradiati e le caratteristiche di radiodisturbo.

Nell'ultimo capitolo si compiono dei test per un inverter eolico analizzandone le emissioni ed effettuando i test di immunità irradiata.





# Capitolo 1

## INCERTEZZA DI MISURA

### 1.1 Introduzione all'incertezza di misura

Questo capitolo espone gli elementi fondamentali che caratterizzano l'incertezza di misura e presenta un metodo per calcolarla ed esprimerla correttamente. L'incertezza è una grandezza, associata al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori che possono essere ragionevolmente attribuiti alla grandezza sottoposta a misurazione, grandezza che chiameremo misurando. L'informazione ottenuta dal procedimento di misurazione deve essere accompagnata da una misura di incertezza da cui è affetta la stima del misurando e dall'intervallo dei valori che la caratteristica in oggetto può assumere.

Dal momento che nessuna quantità fisica può essere misurata con accuratezza assoluta, il risultato di una misurazione consiste in una stima del misurando. La qualità della conoscenza di una grandezza fisica dipende sia dalla accuratezza della strumentazione usata, sia dalle condizioni ambientali, sia dal livello di conoscenza del fenomeno su cui si sta indagando.

Ora si presenterà un metodo per calcolare ed esprimere correttamente l'incertezza di misura. Ci sono varie norme e raccomandazioni di organizzazioni internazionali che spiegano i vari metodi di calcolo: ci si avvarrà dell'approccio utilizzato dallo standard ISO/IEC 17025, usato per i laboratori accreditati da UKAS (UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE). Questo standard adotta la guida EA-4/02 "Expression of the uncertainty of measurement in calibration".

Si approfondirà la sequenza da seguire che prevede questi passi:

- capire quali elementi influiscono sul processo di misura e quali siano da ritenere significativi;
- considerare le loro incertezze e classificarle secondo due tipologie che prevedono di calcolarle o di ricavarle da fonti disponibili;
- sommarle per trovare l'incertezza composta
- individuare dei fattori correttivi sulla base dei quali poter ottenere l'incertezza estesa  $U$ ;
- ottenere la misura come media delle misure rilevate  $\pm U$ .

## 1.2 Definizioni

### Equazione del processo di misura

La quantità che si vuole misurare  $Y$  (misurando) è legata ad  $n$  grandezze  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , tramite una funzione  $f$ , chiamata equazione di misura:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1.1)$$

Le grandezze  $X_i$  possono anche essere fattori correttivi, o fattori che tengono in considerazione altre sorgenti di variabilità della misura (dipendenti da altri operatori, altri strumenti di misura, altri campioni, altri laboratori, altri momenti di rilevazione, etc.).

La funzione  $f$  dell'equazione (1.1) non è l'espressione di una legge fisica, ma descrive matematicamente l'intero processo di misura. Le  $X_i$  devono rappresentare tutte le quantità che possono contribuire in modo significativo all'incertezza della misura.

La variabile di uscita  $Y$  viene stimata con  $y$ , ottenuta dalla (1.1) in funzione delle stime  $x_1, x_2, \dots, x_N$  delle quantità  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , da cui si ottiene:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (1.2)$$

## 1.3 Classificazione dei contributi dell'incertezza di misura

L'incertezza di misura di  $y$  nasce dalle incertezze sulle  $(x_i)$  (indicate nel seguito con  $u_i = u(x_i)$ ). Queste vengono chiamate contributi di incertezza e vengono normalmente classificate in base al metodo utilizzato per calcolarle. Si distinguono incertezza di tipo A e incertezza di tipo B.

### **Incertezza di tipo A**

È il metodo di valutazione dell'incertezza basato sulla analisi statistica di una serie di misure (es. quando si calcola lo scarto tipo campionario delle misure rilevate).

### **Incertezza di tipo B**

È il metodo di valutazione dell'incertezza basato su metodi diversi dall'analisi statistica (es. quando si prende il contributo da un certificato di taratura di un campione primario, fidandosi dei calcoli di chi ha a suo tempo redatto la certificazione).

## **1.3.1 Valutazione dei contributi di tipo A**

La valutazione di un contributo di tipo A è basata su un qualsiasi metodo statisticamente valido. Esempi: calcolare la deviazione standard della media di una serie di osservazioni indipendenti; utilizzare il metodo dei minimi quadrati per adattare una curva ai dati, definendone i parametri e le loro deviazioni standard; eseguire una analisi della varianza per analizzare e quantificare gli effetti casuali in determinati tipi di misure.

### **Media e deviazione standard**

Come esempio di valutazione di tipo A, si considera una quantità  $X_i$  il cui valore è stimato da  $n$  osservazioni indipendenti  $X_{i,k}$  di  $X_i$  ottenute con identiche condizioni di misura, in questo caso la stima di  $x_i$  è la media campionaria

$$x_i = \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{K=1}^n X_{i,k} \quad (1.3)$$

e l'incertezza standard  $u(x_i)$  associata ad  $x_i$  è la deviazione standard della media campionaria

$$u(x_i) = s(\bar{X}_i) = \left( \frac{1}{n*(n-1)} \sum_{K=1}^n (X_{i,k} - \bar{X}_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

Molto spesso si parla genericamente di deviazione standard, tralasciando il termine *campionaria* (in questo caso si trascura il termine 'radice di  $n$ ').

### 1.3.2 Valutazione dei contributi di tipo B

Un tipico contributo di tipo B è il dato di incertezza prelevato, ad esempio, da un certificato di taratura di un campione di riferimento (chiamato campione di prima linea). Si deve considerare l'incertezza composta e depurare, in questo caso, il fattore di correzione. Se sul certificato è riportata l'incertezza estesa (come normalmente accade) questa va divisa per il fattore  $k$  (nel caso di distribuzione normale). Tutti i termini che entrano nel bilancio delle incertezze devono essere omogenei. Le quattro principali distribuzioni di interesse nelle misure EMC sono la distribuzione normale, rettangolare, triangolare e U shaped.

#### Normale

Questa distribuzione può essere assegnata alle incertezze derivate da contributi multipli. Per esempio, quando un laboratorio accreditato UKAS fornisce un'incertezza estesa per uno strumento, questa sarà calcolata al livello minimo di confidenza del 95% e può essere considerata come normale.

L'incertezza standard di un contributo di incertezza che assume una distribuzione normale è calcolata dividendo l'incertezza estesa per il fattore  $k$ , appropriato al dichiarato livello di confidenza. Per le distribuzioni normali si ha quindi:

$$u(x_i) = \frac{\textit{incertezza estesa}}{k}$$

dove  $k=2$  è riferito a un livello di confidenza del 95% (precisamente  $k=1.96$ , ma la differenza che ne deriva nell'incertezza combinata è trascurabile).

#### Rettangolare

La distribuzione rettangolare implica che c'è equiprobabilità che il valore vero sia situato dovunque tra due limiti prescritti. Una distribuzione rettangolare deve essere assegnata dove le specifiche dei limiti dati dal costruttore sono usati come incertezza, a meno che non sia dichiarata una confidenza associata alla specifica, nel qual caso si usa una distribuzione normale. Per le distribuzioni rettangolari si ha:

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$$

dove  $a_i$  è la semiampiezza dell'intervallo dato dai limiti prescritti per il contributo di incertezza individuale.

### **Triangolare**

La distribuzione triangolare è una distribuzione di probabilità con funzione di densità triangolare, ovvero nulla sui due valori estremi e lineare tra questi ed il valore medio dell'intervallo: la densità di probabilità è massima al centro dell'intervallo. Una distribuzione triangolare deve essere assegnata dove il contributo ha una distribuzione con dei limiti definiti e dove la maggioranza dei punti cade intorno al punto centrale. Per le distribuzioni triangolari si ha:

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}}$$

dove  $a_i$  è la semiampiezza dell'intervallo dato dai limiti prescritti per il contributo di incertezza individuale.

### **U shaped**

Questa distribuzione è applicabile all'incertezza dovuta a un mismatch (accoppiamento). Il valore del limite per l'incertezza del mismatch,  $M$ , associata alla potenza trasferita a una giunzione è ottenuta da  $20 \log_{10}(1 \pm |\Gamma_G||\Gamma_L|)$  dB , oppure  $100((1 \pm |\Gamma_G||\Gamma_L|)^2 - 1) \%$  dove  $\Gamma_G$  e  $\Gamma_L$  sono i coefficienti di riflessione per la sorgente e per il carico. L'incertezza del mismatch è asimmetrica intorno al risultato misurato, (quando consideriamo unità logaritmiche), tuttavia la differenza rispetto l'incertezza totale è spesso insignificante ed è accettabile usare il maggiore dei due limiti, cioè la somma negativa,  $20 \log_{10}(1 \pm |\Gamma_G||\Gamma_L|)$ . Per le distribuzioni U shaped si ha:

$$u(x_i) = \frac{M}{\sqrt{2}}$$

I contributi dell'incertezza di misura, come visto sopra, possono essere di due tipi:

### **Incetenza standard di tipo A**

Un contributo di incertezza ottenuto da una valutazione di tipo A è rappresentato dalla deviazione standard della media campionaria cfr. (1.4) con l'associato numero di gradi di libertà pari a  $(n-1)$ .

### Incertezza standard di tipo B

Un contributo di incertezza ottenuto da una valutazione di tipo B è rappresentato da una quantità  $u_j$ , considerata come una approssimazione della corrispondente deviazione standard. Essa è la radice quadrata di  $u_j^2$ , considerata come un'approssimazione della varianza corrispondente, ed è ottenuta sulla base di una distribuzione di probabilità ipotizzata in base alle informazioni disponibili.

Poiché  $u_j^2$  viene tratta a tutti gli effetti come se fosse una varianza e  $u_j$  come se fosse una deviazione standard, per questo contributo l'incertezza standard è  $u_j$ .

### 1.3.3 Combinazione dei contributi per il calcolo dell'incertezza composta

L'incertezza di misura composta (combined standard uncertainty) della misura  $y$ , indicata da  $u_c(y)$  ed utilizzata per rappresentare la deviazione standard del risultato di misura, è la radice quadrata della varianza stimata  $u_c^2(y)$  ottenuta con questa formula:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (1.6)$$

L'equazione (1.6) non è altro che la scomposizione in serie di Taylor (primo ordine) dell'equazione di misura  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  vista in (1.1), ed è chiamata legge di propagazione dell'incertezza (o legge di propagazione degli errori). Le derivate parziali di  $f$  rispetto alle  $X_i$  (chiamati *coefficienti di sensibilità*) sono uguali alle derivate parziali di  $f$  rispetto alle  $X_i$  valutate per  $X_i = x_i$ ;

$u(x_i)$  è l'incertezza associata alla variabile stimata di input  $x_i$

$u(x_i, x_j)$  è la covarianza stimata associata ad  $x_i$  e  $x_j$ .

#### Semplificazione

L'equazione (1.6) molto spesso si riduce ad una espressione molto semplice. Se si fa l'ipotesi che le stime di ingresso  $x_i$  delle grandezze  $X_i$  non siano correlate, il secondo termine scompare. Una forma particolarmente semplice si ha in uno dei due casi seguenti:

## CASO 1

### Equazione di misura:

Somma di grandezze  $X_i$  moltiplicate da costanti  $a_i$  -->  $Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_NX_N$

**Misura:**  $y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_Nx_N$

**Incertezza standard composta:**  $u_c^2(y) = a_1^2u^2(x_1) + a_2^2u^2(x_2) + \dots + a_N^2u^2(x_N)$

## CASO 2

### Equazione di misura:

Prodotto delle quantità  $X_i$ , elevate alla potenza  $a, b, \dots p$ , e moltiplicate per la costante  $A$  ->  $Y = AX_1^a X_2^b \dots X_N^p$

**Misura:**  $y = Ax_1^a x_2^b \dots x_N^p$

**Incertezza standard composta:**  $u_{c,r}^2(y) = a^2u_r^2(x_1) + b^2u_r^2(x_2) + \dots + p^2u_r^2(x_N)$

$u_r(x_i)$  è l'incertezza standard relativa (relative standard uncertainty) di  $x_i$  ed è definita da  $u_r(x_i) = u(x_i)/|x_i|$ , dove  $|x_i|$  è il valore assoluto di  $x_i$  ed  $x_i$  è diverso da zero;  $u_{c,r}(y)$  è l'incertezza standard relativa combinata (relative combined standard uncertainty) di  $y$  e definita da  $u_{c,r}(y) = u_c(y)/|y|$ , dove  $|y|$  è il valore assoluto di  $y$  (con  $y$  diverso da zero).

### Significato 'fisico' dell'incertezza di misura come intervallo di confidenza

Se la distribuzione di probabilità tipica della misura  $y$  e della sua incertezza composta  $u_c(y)$  è normale (gaussiana), e  $u_c(y)$  è uno stimatore corretto della deviazione standard di  $y$ , allora l'intervallo da  $y - u_c(y)$  a  $y + u_c(y)$  contiene circa il 68 % dei valori che possono ragionevolmente essere attribuiti ad  $Y$ , di cui  $y$  è una stima. Questo significa dire con un livello di confidenza del 68% che  $Y$  è compresa tra i valori  $y - u_c(y)$  e  $y + u_c(y)$ . Ciò viene normalmente espresso con  $y \pm u_c(y)$ .

## 1.4 Fattore di copertura e incertezza estesa

### Incertezza estesa

Sebbene l'incertezza standard composta  $u_c$  venga usata per esprimere l'incertezza di molti risultati di misura, per ragioni commerciali, industriali e normative, quella che spesso viene richiesta è una misura di incertezza che definisca un intervallo, intorno al risultato della misura  $y$ , che possa ragionevolmente contenere il valore vero del misurando  $Y$ . La misura dell'incertezza utilizzata per soddisfare questo requisito è l'incertezza di misura



estesa, per la quale viene utilizzato il simbolo  $U$ , ottenuta moltiplicando  $u_c(y)$  per un un fattore di copertura (indicato con  $k$ ). Pertanto si considera  $U = ku_c(y)$  e si ritiene che il valore vero del misurando sia compreso tra  $y - U$  ed  $y + U$  (normalmente si scrive  $Y = y \pm U$ ).

### **Fattore di copertura**

In generale,  $k$  viene scelto sulla base del livello di confidenza richiesto da associare all'intervallo  $U = ku_c$ . Tipicamente,  $k$  ha un valore di 2 o 3. Quando è valida la distribuzione normale ed  $u_c$  è una stima affidabile della deviazione standard di  $y$ ,  $U = 2 u_c$  ( $k = 2$ ) definisce un intervallo con un livello di confidenza di circa il 95%, ed  $U = 3 u_c$  ( $k = 3$ ) definisce un intervallo con un livello di confidenza maggiore di 99%. Il fattore scelto deve essere indicato sul certificato di taratura, altrimenti non saremmo in grado di ricavare l'incertezza composta, che deve entrare come contributo nell'equazione (1.5).

### **Incetenza estesa relativa**

In analogia con l'incetenza relativa standard  $u_r$  e l'incetenza composta standard  $u_{c,r}$  definita nelle formule semplificate di (1.5), l'incetenza relativa estesa di una misura  $y$  è  $U_r = U/|y|$ , con  $y$  diverso da zero.

## **1.5 Procedura e riporto dell'incetenza di misura nel certificato di taratura**

Un'accurata stesura della procedura di taratura di un dispositivo di misura deve presentare i seguenti punti principali:

1. Scopo della procedura di taratura
2. Oggetto della procedura di taratura
3. Apparecchiature impiegate
4. Procedimento di taratura
  - condizioni di misura
  - schema di misura
  - operazioni di misura
5. Elaborazione dei dati e valutazione delle incetENZE
6. Eventuali misurazioni ripetute

## 7. Tipiche componenti di incertezza in un'operazione

Nelle valutazioni delle incertezze bisogna mettere tutti i contributi in una tabella. Ciò aiuta a lavorare in modo ordinato ed a capire quali criteri ha seguito chi ha fatto i calcoli.

Nei certificati di taratura il risultato di una misurazione deve essere composto dalla stima del misurando  $y$  e dall'incertezza estesa  $U$  e deve essere espressa nella forma:  $Y = y \pm U$ .

A ciò si aggiunga una nota esplicativa che nel caso generale può avere la seguente formulazione:

L'incertezza estesa indicata è espressa come l'incertezza tipo moltiplicata per il fattore di copertura  $k = 2$ , che per una distribuzione normale corrisponde ad un livello di fiducia del 95% circa. L'incertezza tipo è stata determinata conformemente al documento EA-4/02.

Il valore numerico dell'incertezza deve essere espresso al massimo con due cifre significative dopo la virgola, normalmente il valore numerico della misurazione deve essere arrotondato all'ultima cifra significativa del valore dell'incertezza estesa.

Nell'ultimo paragrafo vedremo i calcoli dell'incertezza di misura per l'attività di taratura nell'emissione irradiata eseguita in laboratorio.

## 1.6 Ripetibilità

### Introduzione

La ripetibilità è il grado di concordanza tra una serie di misure di uno stesso misurando, quando le singole misurazioni sono effettuate lasciando immutate le condizioni di misura.

L'esecuzione della prova viene richiesta dalla norma, per verificare che la ripetibilità di una prova rientri nel limite di ripetibilità dichiarato dal laboratorio o indicato dalla norma pertinente. Si ricorda inoltre che la dispersione dei risultati di misurazioni ripetute, ovvero lo scarto tipo di ripetibilità, fornisce generalmente contributi significativi all'incertezza da associare al risultato.

Il limite di ripetibilità è espresso in termini di scarto tipo di ripetibilità al livello considerato e deve essere determinato mediante un sufficiente numero di ripetizioni della prova. Il limite di ripetibilità deve essere valutato a diversi livelli all'incirca equidistanti nell'intervallo di applicazione di un metodo.

Il trattamento analitico dei dati è possibile quando il risultato della prova è espresso in termini quantitativi. La ripetibilità deve essere calcolata e verificata periodicamente per le

caratteristiche espresse come “variabili” (modalità quantitative) caratterizzate da distribuzioni approssimativamente normali o unimodali.

### Calcolo della ripetibilità

Dopo aver scelto il numero delle prove da eseguire al livello di interesse, averle effettuate, aver controllato l’attendibilità dei risultati ottenuti, aver scartato quelli considerati “anomali”, il laboratorio può procedere all’elaborazione dei dati ritenuti validi calcolando la stima,  $s_r$ , dello scarto tipo  $\sigma_r$ , il parametro indice della dispersione della distribuzione della variabile normale a cui sono associati i risultati stessi e la stima della varianza,  $s_r^2$ .

Siano:  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ , i valori degli  $n$  risultati validi, di cui  $\bar{x}$  è la media aritmetica.

La miglior stima di  $\sigma_r$  è data dalla seguente formula :

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.6)$$

La stima della varianza è di conseguenza data da:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (1.7)$$

Prima di procedere, occorre verificare che  $s_r$  sia compatibile con  $\sigma_r$ ; il valore di quest’ultimo è generalmente riportato dal metodo normato adottato, oppure semplicemente può essere il valore prefissato come obiettivo di ripetibilità del metodo in fase di sviluppo.

In ogni caso, la verifica viene effettuata calcolando il rapporto  $s_r/\sigma_r$  e valutando se il risultato ottenuto cade all’interno dell’intervallo riportato in Tab. 1.1 in corrispondenza del numero dei gradi di libertà,  $\nu = n - 1$ , dove:

$n$  è il numero delle prove

$s$  è lo scarto tipo stimato da  $n$  prove,  $\sigma$  è lo scarto tipo effettivo.

In laboratorio si utilizza il metodo di prova che richiede l’esecuzione di  $n$  osservazioni e l’espressione del risultato come media.

$\nu = n - 1$	Valore minimo	Valore massimo
1	0,0316	2,241
2	0,16	1,921
3	0,268	1,765
4	0,348	1,669
5	0,408	1,602
6	0,454	1,551
7	0,491	1,512
8	0,522	1,48
9	0,548	1,454
10	0,57	1,431
11	0,589	1,412
15	0,646	1,354
20	0,692	1,307
25	0,724	1,275
30	0,748	1,251

Tab. 1.1 – Limiti di fiducia minimi e massimi del rapporto ( $S/\sigma$ ) in funzione dei gradi di libertà  $\nu=n-1$

Lo scarto tipo sperimentale da utilizzare nelle formule è relativo alla popolazione delle medie di  $n$  osservazioni, per la quale risulta:

$$\bar{s}_r = \frac{s_r}{\sqrt{n}} \quad (1.8)$$

e la differenza in valore assoluto da considerare è la differenza tra le due medie aritmetiche di due serie di osservazioni.

Nel caso di prove EMC, la ripetibilità deve essere controllata solo per le misure di emissione condotta ed irradiata ad alta e bassa frequenza. La misura deve essere ripetuta sull'intero spettro di frequenze, ripristinando ogni volta il circuito di prova. Per il calcolo si assume la differenza dei valori che, ad una qualunque frequenza, presentano il massimo scostamento. Se la differenza dei valori non rientra nel limite di ripetibilità dichiarato dal laboratorio, occorre verificare che la causa non sia da ascrivere alla variabilità del dispositivo sottoposto a prova, che spesso presenta livelli di emissione differenti a seconda dei circuiti funzionanti nell'istante di effettuazione della misurazione ad una determinata frequenza. Nei casi dubbi è opportuno ripetere la misura utilizzando come sorgente un generatore di segnali.

## **1.7 Attività di taratura: misura di emissione irradiata**

Dopo aver visto come calcolare l'incertezza di misura si procede con il calcolo dell'incertezza di misura dell'emissione irradiata. Si esegue ora uno studio approfondito. La necessità di eseguire un nuovo calcolo di incertezza di misura nasce dal fatto che, recentemente, il Laboratorio presso il quale si sono effettuati questi studi ha acquistato un nuovo analizzatore di spettro e una nuova antenna.

### **1.7.1 Acquisto EMI R&S ESU8 e antenna SUNOL SCIENCES JB6**

Il nuovo analizzatore di spettro acquistato dal Laboratorio è: Ricevitore EMI ESU8 della Rohde&Schwarz. Necessario per aumentare il range di frequenze ed arrivare fino ai 6 GHz. La nuova antenna è: antenna Bilog SUNOL SCIENCES modello JB6, fondamentale per lo studio dei disturbi fino ai 6 GHz. In particolare il range di funzionamento di questa antenna va da 30 MHz a 6 GHz: in questa maniera è possibile svolgere le misure di emissione irradiata (e i test di immunità) senza dover cambiare antenna in quanto questa copre l'intero range di frequenza richiesto dalla normativa. In questa maniera, oltre al vantaggio di non dover perdere tempo per i cambiamenti di antenna durante i test e per la reimpostazione degli strumenti di misura, si evita l'usura del connettore dell'antenna.

Prima di acquistare l'antenna SUNOL SCIENCES si sono contattati vari fornitori privilegiando i venditori che avrebbero potuto spedirci l'antenna in tempi brevi. Un altro fattore essenziale era la possibilità di poter eseguire la taratura dell'antenna presso un centro di taratura. Le antenne analizzate che soddisfavano questi requisiti erano: ETS Lindgren, AH Systems e SUNOL SCIENCES JB6.

Il fattore principale che si è considerato e che ha portato ad optare per la SUNOL SCIENCES è stato l'andamento del guadagno dell'antenna in frequenza. Una volta analizzato il guadagno teorico fornito dal costruttore dei vari modelli di antenne, in Fig. 1.1 si sono messi a confronto i guadagni delle diverse antenne. Si è scartata a priori l'antenna ETS Lindgren in quanto si vede chiaramente come abbia un picco di oltre 7 dB (verso il basso) rispetto al guadagno delle altre antenne. Si sa che l'amplificatore di potenza meno 'costoso' è proprio l'antenna; in particolare si deve considerare che l'accoppiata amplificatore e antenna servirà per le prove di immunità in cui si deve generare un campo di 10 V/m. Un calo di 7 dB dell'antenna dovrà essere compensato da

un incremento di 7 dB dell'amplificatore che dovrà poter erogare una potenza maggiore: questo però comporta l'acquisto di un amplificatore di maggiore potenza (e quindi un costo molto più elevato dell'amplificatore). Proprio per questo motivo si è scartata l'antenna ETS Lindgren, è più conveniente infatti acquistare un'antenna con il guadagno più alto possibile.

Anche le altre due antenne in studio presentano un picco, però a frequenze più basse, e in laboratorio è già presente un amplificatore per quelle frequenze. Si deve notare tuttavia che alle alte frequenze (intorno ai 6GHz) si ha un calo del guadagno per l'antenna AH Systems; considerazione che ha determinato l'acquisto dell'antenna SUNOL SCIENCES JB6.

La taratura OKD viene eseguita presso il laboratorio metrologico Seibersdorf Labor GmbH (Austria). Va ricordato che la taratura OKD (Austria), come pure la taratura RvA (Olanda) e UKAS(Regno Unito), sono equivalenti alle tarature SIT, in quanto SIT, OKD, RvA e UKAS sono membri di EA – European cooperation for Accreditation e firmatari dell'accordo EA – MLA.

La taratura OKD è stata eseguita per l'antenna Bilog SUNOL SCIENCES JB6 secondo ANSI nelle varie configurazioni e nel campo di frequenza da 30 MHz a 6 GHz.

Inoltre è stata tarata (nelle varie configurazioni) anche in accoppiata con l'antenna Bilog SCHAFFNER CBL6144; serve infatti il fattore d'antenna di entrambe le antenne accoppiate (DAF) nelle varie configurazioni per calibrare l'NSA della camera studiata.

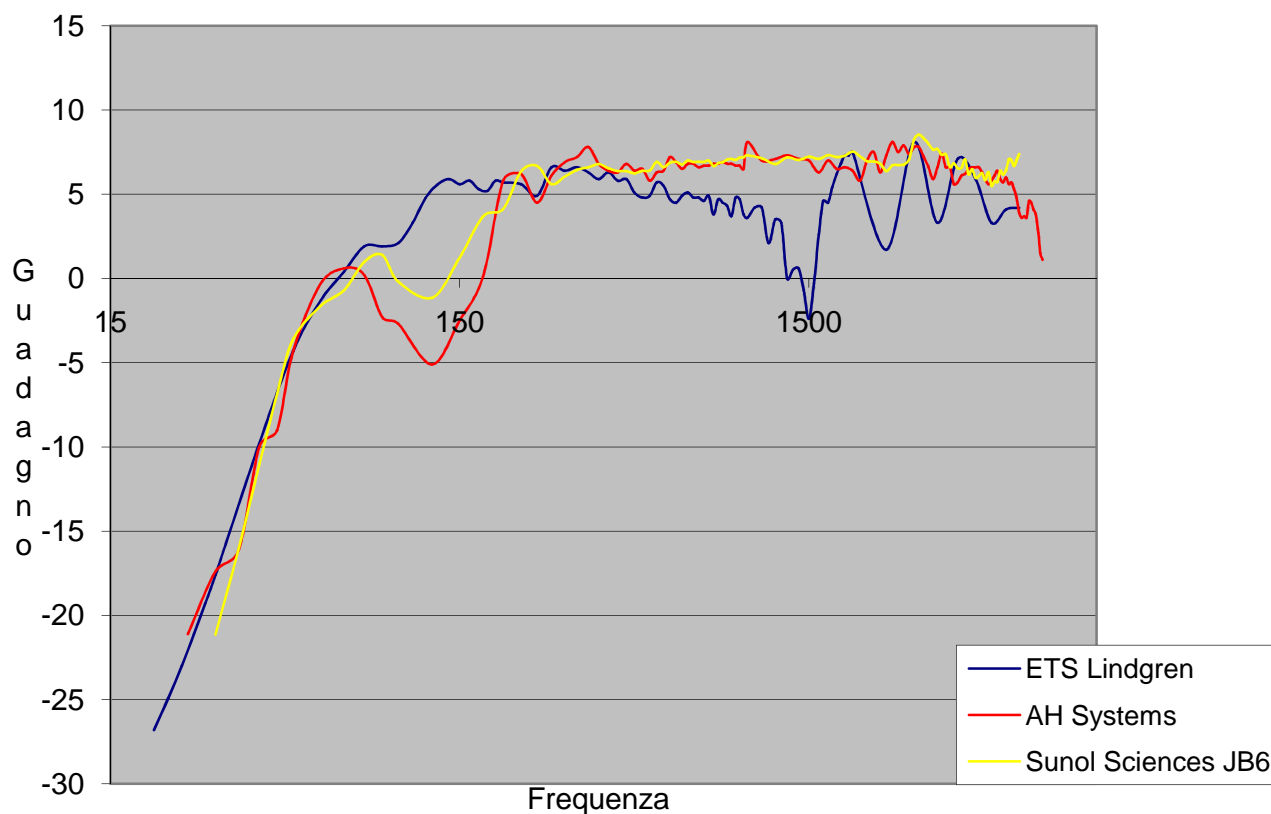


Fig. 1.1 – Guadagno delle diverse antenne analizzate

### 1.7.2 Incertezza di misura nell'emissione irradiata

Introdotta la nuova strumentazione si procede con lo studio dell'incertezza nell'attività di misura dell'emissione irradiata. L'attività di taratura riguarda quindi la misura di emissione irradiata.

#### Strumentazione coinvolta nella misura:

Ricevitore EMI	Cavi coassiali	Antenna di misura
Rohde&Schwarz	CAVOSC01 / 02 / 03 / 04	SUNOL SCIENCES
ESU8		JB6

## Studio

Lo studio si basa sulla seguente documentazione tecnica:

- LAB34: the expression of uncertainty in EMC testing. Edition 1|august 2002.
- EA-4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration – European co-operation for Accreditation (EA)
- Certificato di taratura DKD Rohde&Schwarz dell'ESU8.
- Per le caratteristiche dell'antenna SUNOL SCIENCES JB6 richieste nello studio dell'incertezza si fa riferimento al certificato di taratura OKD eseguito presso il laboratorio metrologico Seibersdorf Labor GmbH (Austria).

La funzione di trasferimento per questa particolare attività si basa sulla documentazione appena citata, dove viene trattata l'incertezza di misura di emissione irradiata in modo specifico. Una lettura di emissione irradiata è soggetta alla seguente funzione di trasferimento:

$$F_S = R_I + dV_{PA} + dV_{PR} + dV_{NF} + A_F + C_L + A_D + A_H + A_P + A_I + S_I + D_V + D_{Bal} + D_{Cross} + F_{Step} + M + R_S + R_{EUT}$$

Si vede ora come questi termini entrano nella realtà del Laboratorio.

1.  $F_S$  è il valore finale della lettura, pertanto non rientra in questo studio (nel senso che "non è" un'incertezza).
2.  $R_I$  viene inteso dalla normativa come l'errore dovuto alla risoluzione dell'EMI, ma per indicazioni specifiche degli enti di taratura esterni, tale errore è in genere compreso nelle stime di valutazione dell'incertezza di misura delle certificazioni SIT o equivalenti: non sembra opportuno contarli due volte.
3. L'EMI viene utilizzato per misurare l'ampiezza del segnale ricevuto:
  - a.  $dV_{SW}$  è l'incertezza per la misura di segnale sinusoidale (Allegato A)
  - b.  $dV_{PA}$  è l'incertezza per segnale di tipo impulsivo (Allegato A);
  - c.  $dV_{PR}$  è l'incertezza per pulse repetition (Allegato A);
  - d.  $dV_{NF}$  è l'incertezza per vicinanza al rumore di fondo (*noise floor*): poiché le misure di interesse sono all'altezza dei limiti normativi, molto superiori al rumore di fondo del sistema, si considera nullo il presente contributo.

Si nota come i contributi siano specifici per il tipo di misura:

- Il contributo al punto a è per un segnale di tipo sinusoidale;
- Il contributo al punto b è per un segnale di tipo impulsivo;



- Il contributo al punto c è per una ripetizione di impulsi.  
A priori non conosciamo il tipo di disturbo che il dispositivo in prova emetterà, quindi dobbiamo considerare tutte le possibili tipologie di contributi delle incertezze.
4.  $A_F$ : per l'antenna *factor* (AF) dell'antenna ricevente si utilizza la stima dell'incertezza di misura derivante dalla certificazione equivalente SIT.
  5.  $C_L$ : per il cavo di misura, si nota come il cavo di misura utilizzato sia sempre lo stesso, per specifica indicazione di procedura: si effettua quindi correzione della lettura in base all'attenuazione di cavo misurata, ed a questo punto si utilizza la stima di incertezza propria per la misura specifica).
  6.  $A_D$ : l'antenna *directivity*: dipende dal fatto che l'antenna, spostandosi in verticale da 1m a 4m non è più rivolta perfettamente in asse verso l'EUT (o l'antenna in trasmissione): ma la taratura viene fatta seguendo le specifiche di ANSI C63.4, che prevede la stima del fattore d'antenna spostando da 1m a 4m l'antenna in ricezione: si considera pertanto questo contributo già compreso nella incertezza di misura con cui è stimato l'AF nel certificato SIT.
  7.  $A_H$ : l'antenna *factor height dependance* è anch'essa un'incertezza compresa nell'AF stimato SIT: infatti esprime la correlazione fra fattore d'antenna e piano di riflessione orizzontale, ma la taratura equivalente SIT già viene effettuata variando l'altezza dell'antenna ricevente.
  8.  $A_P$ : l'Antenna *Phase Center Variation*, per i medesimi motivi indicati sopra, essendo dipendente dalla struttura dell'antenna che viene tarata SIT, è anch'essa compresa nella stima di incertezza stimata esternamente.
  9.  $A_I$ : *Antenna factor frequency interpolation*: il certificato di calibrazione delle antenne riporta il fattore d'antenna per moltissime frequenze: l'interpolazione avviene in modo lineare, ed è piuttosto fine: lo studio del presente punto viene indicato in seguito.
  10.  $S_I$ : *Site imperfection*: l'NSA deve essere a specifica normativa sotto i 4dB (per essere a specifica deve essere inferiore a 4 dB); nel momento in cui sono a specifica, la misura è corretta: il presente termine di Site imperfection quindi si riferisce alle deviazioni di 4dB previste dallo standard, come specificato nel documento di riferimento.
  11.  $D_V$ : *Measure Distance Variation*: errori introdotti da imperfette misure di centramento fra antenna ed EUT: si considera per il presente punto che la accuratezza fornita dai

normali sistemi di misura, e le indicazioni evidenziate sul sito di misura in modo evidente ed immediato, consentano sicuramente di rendere trascurabili queste influenze.

12.  $D_{Bal}, D_{Cross}$ : Antenna *balance* e *cross polarization* sono parametri specifici di costruzione dell'antenna, pertanto si ritengono compresi nel risultato di taratura esterna.
13.  $F_{Step}$ : *frequency step error*: l'errore di "centramento" dell'EMI alla frequenza da misurare: esso è valutato come da indicazione specifica della normativa, considerando lo step frequency di ogni EMI con il setup di misura specifico; in particolare:
  - a. per EMI Rohde&Schwarz: lo strumento riporta come frequency step indicazione specifica, e con tale indicazione si svolge la misura come richiesto da normativa.
14.  $M$ : errori dovuti a riflessioni nel sistema EMI+cavi+antenne:
 

in genere si ha il vswr da rapporti di taratura interna, da documentazione di riferimento e/o in ogni caso da documentazione tecnica;

si considera, per il presente studio, i seguenti contributi:

  - i. accoppiamento EMI: per cui, dal certificato Rohde&Schwarz (R&S) dello strumento si ricava il vswr all'input;
  - ii. accoppiamento antenna in ricezione, che si trova nella documentazione di taratura.

L'errore di *mismatch* del sistema EMI+cavo+antenna è dato dalla formula

$$M(dB) = 20 \log(1 \pm |\Gamma_A| \cdot |\Gamma_{Emi}|)$$

Dal certificato di taratura si evince direttamente il coefficiente di riflessione, che risulta massimo in 1.799; anche considerando l'incertezza di misura di 0.0065, sembra che una maggiorazione di 0.2 possa essere molto efficace:

$$\Gamma_{Emi} = 0.2;$$

Per l'antenna in ricezione si ha:

fino a 200MHz si può considerare  $\Gamma_A = 0.9$ ;

da 200MHz a 1000MHz si ha  $\Gamma_A = 0.3$ ;

pertanto, fino a 200MHz:

$$M(dB) = 20 \log(1 \pm |\Gamma_A| \cdot |\Gamma_{Emi}|) = +1.44dB \dots -1.72dB$$

da 200MHz a 1000MHz:

$$M(dB) = 20 \log(1 \pm |\Gamma_A| \cdot |\Gamma_{Emi}|) = +0.51dB \dots -0.54dB$$

15. Infine, l'incertezza dovuta alla ripetibilità di misura del sistema: per ripetibilità del sistema di misura, si ritiene si possa considerare la ripetibilità utilizzata nella stima dell'incertezza di misura della taratura dell'NSA.
16. La specifica inglese inoltre stima, nel caso si debba eseguire una misura per valori di ampiezza prossimi ai limiti normativi, di interessarsi anche a fenomeni di ripetibilità dovuti a variazioni nei campioni in esame: il Laboratorio però non effettua attività di campionamento, demandando tale attività al Cliente: pertanto si considera nullo il presente termine.

Non si ritengono correlate le grandezze considerate. I coefficienti di sensibilità sono tutti 1 a meno di indicazioni specifiche.

Per la stima dell'incertezza di misura, si fa riferimento al certificato DKD della R&S: con periodicità triennale lo strumento viene inviato in taratura presso il centro di taratura della R&S, che fornisce una taratura DKD con incertezze di misura molto migliori di quelle proposte dall'INRIM. Annualmente, poi, lo strumento viene inviato all'INRIM per la verifica della sua conformità alle specifiche CISPR.

### **Interpolazione**

Stima dell'errore di interpolazione:

Si stima che l'errore massimo possa essere metà della massima differenza fra un valore di  $A_F$  ed il successivo. Questo errore dipenderà dal numero di campioni con cui è tarata l'antenna (maggiore è il numero di campioni e minore sarà l'errore di interpolazione  $A_I$ ).

Si riportano in Tab 1.2 e 1.3 i fattori di antenna in orizzontale ed in verticale, e si stima quanto detto.

f	AF orizz	errore	AF vert	errore	errore max
30	5	1,235	4,41	1,025	1,235
35	7,47	0,23	6,46	0,655	0,655
40	7,93	0,755	7,77	0,065	0,755
45	9,44	0,035	7,9	0,17	0,17
50	9,51	0,09	8,24	0,02	0,09
55	9,33	0,005	8,2	0,45	0,45
60	9,32	0,295	9,1	0,105	0,295
65	9,91	0,23	9,31	0,3	0,3
70	9,45	0,45	9,91	0,965	0,965
75	10,35	0,69	7,98	0,06	0,69
80	8,97	0,63	7,86	0,47	0,63
85	7,71	0,03	6,92	0,475	0,475
90	7,77	0,255	5,97	0,035	0,255
95	8,28	0,325	6,04	0,16	0,325
100	8,93	0,875	6,36	0,235	0,875
110	7,18	0,01	5,89	0,215	0,215
120	7,2	0,475	6,32	0,335	0,475
130	8,15	0,255	6,99	0,09	0,255
140	7,64	0,065	6,81	0,54	0,54
150	7,51	1,335	7,89	1,06	1,335
160	10,18	1,055	10,01	1,415	1,415
170	8,07	0,015	7,18	0,715	0,715
180	8,1	0,385	5,75	1,16	1,16
190	8,87	0,085	8,07	0,95	0,95
200	9,04	0,39	9,97	0,3	0,39
				Ai	1,415

*Tab. 1.2 – Stima dell'errore di interpolazione fino a 200MHz*

Si ottiene:

un  $A_I$  (Antenna factor frequency interpolation) di 1.415. per il range di frequenze che va da 30 MHz a 200 MHz (Tab. 1.2);

un  $A_I$  (Antenna factor frequency interpolation) di 0,745. per il range di frequenze che va da 200 MHz a 1000 MHz (Tab. 1.3).

f	AF orizz	errore	AF vert	errore	errore max
220	9,82	0,54	10,57	0,365	0,54
240	10,9	0,545	11,3	0,365	0,545
260	11,99	0,08	12,03	0,02	0,08
280	11,83	0,405	11,99	0,245	0,405
300	12,64	0,28	12,48	0,745	0,745
325	13,2	0,125	13,97	0,435	0,435
350	13,45	0,31	14,84	0,2	0,31
375	14,07	0,245	14,44	0,33	0,33
400	14,56	0,26	15,1	0,405	0,405
425	15,08	0,075	15,91	0,15	0,15
450	15,23	0,48	16,21	0,275	0,48
475	16,19	0,215	16,76	0,175	0,215
500	16,62	0,34	17,11	0,25	0,34
525	17,3	0,205	17,61	0,705	0,705
550	17,71	0,06	19,02	0,335	0,335
575	17,59	0,02	18,35	0,095	0,095
600	17,55	0,725	18,16	0,635	0,725
625	19	0,42	19,43	0,115	0,42
650	19,84	0,11	19,2	0,005	0,11
675	19,62	0,17	19,21	0,25	0,25
700	19,28	0,175	19,71	0,065	0,175
725	19,63	0,24	19,84	0,14	0,24
750	20,11	0,07	20,12	0,305	0,305
775	20,25	0,105	20,73	0,185	0,185
800	20,46	0,085	21,1	0,045	0,085
825	20,63	0,09	21,01	0,085	0,09
850	20,45	0,115	21,18	0,41	0,41
875	20,68	0,2	22	0,125	0,2
900	21,08	0,025	22,25	0,02	0,025
925	21,13	0,235	22,21	0,095	0,235
950	21,6	0,02	22,02	0,225	0,225
975	21,56	0,185	22,47	0,36	0,36
1000	21,93		23,19		
				Ai	0,745

Tab.1.3 – Stima dell'errore di interpolazione da 200 MHz a 1000 MHz

### Step frequency

L'errore di step frequency viene valutato con misura specifica come da indicazione normativa. Con ricevitore EMI R&S ESU8: per misura di irradiato si ha che lo step frequency è di 30KHz; si imposta con generatore di segnale GNRRF002 il segnale che, misurato con emi centrato a tale frequenza risulta:

f	100,00 MHz
P	39,80 dBuV
QP	39,53 dBuV
AVG	39,52 dBuV

Si sposta poi il segnale del generatore a +15KHz dalla frequenza di 100MHz senza ricentrare l'EMI, e si ottiene:

f	100,00 MHz	errore
P	39,46 dBuV	0,34 dB
QP	39,16 dBuV	0,37 dB
AVG	39,15 dBuV	0,37 dB

Analogamente con 100MHZ - 15KHz:

f	100,00 MHz	errore
P	39,40 dBuV	0,40 dB
QP	39,12 dBuV	0,41 dB
AVG	39,11 dBuV	0,41 dB

Si stima attendibile per il presente punto un valore di 0,5 dB maggiorato rispetto ai misurati per renderlo immune alla varianza della misura.

La stima di ripetibilità si effettua eseguendo 10 volte la misura di ampiezza, non variando alcun altro parametro di setup.

Si effettuano le prove, si calcolano le diverse varianze e si ottiene:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Varianza
-20,24	-20,29	-19,90	-19,97	-20,15	-20,01	-20,13	-20,15	-20,17	-20,27	0,016951
-20,28	-20,33	-19,93	-19,98	-20,16	-20,03	-20,16	-20,16	-20,21	-20,32	0,019271
-20,29	-20,31	-19,95	-20,02	-20,20	-20,06	-20,20	-20,20	-20,22	-20,33	0,016351

(non vengono riportate tutte le misure e il calcolo delle varianze per l'elevato numero di dati)

Varianza massima	0,055734
Scarto tipo	0,074655

Si nota come la misura sia corretta in quanto rientra entro i limiti specificati in Tab. 1.1 (0,548 ÷ 1,454). Ora viene stimata l'incertezza di misura in fase di misura.

**Grandezza in esame: lettura di ampiezza dBuV**

La stima viene effettuata tramite misura singola. Le grandezze di input si possono ritenere non correlate.

Range: 30MHz - 200MHz

Unità di misura: dB

Grandezze di input	Incertezza tipo [u(xi)]	Distribuzione di probabilità /fattore di copertura		Coefficiente di sensibilità	Contributo d'incertezza [u(yi)]	Varianza
dV <sub>sw</sub>	0,64	rettangolare	1,73	1	0,37	0,14
dV <sub>pa</sub>	0,96	rettangolare	1,73	1	0,56	0,31
dV <sub>pr</sub>	0,96	rettangolare	1,73	1	0,56	0,31
A <sub>f</sub>	0,70	normale	2	1	0,35	0,12
C <sub>l</sub>	0,16	normale	2	1	0,08	0,01
A <sub>i</sub>	1,42	rettangolare	1,73	1	0,82	0,67
S <sub>i</sub>	4,00	triangolare	2,45	1	1,63	2,67
F <sub>step</sub>	0,50	rettangolare	1,73	1	0,29	0,08
M	1,72	U-shaped	1,41	1	1,22	1,49
δ <sub>classe_A</sub>	0,07	normale	1	1	0,07	0,01
incertezza composta						2,41
<b>Incertezza estesa (K=2):</b>						<b>4,82</b>

Tab. 1.4 - Incertezza di misura in fase di misura nel range 30MHz - 200M

Range: 200MHz - 1GHz

Unità di misura: dB

Grandezze di input	Incertezza tipo [u(xi)]	Distribuzione di probabilità /fattore di copertura		Coefficiente di sensibilità	Contributo d'incertezza [u(yi)]	Varianza
dV <sub>sw</sub>	0,64	rettangolare	1,73	1	0,37	0,14
dV <sub>pa</sub>	0,96	rettangolare	1,73	1	0,56	0,31
dV <sub>pr</sub>	0,96	rettangolare	1,73	1	0,56	0,31
A <sub>f</sub>	0,70	normale	2	1	0,35	0,12
C <sub>l</sub>	0,16	normale	2	1	0,08	0,01
A <sub>i</sub>	0,75	rettangolare	1,73	1	0,43	0,19
S <sub>i</sub>	4,00	triangolare	2,45	1	1,63	2,67
F <sub>step</sub>	0,50	rettangolare	1,73	1	0,29	0,08
M	0,54	U-shaped	1,41	1	0,38	0,15
δ <sub>classe_A</sub>	0,07	normale	1	1	0,07	0,01
incertezza composta						1,99
<b>Incertezza estesa (K=2):</b>						<b>3,99</b>

Tab. 1.5 - Incertezza di misura in fase di misura nel range 200MHz - 1GHz

Si nota che l'incertezza estesa va riportata nell'unità di misura della grandezza misurata, con 2 cifre decimali (per i calcoli invece sono stati impiegati valori utilizzando più posizioni decimali).

Questo studio è importante in fase di certificazione del prodotto per il cliente quando si dichiara l'incertezza di misura. Nell'esempio specifico si riporta nel rapporto di prova (test report) la seguente dicitura:

*Incertezza di misura:  $f < 200\text{MHz}$ : 4,82 dB*

*$200\text{MHz} < f < 1\text{GHz}$ : 3,99 dB*

*L'incertezza di misura dichiarata è espressa come due volte lo scarto tipo, corrispondente ad un livello di confidenza di circa il 95%.*





# Capitolo 2

## CAMERA ANECOICA

### 2.1 Caratterizzazione delle antenne

#### 2.1.1 Definizioni

##### Direttività

Il guadagno direttivo di un'antenna in una determinata posizione,  $D(\theta, \phi)$ , è il rapporto tra l'intensità di radiazione in quella direzione e l'intensità media di radiazione:

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{media}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (2.1)$$

La direttività di un'antenna coincide col guadagno direttivo calcolato nella direzione in cui questo risulta essere massimo:

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_{media}} \quad (2.2)$$

##### Guadagno

Mentre il guadagno direttivo  $D(\theta, \phi)$  è semplicemente funzione del diagramma di irradiazione dell'antenna, il guadagno di potenza  $G(\theta, \phi)$ , tiene conto le perdite dell'antenna.

Definendo il fattore di efficienza come

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{app}} \quad (2.3)$$

Dove  $P_{app}$  è la potenza totale applicata all'antenna e  $P_{rad}$  è la potenza irradiata. Il guadagno di potenza di potenza sarà legato al guadagno direttivo mediante la relazione

$$G(\theta, \phi) = eD(\theta, \phi) \quad (2.4)$$

in cui il guadagno di potenza è stato definito come

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{app}} \quad (2.5)$$

### Fattore d'antenna

Il fattore d'antenna è definito come il rapporto tra il campo elettrico incidente sulla superficie dell'antenna di misura e la tensione misurata ai morsetti dell'antenna:

$$AF = \frac{|\hat{E}_{inc}|}{|\hat{V}_{ric}|} \quad (2.6)$$

### Equazione di Friis della trasmissione

Siano considerate due antenne nello spazio libero. Un'antenna trasmette la potenza totale  $P_T$  mentre la potenza ricevuta sull'impedenza di carico dell'altra è  $P_R$ . L'antenna trasmittente ha guadagno  $G_T(\theta_T, \phi_T)$  lungo la direzione della trasmissione  $\theta_T, \phi_T$ . L'antenna ricevente ha un guadagno dato da  $G_R(\theta_R, \phi_R)$  lungo la direzione della trasmissione  $\theta_R, \phi_R$ . L'equazione di Friis della trasmissione è:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T(\theta_T, \phi_T)G_R(\theta_R, \phi_R) \left(\frac{\lambda_0}{4\pi d}\right)^2 \quad (2.7)$$

## 2.1.2 Effetti delle riflessioni sul piano di massa

Si vuole ora studiare il comportamento di due antenne (una trasmittente e una ricevente) poste all'interno di una camera anecoica o semianecoica. I cammini seguiti dai campi irradiati che vanno dall'antenna trasmittente all'antenna ricevente possono essere del tutto differenti, a seconda delle riflessioni che subisce ogni singolo cammino con le pareti della camera. A seconda della lunghezza elettrica di questi cammini, i segnali che raggiungono l'antenna ricevente possono essere in fase tra loro, in opposizione di fase, oppure avere una relazione di fase intermedia tra le due precedenti. Il segnale totale che giunge all'antenna ricevente è il fasore ottenuto dalla somma dei fasori associati a tutte le onde incidenti. Siccome le lunghezze elettriche dei vari cammini possono essere significativamente diverse, avremo che i segnali ricevuti possono sommarsi costruttivamente o distruttivamente.

Si considera ora il caso semplificato di due antenne poste al di sopra di un piano di massa perfettamente conduttore, come illustrato in Fig. 2.1.

Il segnale ricevuto dall'antenna ricevente è dato dalla composizione di due segnali: un'onda diretta (che viaggia in linea retta tra il punto di emissione e l'antenna di misura) e un'onda riflessa (che viene riflessa dal piano di massa). È importante studiare questa configurazione in quanto molte prove che verranno successivamente viste (misura dell'NSA, emissioni radiate) sono eseguite con questa configurazione. Si analizza ora questo fenomeno da un punto di vista quantitativo.

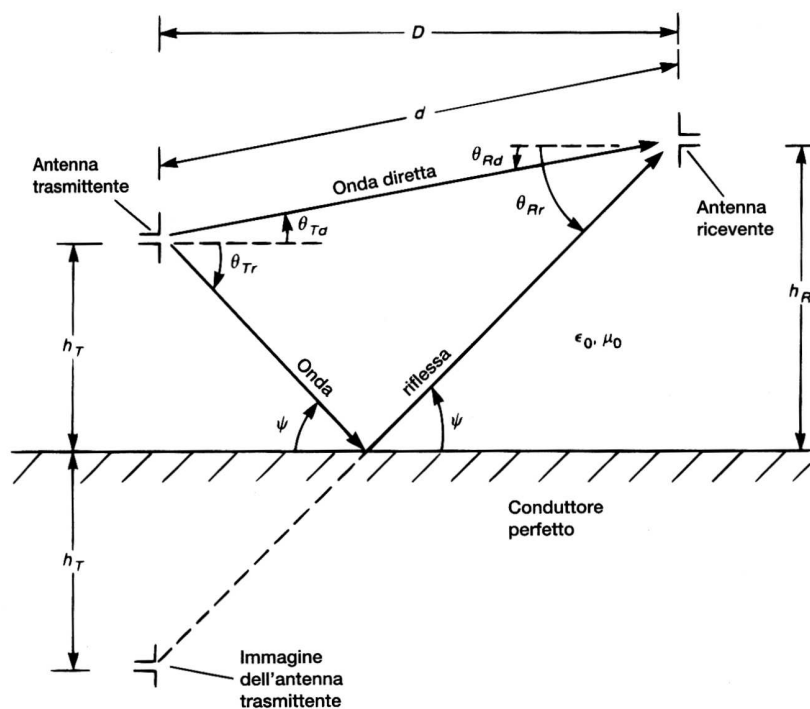


Fig. 2.1 – Schematizzazione della comunicazione tra due antenne poste su un piano di massa perfettamente conduttore

Si supponga che i diagrammi di irradiazione, espressi in termini di intensità di campo elettrico delle antenne di trasmissione e di ricezione, siano descritti rispettivamente da  $E_T(\theta_T, \phi_T)$  e da  $E_R(\theta_R, \phi_R)$ . Le altezze delle antenne siano  $h_T$  e  $h_R$  e  $D$  rappresenti la proiezione della loro distanza  $d$  sul piano di massa. Si può dimostrare che l'angolo d'incidenza e quello di riflessione dell'onda riflessa sul piano di massa,  $\psi$ , sono uguali. Questa uguaglianza è nota come *legge di Snell*. La lunghezza del cammino dell'onda diretta è:

$$d = \sqrt{D^2 + (h_R - h_T)^2} \quad (2.8)$$

L'onda riflessa può essere pensata come onda emessa dall'immagine dell'antenna trasmittente, come illustrato in Fig. 2.1. Sostituendo allora il piano di massa perfettamente conduttore con l'immagine dell'antenna trasmittente si ricava che la lunghezza del cammino dell'onda riflessa è:

$$d_r = \sqrt{D^2 + (h_R + h_T)^2} \quad (2.9)$$

La tensione misurata ai morsetti dell'antenna ricevente e dovuta all'onda diretta è proporzionale a:

$$\hat{V}_d = \hat{V}_0 E_T(\theta_{Td}, \phi_{Td}) E_R(\theta_{Rd}, \phi_{Rd}) \frac{e^{-j\beta_0 d}}{d} \quad (2.10)$$

Si è ipotizzato che le antenne si trovino nelle regioni di campo lontano reciprocamente generate in modo che il campo elettrico nei pressi dell'antenna ricevente si comporti, localmente, come un'onda piana uniforme. Questo spiega la presenza dei fattori  $1/d$  ed  $e^{-j\beta_0 d}$  nella (2.10). L'onda riflessa coincide allora con l'onda trasmessa (lungo la direzione  $\theta_{Tr}, \phi_{Tr}$ ) moltiplicata per il coefficiente di riflessione calcolato nel punto in cui avviene tale riflessione,  $\hat{\Gamma}$ . La forma della tensione dovuta all'onda riflessa e misurata ai morsetti dell'antenna ricevente è quindi:

$$\hat{V}_r = \hat{V}_0 E_T(\theta_{Tr}, \phi_{Tr}) E_R(\theta_{Rr}, \phi_{Rr}) \hat{\Gamma} \frac{e^{-j\beta_0 d_r}}{d_r} \quad (2.11)$$

La tensione totale misurata al ricevitore è data dalla somma della (2.10) e della (2.11):

$$\begin{aligned} \hat{V} &= \hat{V}_d + \hat{V}_r & (2.11a) \\ &= \hat{V}_0 E_T(\theta_{Td}, \phi_{Td}) E_R(\theta_{Rd}, \phi_{Rd}) \frac{e^{-j\beta_0 d}}{d} + \hat{V}_0 E_T(\theta_{Tr}, \phi_{Tr}) E_R(\theta_{Rr}, \phi_{Rr}) \hat{\Gamma} \frac{e^{-j\beta_0 d_r}}{d_r} \\ &= \hat{V}_0 E_T(\theta_{Td}, \phi_{Td}) E_R(\theta_{Rd}, \phi_{Rd}) \frac{e^{-j\beta_0 d}}{d} \hat{F} \end{aligned}$$

in cui

$$\hat{F} = 1 + \frac{E_T(\theta_{Tr}, \phi_{Tr}) E_R(\theta_{Rr}, \phi_{Rr})}{E_T(\theta_{Td}, \phi_{Td}) E_R(\theta_{Rd}, \phi_{Rd})} \hat{\Gamma} \frac{d}{d_r} e^{-j\beta_0 (d_r - d)} \quad (2.11b)$$

Quindi la riflessione dovuta al piano di massa modifica la propagazione dell'onda diretta (modifica cioè l'accoppiamento che si realizzerebbe nel caso in cui non fosse presente il piano di massa) di un fattore moltiplicativo  $\hat{F}$ . Di conseguenza si può modificare l'equazione di Friis della trasmissione in modo che quest'ultima tenga conto anche della riflessione sul piano di massa: per far ciò basta moltiplicarla per il quadrato del valore assoluto di  $\hat{F}$ ; questo è possibile in quanto l'equazione della trasmissione di Friis riguarda la potenza.

Si consideri ora il coefficiente di riflessione  $\hat{\Gamma}$ . Si possono avere due tipi di polarizzazione differenti: *polarizzazione parallela* oppure *polarizzazione perpendicolare*. Esse corrispondono alle due polarizzazioni richieste per le antenne utilizzate in misure di verifica del soddisfacimento alle norme: *polarizzazione verticale* e *orizzontale*. In Fig. 2.2 (a) è mostrato il caso della polarizzazione perpendicolare (orizzontale). Nella termine "perpendicolare" si riferisce al fatto che il campo elettrico incidente è perpendicolare al *piano d'incidenza*.

Questo piano contiene il vettore d'onda e la normale alla superficie. In questo tipo di polarizzazione i vettori dei campi elettrici incidente e riflesso sono paralleli al piano di massa. Il coefficiente di riflessione del piano di massa diventa:

$$\hat{\Gamma}_H = \frac{\hat{E}_r}{\hat{E}_i} = -1 \quad (2.12)$$

in cui si è utilizzato il pedice  $H$  per indicare la polarizzazione orizzontale delle antenne. Intuitivamente questo risultato è ovvio se si ripensa alla condizione al contorno per cui il campo elettrico totale tangente alla superficie di un conduttore perfetto deve essere nullo. Sia il campo elettrico incidente sia quello riflesso sono tangenti al piano di massa; di conseguenza il campo elettrico riflesso deve essere opposto a quello dell'onda incidente.

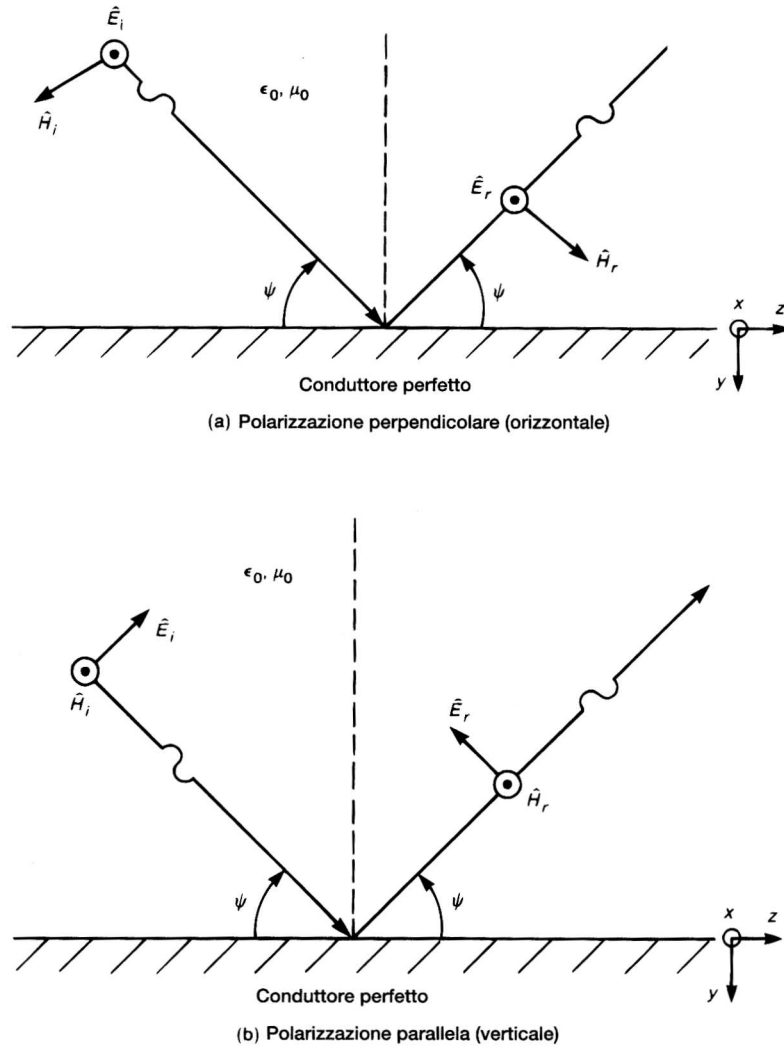


Fig. 2.2 – Determinazione dei coefficienti di riflessione di un'onda piana uniforme che incide obliquamente su un conduttore perfetto nel caso di (a) polarizzazione perpendicolare (orizzontale) e (b) polarizzazione parallela (verticale) dell'onda incidente

Nel caso di polarizzazione parallela, illustrato in Fig. 2.2 (b), i vettori del campo elettrico sono paralleli al piano d'incidenza. Ciò corrisponde ad avere antenne orientate verticalmente. Il coefficiente di riflessione per questa polarizzazione è:

$$\hat{\Gamma}_V = \frac{\hat{E}_r}{\hat{E}_i} = +1 \quad (2.13)$$

in cui il pedice  $V$  sta a indicare la posizione verticale delle antenne. Anche in questo caso il risultato è intuitivamente ovvio se si ripensa alla condizione al contorno per cui il campo elettrico totale tangente alla superficie di un conduttore perfetto deve essere nullo. In questo caso le componenti tangenziali sono orientate lungo

l'asse  $z$  e sono uguali e opposte sulla superficie. Perciò i campi elettrici incidente e riflesso devono risultare invarianti rispetto ai propri vettori di propagazione, come mostra la Fig. 2.2 (b).

Si calcola ora il fattore di riflessione di un piano di massa per un elemento di corrente (un dipolo elettrico) e per un'antenna ricevente a filo, quale può essere un dipolo utilizzato per misure FCC per la classe B. La distanza tra l'elemento di corrente e l'antenna ricevente è di 3 m. L'elemento di corrente (che schematizza il dispositivo di cui si intendono caratterizzare le emissioni) è situato all'altezza di 1 m su un piano di massa ed è disposto parallelamente all'antenna di misura. L'altezza a cui è posta l'antenna di misura rispetto al piano di massa viene fatta variare da 1 m a 4 m. Si consideri inizialmente il caso illustrato in Fig. 2.3 (a) in cui la *polarizzazione è orizzontale*. Il fattore della (2.11b) diventa:

$$\hat{F}_H = 1 - \frac{d}{d_r} e^{-j(2\pi/\lambda_0)(d_r-d)} \quad (2.14)$$

in cui si è sostituito  $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ . In questo caso il coefficiente di riflessione è  $\hat{\Gamma}_H = -1$  e il diagramma di irradiazione è omnidirezionale nel piano perpendicolare all'elemento di corrente e all'antenna di misura che è posizionata orizzontalmente. Quindi i fattori che esprimono i diagrammi di irradiazione nella (2.11b) sono unitari. Quando l'antenna è posta all'altezza minima di 1 m si ha  $d = 3$  m e  $d_r = \sqrt{13}$  m; quando invece si trova all'altezza massima di 4 m si ha  $d = \sqrt{18}$  m e  $d_r = \sqrt{34}$  m. Perciò il fattore individuato dalla (2.11b) vale

$$\hat{F}_{1m} = 1 - 3\sqrt{\frac{1}{13}} e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)(\sqrt{13}-3)} \quad (2.15)$$

e

$$\hat{F}_{4m} = 1 - \sqrt{\frac{18}{34}} e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)(\sqrt{13}-\sqrt{18})} \quad (2.16)$$



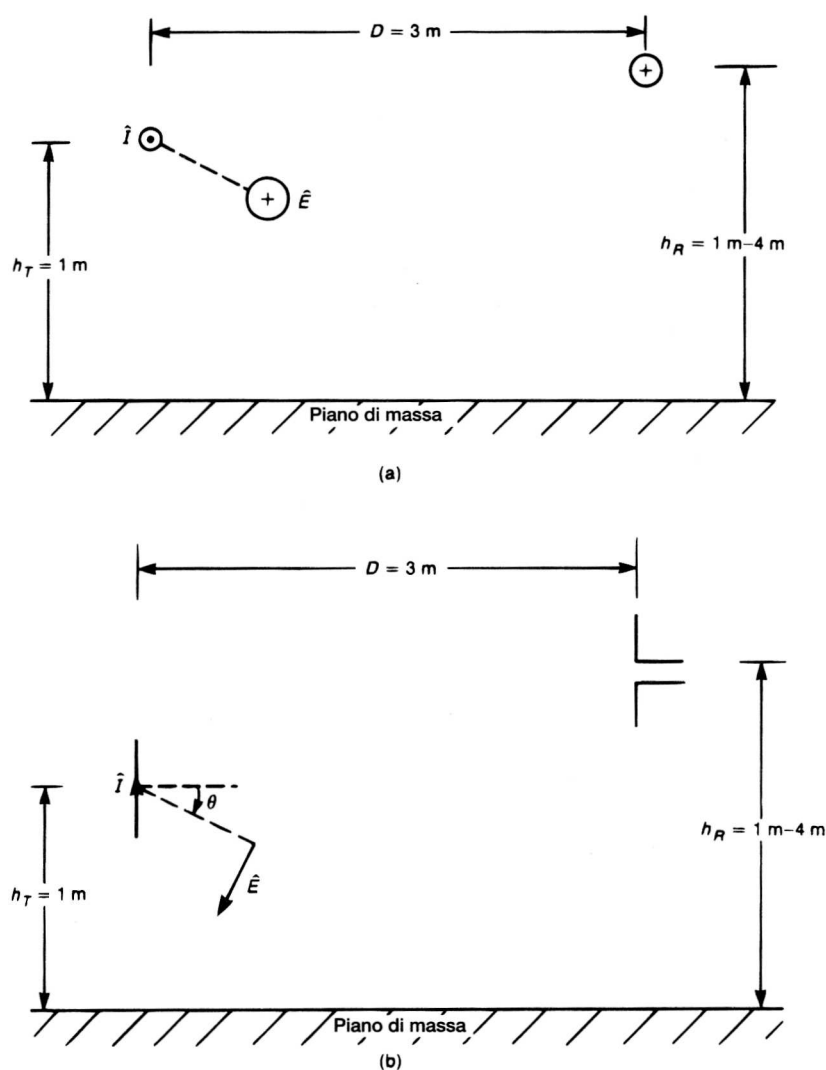


Fig. 2.3 –Determinazione del fattore di correzione per l'onda riflessa per le prove fissate dalla FCC per i dispositivi di classe B: (a) polarizzazione orizzontale; (b) polarizzazione verticale.

Nella tabella 2.1 è riportato il valore di tale fattore per alcune frequenze all'interno dell'intervallo 30 MHz - 1 GHz specificato per le emissioni radiate. Per il calcolo del fattore dato dalla (2.11b), nel caso di *polarizzazione verticale*, occorre considerare il diagramma di irradiazione dell'antenna. A questo proposito si ricorda che il diagramma di irradiazione è massimo nel piano equatoriale dell'antenna ed è nullo in direzione polare. Il diagramma di irradiazione varia in funzione del coseno degli angoli  $\theta_{Tr}$ ,  $\theta_{Td}$ ,  $\theta_{Rr}$  e  $\theta_{Rd}$  riportati in Fig. 2.1. Quindi il fattore (2.11b) diventa:

Frequenza (MHz)	F <sub>1m.</sub> (dB)	F <sub>4m.</sub> (dB)
30	-8,32	-1,30
40	-6,24	+0,73
50	-4,54	+2,21
60	-3,12	+3,28
70	-1,92	+4,03
80	-0,90	+4,50
90	+0,00	+4,73
100	+0,78	+4,71
110	+1,47	+4,46
120	+2,07	+3,96
130	+2,61	+3,18
140	+3,08	+2,07
150	+3,49	+0,53
160	+3,85	-1,58
170	+4,17	-4,54
180	+4,44	-8,63
190	+4,67	-11,2
200	+4,86	-7,63
300	+4,78	+4,42
400	+0,43	+3,42
500	-15,1	+3,81
600	+1,10	-0,55
700	+4,93	+2,85
800	+4,69	+1,45
900	+0,07	+1,44
1000	-14,0	+2,86

Tab. 2.1 – Fattore di correzione per la polarizzazione orizzontale

$$\hat{F}_V = 1 + \frac{\cos \theta_{Tr} \cos \theta_{Rr}}{\cos \theta_{Td} \cos \theta_{Rd}} \hat{\Gamma}_V \frac{d}{d_r} e^{-j(2\pi/\lambda_0)(d_r-d)} \quad (2.17)$$

I valori dei coseni degli angoli sopra citati sono:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{Tr} &= \frac{D}{d_r} & \cos \theta_{Rr} &= \frac{D}{d_r} \\ \cos \theta_{Td} &= \frac{D}{d} & \cos \theta_{Rd} &= \frac{D}{d} \end{aligned}$$

In Tab. 2.2 è riportato il valore di questo fattore per determinate frequenze.

*Per i precedenti risultati si è ipotizzato che l'antenna ricevente fosse situata nella regione di campo lontano dell'antenna trasmittente:* infatti si è ipotizzato che i campi

variassero con la distanza come  $\frac{e^{-j\beta r}}{r}$ . Utilizzando questi valori unitamente a  $\hat{\Gamma}_V = +1$  si ha:

$$\hat{F}_V = 1 + \left(\frac{d}{d_r}\right)^3 e^{-j(2\pi/\lambda_0)(d_r-d)}$$

Frequenza MHz	F <sub>1m.</sub> (dB)	F <sub>4m.</sub> (dB)
30	+3,80	+1,95
40	+3,69	+1,24
50	+3,54	+0,32
60	+3,36	-0,81
70	+3,14	-2,08
80	+2,88	-3,32
90	+2,58	-4,13
100	+2,24	-4,08
110	+1,86	-3,20
120	+1,42	-1,94
130	+0,94	-0,67
140	+0,40	+0,44
150	-0,19	+1,33
160	-0,85	+2,01
170	-1,58	+2,48
180	-2,37	+2,75
190	-3,24	+2,83
200	-4,15	+2,71
300	-3,73	-3,07
400	+2,43	+2,35
500	+3,95	-1,65
600	+2,07	+1,74
700	-4,95	-0,28
800	-3,31	+0,86
900	+2,25	+0,87
1000	+3,94	-0,29

Tab.2.2 – Fattore di correzione per la polarizzazione verticale

## 2.2 Teoria sulla camera anecoica

Per le misure di EMC è previsto un ambiente di prova che assicuri misure accurate e riproducibili nel tempo. Una condizione indispensabile affinché ciò avvenga è utilizzare ambienti di prova idonei. L'ambiente di riferimento per le misure di emissioni irradiate è costituito dal sito all'aperto descritto nella norma C63.7 dell'ANSI (American National Standard Institute). Un sito all'aperto è costituito da un piano metallico (piano di massa) posto in un'area libera da ostacoli, in modo da non avere riflessioni indesiderate. L'area in questione deve avere la forma di un'ellisse le cui dimensioni devono essere quelle di

Fig. 2.4, dove  $R$  rappresenta la distanza tra l'apparato in prova e l'antenna ricevente della strumentazione di misura. Questi siti sono utilizzati per misure ad  $R = 10$  m oppure  $R = 30$  m.

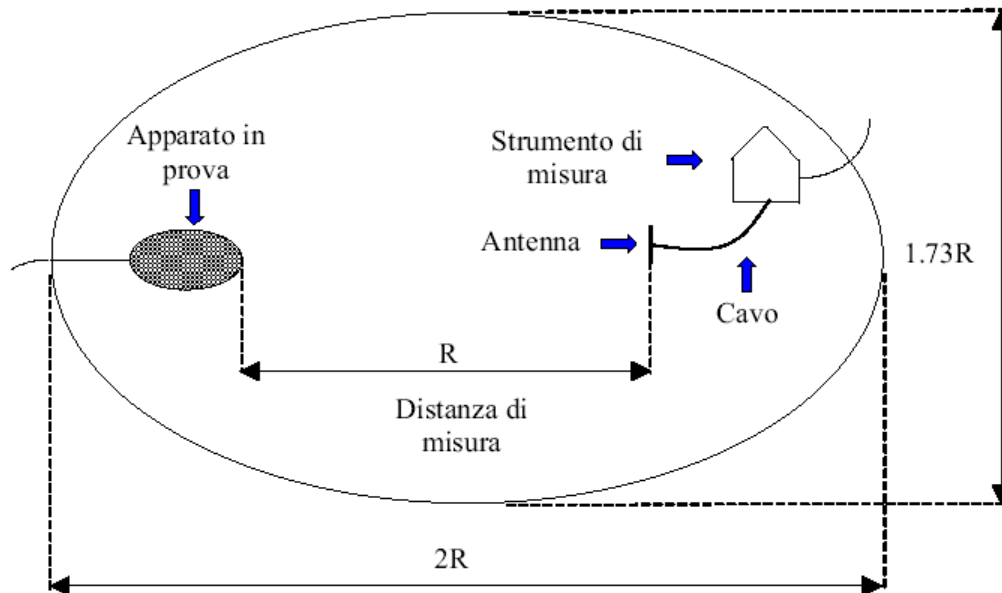


Fig. 2.4 – Schematizzazione dell'OATS

Però un OATS (Open Area Test Site ) presenta ovvi inconvenienti.

Una valida alternativa all'utilizzo dei siti all'aperto per le misure d'emissioni irradiate, è costituita dalle camere schermate semianecoiche (CSSA) descritte nella norma ANSI C63.4 e nella CISPR 16-1. Per un OATS è richiesta un'area libera da ostacoli nei dintorni circostanti all'EUT e all'antenna. L'area libera non deve essere perturbata in modo significativo da sparpagliamento di campi elettromagnetici e deve essere abbastanza larga in maniera che le riflessioni al di fuori dell'area abbiano un minimo effetto sul campo misurato dall'antenna ricevente. Per determinare l'adeguatezza di quest'area si deve eseguire il test di convalida del sito.

Quando il campo diffonde da un oggetto c'è una dipendenza da molti fattori (dimensioni dell'oggetto, distanza dall'EUT, orientazione rispetto all'EUT, conducibilità e permittività dell'oggetto, frequenza, ecc.) e quindi non è pratico specificare un'area libera

per ogni singola applicazione. Inoltre la dimensione e la forma dell'area libera dipende dalla distanza e se l'EUT ruoterà. Se il sito è equipaggiato con una piattaforma girevole è raccomandata un'area libera a forma di ellisse con l'antenna ricevente e l'EUT ai due fuochi

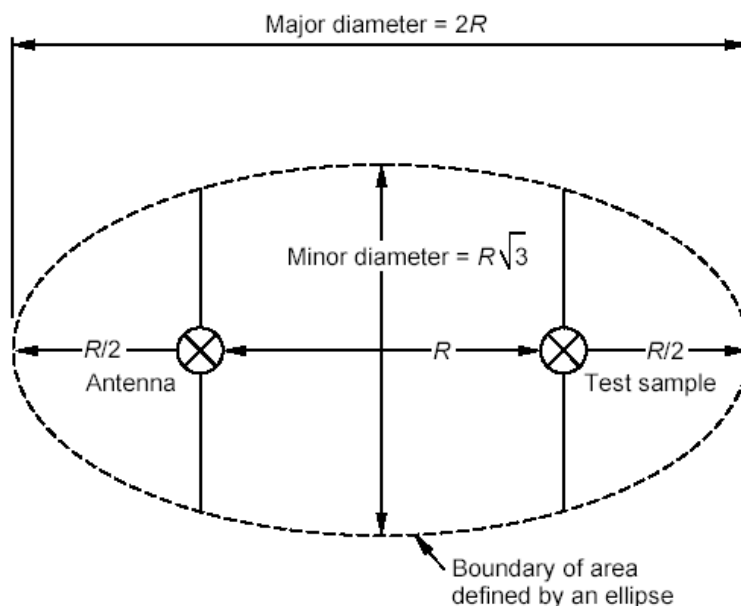


Fig. 2.5 – Area libera da materiale semianecoico

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

### 2.2.1 Materiale anecoico

Dalla camera schermata per realizzare la camera semianecoica è quindi necessaria l'anecoicizzazione delle pareti interne e del soffitto. L'obiettivo di ridurre le riflessioni non desiderate si raggiunge ricoprendo il materiale conduttore delle pareti con materiale

poco riflettente e che riduca adeguatamente l'energia dell'onda incidente prima che questa arrivi alla parete metallica. La caratteristica principale per i materiali assorbenti è la riflettività,  $R = V_r/V_i$ , questa viene valutata considerando un conduttore perfetto posto dietro al materiale assorbente. Quindi la camera anecoica è costituita da una camera schermata, le cui pareti interne ed il soffitto sono ricoperte da materiale anecoico con proprietà assorbenti (nei confronti delle radiazioni elettromagnetiche) in un ampio intervallo di frequenze (assorbenti a larga banda). Il pavimento invece è costituito da un piano di massa perfettamente conduttore. La camera schermata serve ad impedire ai segnali esterni di contaminare l'ambiente interno, mentre il materiale assorbente non permette la riflessione delle emissioni del dispositivo in prova sulle pareti perimetrali e sul soffitto. Il materiale anecoico simula il campo aperto. Il fenomeno della riflessione può e deve avvenire sul piano di massa della camera.

In generale il materiale assorbente per camere anecoiche è diviso in materiale *poliuretano tradizionale* (dielettrico per le microonde) (per frequenze superiori a 1 GHz) e *ferriti* (per frequenze da pochi megahertz sino oltre 1 GHz)

L'insieme delle due tipologie di materiali consente di coprire l'intero range di frequenze richiesto.

### **Ferriti**

I pannelli di ferrite costituiscono la soluzione ottimale a problemi di ingombro interno, avendo uno spessore di non più di 3 cm, incluso il materiale di supporto sul quale le singole mattonelle di ferrite sono assemblate manualmente, per garantire accoppiamenti precisi tra una piastrella e l'altra. Le piastrelle di ferrite possiedono un'elevata attenuazione della radiazione a radio-frequenza incidente, in particolare nello spettro di frequenza da pochi megahertz sino oltre 1 GHz, e sono per loro natura ignifughi (riducono quindi il pericolo di incendi all'interno della camera). Gli assorbitori di ferrite, in particolare, pur essendo al momento senza alternativa, presentano alcuni inconvenienti. Oltre al peso e al costo elevati, le prestazioni delle ferriti, ottime per incidenza normale, si degradano al crescere dell'angolo di incidenza. Un materiale assorbente perfetto dovrebbe presentare un coefficiente di riflessione nullo a qualunque frequenza, indipendentemente dalla direzione d'incidenza e dalla polarizzazione. È evidente come questo non sia fisicamente realizzabile: un materiale reale potrà al più avere riflessione trascurabile – e massimo assorbimento – per certi valori dell'angolo d'incidenza in una banda assegnata.

Le ferriti sono materiali ceramici che combinano una bassissima conducibilità ad un'elevata polarizzabilità magnetica, il loro comportamento può essere considerato lineare solo se l'intensità del campo magnetico è abbastanza piccola (altrimenti si ha saturazione del materiale), in questa ipotesi di lavoro le ferriti possono essere caratterizzate mediante la permeabilità magnetica  $\mu_r$ . La loro proprietà dissipativa per il campo magnetico ricorda quella dei dielettrici polari per il campo elettrico; un campo magnetico ha l'effetto di produrre dei "domini" all'interno della ferrite, la magnetizzazione (formazione dei domini) richiede energia che viene assorbita dal campo magnetizzante. Un campo magnetico variabile nel tempo modifica l'orientamento dei domini quindi assicura una continua perdita di energia. All'aumentare della frequenza, a causa della loro inerzia, i domini non riescono più a mutare la loro orientazione con la rapidità richiesta dalle sollecitazioni elettromagnetiche, a questo corrisponde una diminuzione della permeabilità magnetica, per questo motivo le prestazioni decadono al di sopra di qualche centinaio di MHz.

In particolare si vedono le proprietà delle ferriti che sono in utilizzo nella camera semianecoica oggetto dello studio.

In Fig. 2.7 (riportata nel paragrafo successivo) si visualizza la performance di una piastrella di ferrite al variare dell'angolo di incidenza. In dettaglio ecco le caratteristiche della ferrite usata:

<i>Specific Gravity</i>	5.2	
<i>Young's Modulus</i>	$1.8 \times 10^4$	Kgf/mm <sup>2</sup>
<i>Tensile Strength</i>	42	Kgf/mm <sup>2</sup>
<i>Flexural Strength</i>	6	Kgf/mm <sup>2</sup>
<i>Vickers Hardness</i>	740	
<i>Coeff. of Thermal Expansion</i>	$9 \times 10^{-6}$	/°C
<i>Initial Permittivity (relative)</i>	2100	$\mu_r$
<i>Relative Permittivity</i>	14	$\epsilon_r$
<i>Resistivity</i>	$5 \times 10^6$	ohm-cm
<i>Curie Temperature</i>	>95	°C
<i>Composition</i>	Nickel-Zinc Ferrite	
<i>Power Handling (CW)</i>	400	V/m
<i>Weight (6.3mm)</i>	324 grams	
<i>Dimensions</i>	100mm x 100mm x 6.3mm $\pm$ 0.13mm	

Le ferriti sono incollate su pannelli di compensato (materiale dielettrico) di spessore 12 mm. Questi pannelli sono poi posizionati sulle pareti e sul soffitto della camera.

### **Poliuretano impregnato**

Si è visto come le ferriti siano efficaci da pochi MHz a massimo 1 GHz. Un'estensione di tale intervallo di frequenze fino ai (18 ÷ 40) GHz è possibile qualora si sovrapponga a tali pannelli dell'altro materiale assorbitore.

Per dissipare i campi elettrici si utilizzano materiali che presentano un elevato valore di perdite elettriche, proprietà strettamente legata alla conducibilità quindi alla permeabilità elettrica complessa (permittività). Il materiale utilizzato è polietere poliuretano a celle aperte impregnato di una soluzione composta di: polvere di carbone dielettrico (che ne regola la conducibilità), legante acrilico per fissare la particella di carbone al poliuretano, soluzione ignifuga e acqua. Dopo aver dato la forma desiderata al poliuretano, l'impregnamento si ottiene comprimendo il materiale e immergendolo nella soluzione acquosa; allentando lentamente la pressione il poliuretano assorbe la soluzione come fosse una spugna, questa operazione viene ripetuta più volte. Il polietilene rende il supporto elastico mentre l'alta percentuale di celle aperte (la percentuale di celle aperte si può descrivere come la proprietà del materiale di essere attraversato dall'aria o da una soluzione) migliora la penetrazione della soluzione all'interno del poliuretano. L'ultima operazione del processo consiste nell'asciugare il poliuretano in un forno, allo scopo di permettere la polimerizzazione del legante acrilico e l'evaporazione dell'acqua.

Nelle fasi descritte il poliuretano ha assorbito la polvere di carbone assumendo il colore scuro, l'operazione finale consiste nel colorare la superficie del materiale per migliorare l'illuminazione dell'ambiente in cui verrà installato (nel caso considerato in questa trattazione verrà colorato di blu).

Al poliuretano viene data la forma di più piramidi adiacenti posizionate sopra uno strato omogeneo di poliuretano. Le elevate prestazioni di assorbimento sono dovute al particolare geometria delle piramidi che all'arrivo del raggio creano un rimbalzo ripetuto tra i lati delle piramidi mentre solo una piccola porzione dell'onda incidente arriva alla base della piramidi e alla parete conduttrice della camera.

### **Coni assorbenti FrankoSorb**

Come è noto, uno degli inconvenienti tipici degli assorbitori tradizionali in poliuretano impregnato di grafite, è la scarsa riproducibilità delle loro caratteristiche fisiche. Misure eseguite su campioni prelevati dalla stessa piramide, o da diverse piramidi dello stesso blocco, hanno infatti riportato pesanti variazioni dei valori delle grandezze complesse  $\epsilon$  e  $\sigma$ .

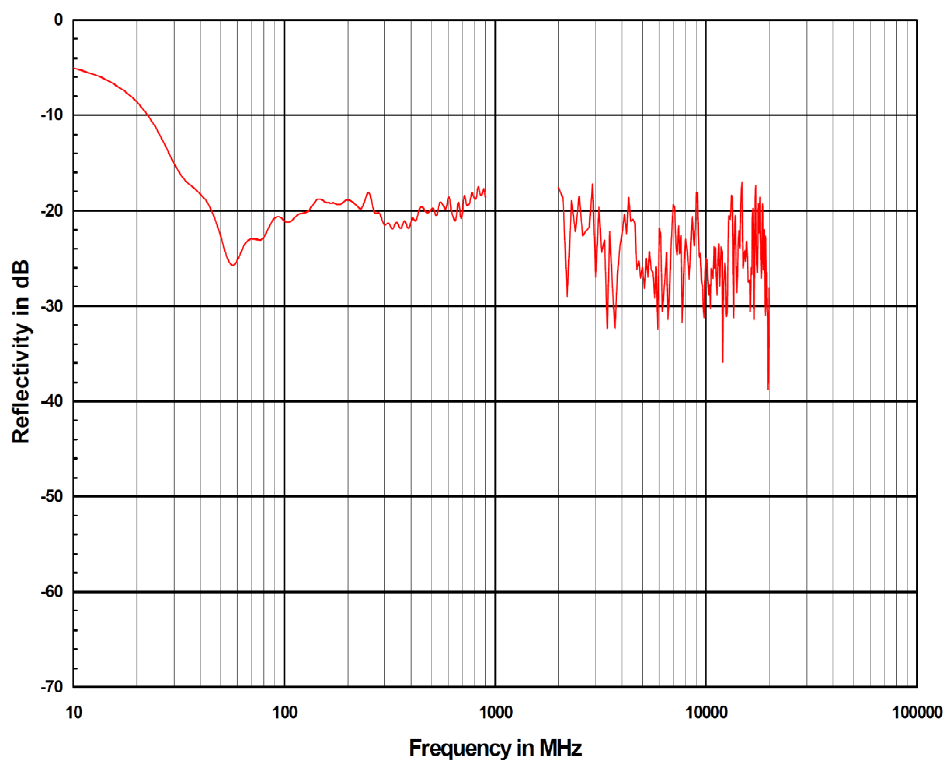


Questo difetto porta ai noti problemi di instabilità a lungo termine della camera e previsioni approssimate sul suo comportamento elettromagnetico nel breve periodo.

Il FrankoSorb, elimina alla radice i problemi dei coni tradizionali dielettrici. La disposizione appropriata di particelle metalliche di minuscole dimensioni in una matrice adattata, che costituisce la base del FrankoSorb, giustifica la sua superiore riproducibilità: il valore della resistenza del film elettrico può essere regolato con accuratezza e reso costante entro pochi percento, anche per grandi lotti di produzione. Un test ripetuto di riflessione in una guida d'onda, ha dimostrato che il coefficiente di riflessione di molte migliaia di coni è lo stesso, entro l'accuratezza di misura di  $\pm 1$ dB.

Inoltre, il cono FrankoSorb, è non poroso, quindi di durata virtualmente illimitata e gode di assoluta indifferenza all'umidità (nemica di ogni materiale poroso) e di nessuna perdita di particelle di carbonio nel tempo, mantenendo le caratteristiche elettromagnetiche della camera nel lungo periodo. La costanza delle figure di attenuazione di ogni singolo cono, è garanzia di durata e continuità delle caratteristiche a radio frequenza della camera. Infatti, dovendo sostituire nel tempo uno o più coni a causa di cambiamenti di specifiche EM, FrankoSorb , garantiscono la risposta della camera in termini di NSA e uniformità di campo, senza dover ricorrere a lunghe e costose operazioni di calibrazione.

Per questi motivi più performanti verranno usati (insieme ai coni di poliuretano) all'interno della camera semianecoica in studio. Per ragioni di costo si cerca di limitare il numero di coni FrankoSorb. Questi coni hanno frequenza di lavoro 50MHz÷40GHz. Tali coni (di colore bianco) hanno base 30x30cm e possono essere installati con facilità sopra i pannelli di ferriti. Sono di due dimensioni: i coni più corti sono più idonei per le alte frequenze, mentre quelli più lunghi per le basse frequenze.



*Fig. 2.6 – Tipica attenuazione dei coni FrankoSorb*

In figura 2.6 sono rappresentati i valori tipici di attenuazione dei coni FrankoSorb corti. Le misure nella banda di frequenza da 10 a 900 MHz sono effettuate in incidenza nominale in una linea coassiale di 17m di lunghezza. Nella banda del GHz la riflettività è misurato in spazio aperto per un angolo di incidenza di 45 °.

### **2.3 Modellizzazione delle riflessioni all'interno della camera**

Il seguente studio ha lo scopo di analizzare le riflessioni all'interno della camera semianecoica e capire come esse influiscono sul risultato della misura dell'attenuazione della camera. Nella prima parte della trattazione si analizza l'argomento da un punto di vista puramente teorico, successivamente si riporta questo ragionamento alla geometria del sito. In un secondo tempo si esegue una simulazione dell'andamento delle riflessioni nella camera in oggetto (con le caratteristiche delle ferriti in utilizzo e le proprietà delle antenne specifiche usate per la prova), di conseguenza si collocano i coni assorbenti nei punti più critici per le riflessioni. Si procede successivamente alla misura dell'attenuazione della camera ed a un ulteriore studio, questa volta sperimentale, per soddisfare le specifiche richieste dalla norma .

La procedura può essere utilizzata per stimare il livello di segnale riflesso nella regione di test considerando il caso peggiore. L'antenna trasmittente e l'obiettivo sono sull'asse longitudinale della camera. Poiché il materiale assorbente sulle pareti della camera non è perfettamente assorbente, l'energia può propagarsi dall'antenna trasmittente alla zona di test lungo diversi percorsi. Molti di questi sono illustrati nella figura 2.7; i raggi più importanti che raggiungono la regione di test sono disegnati come linee continue di colore rosso.

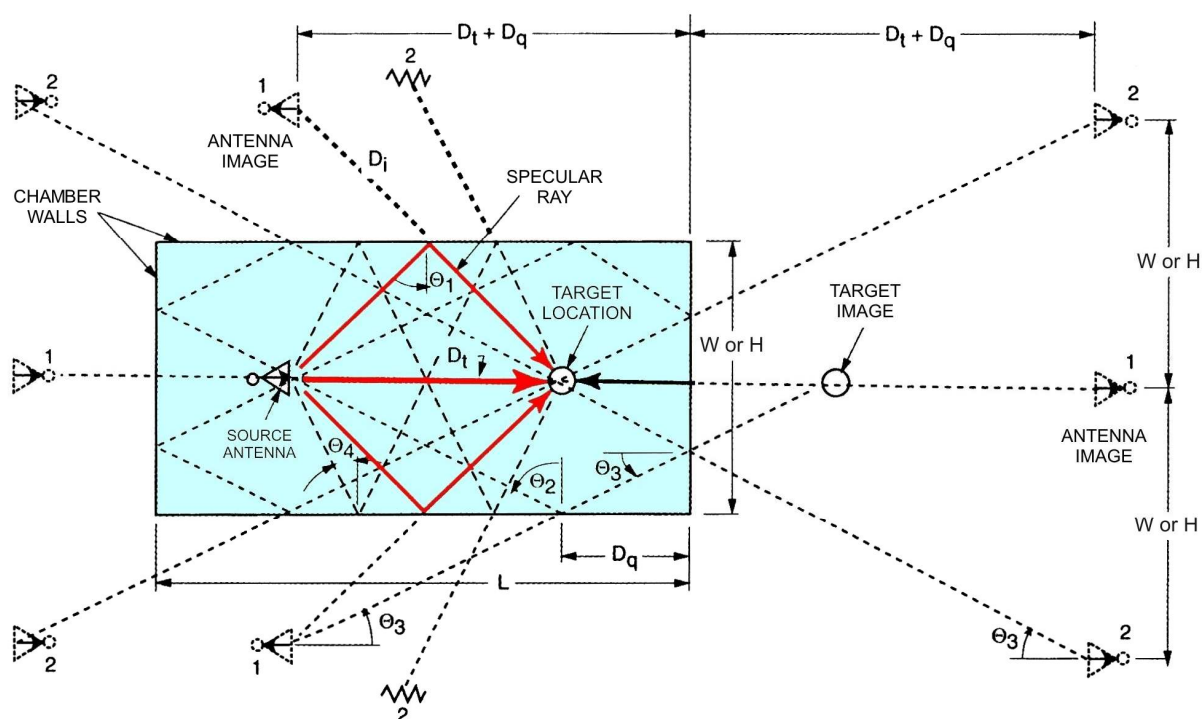


Fig. 2.7 – Rappresentazione grafica dettagliata della traccia dei raggi

Il primo (più importante) è il raggio diretto dall'antenna sorgente alla zona di test (raggio diretto senza nessuna riflessione). Subito dopo per importanza ci sono i raggi speculari a riflesso singolo provenienti dalle due pareti laterali, dal soffitto e dal pavimento. I raggi sono disegnati per tutto il percorso, a partire dall'antenna trasmittente, verso le pareti della camera, fino ad arrivare all'antenna ricevente (obiettivo).

Questo è il metodo convenzionale per definire l'angolo d'incidenza quando il produttore misura il coefficiente di riflessione del materiale assorbente. Il fatto che i raggi possano essere rifratti dalla superficie del materiale assorbente viene ignorato. (Ciò renderebbe i raggi effettivi leggermente più lunghi di quelli disegnati in figura). È inoltre ignorato qualsiasi spostamento di fase causato dalla velocità di propagazione all'interno del materiale assorbente, che è più lenta che nello spazio libero.

Successivo per importanza è il raggio a riflessione singola, speculare dal muro (dietro l'antenna ricevente) e direttamente illuminato dal lobo principale dell'antenna. Viene successivamente considerata la riflessione sulla parete dietro l'antenna sorgente.

Infine si hanno i raggi che rimbalzano colpendo la parete laterale e la fine del muro (che può essere il muro dietro l'antenna trasmittente o dietro l'antenna ricevente) per poi arrivare all'antenna ricevente, e i raggi fanno un rimbalzo sulla parete laterale e successivamente su quella opposta. Ciascuno dei raggi riflessi può essere analizzato come proveniente da un'immagine dell'antenna sorgente.

Queste immagini sono disegnate con linee tratteggiate in Fig. 2.7 dove il numero di fianco ad ogni immagine dell'antenna indica il numero di riflessioni associate ad essa. L'immagine associata al raggio a riflessione singola è semplicemente l'immagine speculare dell'antenna al muro che il raggio colpisce. L'immagine associata al raggio a doppia riflessione viene trovata considerando in primo luogo l'immagine dell'antenna speculare al primo muro colpito; poi bisogna trovare l'immagine di questa immagine considerando il muro della seconda riflessione.

Questo processo può essere continuato all'infinito per tenere conto di altri rimbalzi multipli. Quelle immagini e i relativi raggi riflessi sono di più piccole dimensioni rispetto a quelli indicati, in quanto il raggio è ulteriormente attenuato in ciascun punto di riflessione. La figura 2.7 mostra un vantaggio nell'utilizzo del concetto di immagine. Questo vantaggio è la facilità con cui i raggi si possono trarre. La retta che congiunge ogni immagine di primo ordine (singola riflessione) con l'antenna vera e propria è perpendicolare alla rispettiva parete, e l'antenna reale e la sua immagine sono equidistanti dalla parete.

Allo stesso modo, le immagini del primo ordine sono rappresentate nelle altre pareti (o estensioni di altri muri) per formare le immagini di secondo ordine (doppia riflessione). Una linea retta tracciata da ogni immagine verso l'antenna ricevente definisce la direzione di incidenza sull'obiettivo e definisce il punto della riflessione speculare al muro. Ciò

fornisce una geometria semplice per calcolare l'angolo di incidenza sul materiale assorbente.

Ad esempio, l'immagine a doppia riflessione in basso a destra nella figura 2.7 consente il calcolo rapido dell'angolo di incidenza  $\theta_3$  come  $\tan^{-1}\left(\frac{W}{D_t+2D_q}\right)$ . Tuttavia, si può utilizzare la linea tracciata dall'immagine di primo ordine (in fondo alla figura) verso l'immagine dell'obiettivo per arrivare alla stessa risposta. La parte di quest'ultima linea che si trova all'interno della camera definisce un tratto del raggio effettivo. L'angolo di incidenza definito come  $\theta_2$  è il complemento di  $\theta_3$ .

Il secondo vantaggio del concetto di immagine è che, una volta determinate le posizioni delle immagini dell'antenna, si possono usare semplici equazioni di propagazione nello spazio libero per calcolare i contributi dei campi da ciascuna antenna immagine verso l'obiettivo. Cioè, si assume che le pareti delle camere non esistano.

L'obiettivo è illuminato sia da un gruppo di antenne immagine che dall'antenna di origine. Ogni antenna immagine si presume colpisca l'obiettivo con minore potenza rispetto a quella della fonte, a causa delle perdite dovute alle riflessioni nella parete. Sono anche presi in considerazione i diagrammi direzionali di radiazione delle antenne immagine, come spiegato di seguito.

I raggi a singolo rimbalzo potrebbero essere facilmente costruiti in figura 2.7 senza ricorrere all'uso di immagini dell'antenna. Se l'antenna trasmittente o l'obiettivo, o entrambi, sono fuori dall'asse della camera, allora il concetto di immagine diventa molto più utile per tracciare anche i raggi a singola riflessione. Se le pareti della camera riflettessero perfettamente il segnale, allora ogni immagine dell'antenna darebbe un contributo di segnale con la stessa potenza dell'antenna sorgente.

Tuttavia, le antenne immagine vengono trattate come se dessero un contributo di minor energia rispetto l'antenna sorgente, contributo ridotto di un fattore esattamente uguale al coefficiente di riflessione del materiale assorbente nel punto in cui il raggio viene riflesso dalla parete. I grafici che ci indicano l'attenuazione al variare dell'angolo di incidenza (in funzione della frequenza) possono essere utilizzati per determinare l'attenuazione in decibel dell'immagine rispetto l'antenna trasmittente.

Per le immagini a doppia riflessione, i coefficienti di riflessione del materiale assorbente si trovano singolarmente in ogni punto di riflessione sulle pareti, e successivamente si sommano insieme i due valori di attenuazione in decibel per determinare l'attenuazione totale dell'immagine.

Un'ulteriore considerazione è l'effetto della direttività dell'antenna sorgente sui raggi riflessi. L'antenna trasmittente è allineata in modo che il picco del suo raggio è diretto verso il centro della regione test. L'antenna illumina le pareti con ampiezza di segnale più debole a seconda del suo diagramma di irradiazione. Le immagini dell'antenna hanno lo stesso diagramma di irradiazione dell'antenna sorgente, e l'angolo tra l'asse del lobo principale dell'immagine e il rispettivo raggio è lo stesso sia per ogni antenna immagine che per l'antenna trasmittente. Il guadagno dell'antenna, misurato in decibel considerando la direzione del raggio rispetto all'asse del lobo principale, è algebricamente sommato alla riflessione della parete di cui si è discusso in precedenza. Il diagramma di irradiazione dell'antenna è dato dal certificato di taratura dell'antenna.

Un ultimo fattore da considerare è la differenza tra la lunghezza del percorso del raggio diretto e i percorsi riflessi. Il fattore di propagazione da applicare a ciascun raggio riflesso è:

$$P = 20 \log \left( \frac{D_t}{D_i} \right) \quad (dB) \quad (2.18)$$

Dove:

- $D_i$  è la distanza tra l'immagine dell'antenna trasmittente e la posizione dell'antenna ricevente;
- $D_t$  è la distanza dall'antenna trasmittente alla posizione di quella ricevente.

Il fattore di propagazione (P) è sommato al guadagno relativo dell'antenna (G) e al coefficiente di riflessione della parete (R), per trovare l'ampiezza di ciascun raggio riflesso che raggiunge l'antenna ricevente (bersaglio). Ogni fattore è espresso in decibel e ne risulterà un numero negativo. Scrivendo l'equazione si ottiene:

$$T = R + G + P \quad (dB) \quad (2.19)$$

Dove:

- T è la forza totale di ogni raggio a più traiettorie che raggiunge il centro della regione di test (antenna ricevente), espressa in decibel rispetto al raggio diretto;
- R è il coefficiente di riflessione del raggio speculare dove esso viene riflesso dal materiale assorbente, misurato in decibel rispetto ad un piano metallico. Se abbiamo più riflessioni sul materiale assorbente allora R è la somma dei coefficienti di riflessione di ciascuna riflessione speculare;

- G è il guadagno dell'antenna rispetto al picco del fascio, espresso in decibel;
- P è il fattore di propagazione (o lunghezza del percorso) del raggio riflesso rispetto al raggio diretto, misurato in decibel (definito dall'equazione (2.18)).

Si supponga una camera anecoica con le specifiche come indicato in Fig. 2.8. La figura 2.8 mostra diversi possibili percorsi che i raggi a più riflessioni possono percorrere dall'antenna sorgente al centro della regione test. I raggi A, B e C coinvolgono solo una riflessione sulla rispettiva parete, mentre i raggi D, E, F si riflettono su due pareti. Per semplicità si disegna solo un raggio per ciascun tipo.

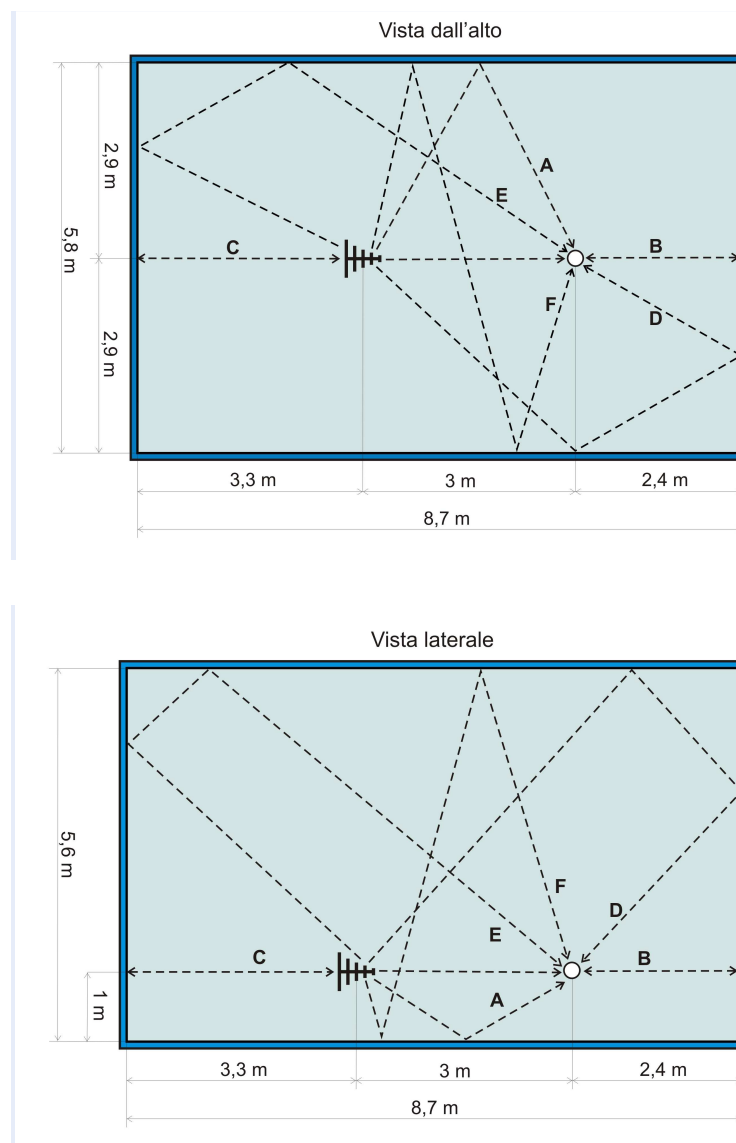


Fig. 2.8 – Camera anecoica

Si prenda in considerazione, per esempio, il raggio A: per ogni raggio A avremo tre raggi supplementari a quello indicato. Vale a dire che oltre al raggio A indicato che si riflette da un lato della parete, ci saranno altri raggi simili che si riflettono sull'altro lato della parete, sul soffitto e sul pavimento. Quindi ci saranno tre raggi in più per ogni raggio A, D, E e F; mentre i raggi B e C sono unici in quanto si riflettono sulle due estremità della camera.

Raggi che coinvolgono tre o più riflessioni non sono disegnati, perché sarebbero di ampiezza trascurabile. Inoltre non sono disegnati i raggi a rimbalzo multiplo che non possono essere disegnati in un piano orizzontale o verticale.

Ad esempio, un raggio potrebbe colpire in alto una parete laterale a circa a metà strada fra l'antenna trasmittente e l'obiettivo, poi rimbalzare fino al soffitto e poi verso l'antenna ricevente. Tali raggi a doppio rimbalzo potrebbero essere paragonabili in ampiezza ai raggi a doppio rimbalzo che vengono tracciati.

Si vuole ora effettuare una trattazione teorica più approfondita che ha lo scopo di studiare e ricavare con accuratezza il contributo di ogni singolo raggio (a riflessione singola e a riflessione doppia).

Come si è visto la tipologia di raggio A è composta da quattro raggi: un raggio che si riflette sul pavimento, uno sulla parete destra, uno sulla parete sinistra e uno sul soffitto. Una distinzione simile può essere effettuata per tutte le altre tipologie di raggi. Il seguente studio ci permetterà di ricavare il singolo contributo di ciascun raggio. Si ottiene in questa maniera una descrizione dettagliata (qualitativa e quantitativa) di tutti i raggi presenti nella camera che partono dall'antenna trasmittente e vengono captati dall'antenna ricevente. Nella trattazione vengono trascurati i raggi con più di due rifrazioni in quanto notevolmente attenuati e non rilevanti rispetto ai raggi a singola e doppia riflessione.

Lo studio sarà differenziato nel caso in cui si debba stimare l'NSA o il VSWR del sito. La sostanziale differenza tra le due tarature è che la seconda prevede l'utilizzo di coni assorbenti sopra il pavimento metallico; naturalmente cambiano anche le antenne e il loro diagramma di radiazione. Vediamo con particolare attenzione la stima dell'NSA.



## 2.4 Studio delle riflessioni nella stima dell'NSA del sito

La misura dell'NSA della camera semianecoica viene fatta per confronto con un sito all'aperto ideale costituito da un piano metallico (piano di massa) posto in un'area libera da ostacoli (in modo da non avere riflessioni indesiderate). Quindi il sito dovrà avere le stesse caratteristiche (in termini di riflessioni) del sito ideale (entro 4 dB) per essere a specifica. La prova si effettua per il range di frequenze 30 MHz ÷ 1000 MHz.

La camera semianecoica è completamente rivestita di ferrite (tutte le pareti e il soffitto) ad eccezione del pavimento che è un piano metallico. È importante che nel pavimento riflettente non siano presenti coni assorbenti (vedremo più avanti meglio questo concetto). Il pavimento è una superficie conduttrice che viene approssimato a conduttore perfetto; per cui si avrà una riflessione totale dei campi elettromagnetici sul pavimento senza alcuna attenuazione.

Lo scopo di questo studio è localizzare i punti di riflessione critici in maniera da poter limitare il loro effetto con l'aggiunta di materiale assorbente.

Si inizia lo studio indicando tutti i raggi rilevanti dal punto di vista delle riflessioni all'interno della camera.

Designazione del raggio	Numero di riflessioni	Riflessioni
A 1	1	parete
A 2	1	parete
A 3	1	pavimento
A 4	1	soffitto
B	1	retro (lato obiettivo)
C	1	retro (lato antenna)
D 1	2	parete, retro (lato obiettivo)
D 2	2	parete, retro (lato obiettivo)
D 3	2	pavimento, retro (lato obiettivo)
D 4	2	soffitto, retro (lato obiettivo)
E 1	2	retro (lato antenna), parete
E 2	2	retro (lato antenna), parete
E 3	2	retro (lato antenna), pavimento
E 4	2	retro (lato antenna), soffitto
F 1	2	parete, parete opposta
F 2	2	parete, parete opposta
F 3	2	pavimento, soffitto
F 4	2	soffitto, pavimento

Tab. 2.3 – Elenco dei raggi considerati

La Tab. 2.3 illustra tutti i raggi indicandone il numero di riflessioni e le facciate su cui si riflettono. Per esempio il raggio F1 sarà un raggio di tipo F che si riflette prima sulla parete e poi sulla parete opposta. Naturalmente è indifferente se si considera la parete destra o sinistra in quanto la camera è simmetrica e pertanto i raggi F1 e F2 (ma anche le coppie (A1,A2), (D1,D2) e (E1,E2)) risulteranno della stessa intensità. Successivamente si deve considerare l'angolo di incidenza con cui il raggio impatta nelle facciate della camera ( $0^\circ$  se perpendicolare alla superficie).

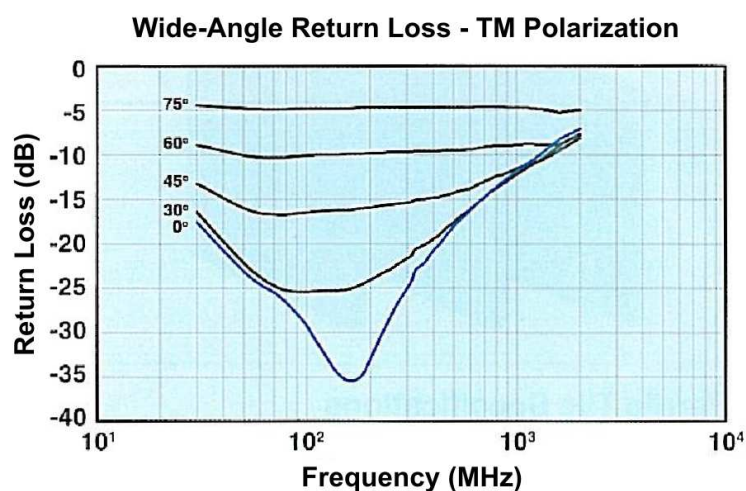


Fig. 2.9 – Attenuazione delle ferriti al variare dell'angolo di incidenza

In Fig. 2.9 è mostrata l'attenuazione delle ferriti che ricoprono le pareti della camera. Come si può vedere dalla figura l'attenuazione delle ferriti dipende dalla frequenza e dall'angolo di incidenza (da notare come al di sopra di 1 GHz si arrivi alla saturazione della ferrite con conseguente perdita di attenuazione).

Questo diagramma servirà per leggere il valore di attenuazione delle ferriti per completare le tabelle (che verranno visualizzate in seguito) in cui compaiono le attenuazioni di tutti i raggi considerati.

Altro parametro fondamentale per il calcolo delle attenuazioni è la riduzione di ampiezza del segnale (causata dalla direttività dell'antenna) letta nel diagramma di radiazione dell'antenna trasmittente.

Una serie di diagrammi di radiazione sono visualizzati nell'Allegato B dal cui esame si vede come alle basse frequenze il diagramma di radiazione sia quasi omnidirezionale, mentre all'aumentare delle frequenze tende ad essere sempre più direzionale.

Per questo motivo si decide di considerare due diagrammi, uno a bassa ed uno ad alta frequenza: 100 MHz e 1000 MHz.

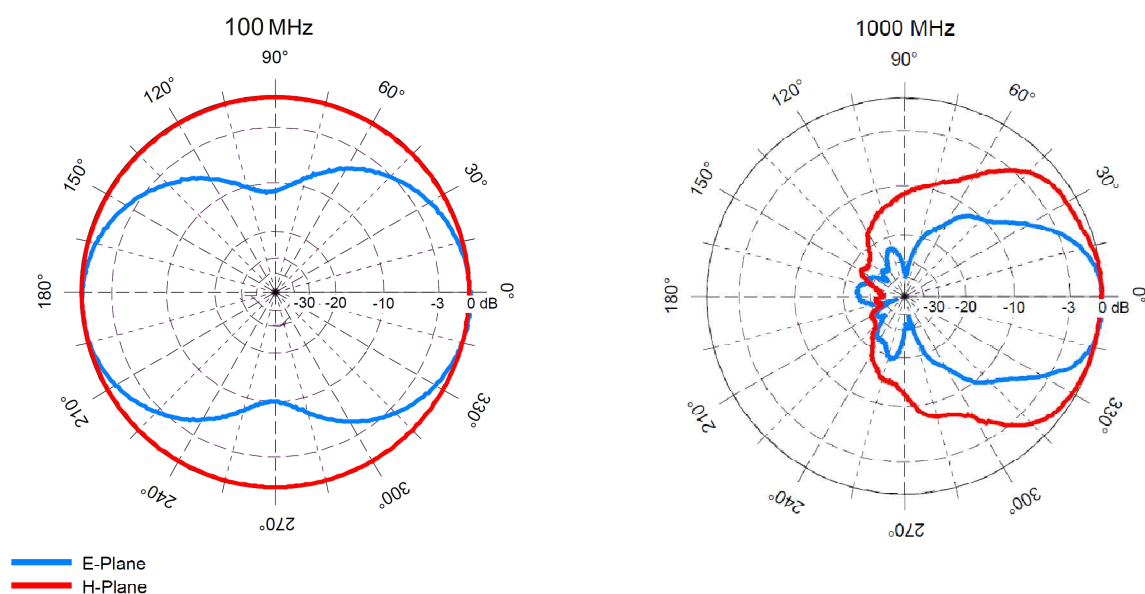


Fig. 2.10 – Diagramma di radiazione dell'antenna trasmittente a 100 MHz e 1 GHz

Dai diagrammi bidimensionali (Fig. 2.10) che rappresentano il campo elettrico (piano E) e il campo magnetico (piano H) si può ricavare l'attenuazione del raggio trasmesso. Per esempio il raggio A3 è orientato di  $288,43^\circ$  ( $-71,57^\circ$ ) rispetto al piano E e di  $0^\circ$  rispetto al piano H: dal diagramma di radiazione a 100 MHz di Fig. 2.10 quindi si legge un'attenuazione di -2dB. Viene eseguito questo calcolo per ogni singolo raggio e viene riportato il valore di attenuazione dato dal diagramma di radiazione dell'antenna.

In precedenza si è visto che la frequenza influisce sull'attenuazione delle ferriti e di conseguenza sull'ampiezza dei raggi; ora si è anche comprovato che riduce il segnale a seconda della direttività dell'antenna trasmittente in quanto il diagramma di radiazione varia con la frequenza.

Si riportano in una tabella tutti questi contributi che sommati (formula 2.19) quantificano la potenza in decibel di ogni raggio che raggiunge il centro della regione di test (antenna ricevente). La simulazione si è effettuata ipotizzando che obiettivo e antenna (in polarizzazione orizzontale) siano ad un'altezza di 1 metro dal piano riflettente.

I risultati sono riportati nelle tabelle 2.4 e 2.5.

Le tabelle 2.4 e 2.5 riassumono infatti i fattori che entrano in gioco nel calcolo dell'ampiezza di ciascun raggio dove abbiamo evidenziato in giallo i valori relativi ai

raggi più rilevanti ed in azzurro quelli relativi alla riflessione diretta sul piano di massa (richiesto dalla norma).

Da notare che nella tabella 2.5 il valore di attenuazione della ferrite è praticamente lo stesso per tutti i raggi; questo è dovuto alla saturazione della ferrite.

Le ferriti in generale hanno infatti un range di funzionamento che non supera 1 GHz.

Nell'ultima colonna delle tabelle 2.4 e 2.5 viene indicato il valore risultante per ciascuno dei raggi, normalizzato alla grandezza del raggio diretto che va dall'antenna sorgente al centro della regione test.

Si può notare come il segnale a maggiore potenza corrisponda al raggio a singola riflessione che rimbalza sul piano di massa. L'attenuazione del raggio A3 è -3,61 dB a 100MHz , mentre è -5,61 dB a 1 GHz, a conferma che alle alte frequenze l'attenuazione aumenta per la diminuzione di omnidirezionalità.

Si sottolinea che non ci devono essere coni assorbenti che attenuino questo raggio per restare su valori approssimabili all'OATS. Questo raggio, insieme a quello diretto, non viene considerato nel calcolo delle riflessioni indesiderate.

Per approssimazione l'attenuazione della riflessione dovuta al pavimento metallico è nulla.

Designazione del raggio	N. di riflessioni	Riflessioni	Prima riflessione (gradi)	Seconda riflessione (gradi)	Prima riflessione (dB)	Seconda riflessione (dB)	Direttività antenna (dB)	D <sub>1</sub> (m)	D <sub>2</sub> (m)	Fattore di propagazione P (dB)	Ampiezza del raggio (dB)
A 1	1	parete	28,18	-	-27	-	-3	3	6,53	-6,76	-36,76
A 2	1	parete	28,18	-	-27	-	-3	3	6,53	-6,76	-36,76
A 3	1	pavimento	71,57	-	0	-	-2	3	3,61	-1,61	-3,61
A 4	1	soffitto	18,82	-	-27	-	-9	3	9,68	-10,18	-46,18
B	1	retro (lato obiettivo)	0	-	-30	-	0	3	7,8	-8,30	-38,30
C	1	retro (lato antenna)	0	-	-30	-	0	3	9,6	-10,10	-40,10
D 1	2	parete, retro (lato obiettivo)	46,98	30,24	-17	-25	-2	3	8,72	-9,27	-53,27
D 2	2	parete, retro (lato obiettivo)	46,98	30,24	-17	-25	-2	3	8,72	-9,27	-53,27
D 3	2	pavimento, retro (lato obiettivo)	71,57	11,77	0	-28	-1	3	8,06	-8,58	-37,58
D 4	2	soffitto, retro (lato obiettivo)	40,71	43,78	-18	-17	-3	3	12,14	-12,14	-50,14
E 1	2	retro (lato antenna), parete	22,99	67,01	-27	-8	-2	3	11,27	-11,50	-48,50
E 2	2	retro (lato antenna), parete	22,99	67,01	-27	-8	-2	3	11,27	-11,50	-48,50
E 3	2	retro (lato antenna), pavimento	8,62	81,38	-30	0	-1	3	6,5	-6,72	-37,72
E 4	2	retro (lato antenna), soffitto	34,87	55,12	-22	-13	-5	3	13,54	-13,09	-53,09
F 1	2	parete, parete opposta	14,99	14,99	-28	-28	-6	3	11,6	-11,75	-73,75
F 2	2	parete, parete opposta	14,99	14,99	-28	-28	-6	3	11,6	-11,75	-73,75
F 3	2	pavimento, soffitto	14,84	14,84	0	-28	-7	3	11,59	-11,74	-46,74
F 4	2	soffitto, pavimento	14,84	14,84	-28	0	-7	3	11,59	-11,74	-46,74

Tab. 2.4 – Attenuazione dei raggi a 100 MHz (polarizzazione orizzontale)

Designazione del raggio	N. di riflessioni	Riflessioni	Prima riflessione (gradi)	Seconda riflessione (gradi)	Prima riflessione (dB)	Seconda riflessione (dB)	Direttività antenna (dB)	D <sub>1</sub> (m)	D <sub>2</sub> (m)	Fattore di propagazione P (dB)	Ampiezza del raggio (dB)
A 1	1	parete	28,18	-	-13	-	-16	3	6,53	-6,76	-35,76
A 2	1	parete	28,18	-	-13	-	-16	3	6,53	-6,76	-35,76
A 3	1	pavimento	71,57	-	0	-	-4	3	3,61	-1,61	-5,61
A 4	1	soffitto	18,82	-	-13	-	-20	3	9,68	-10,18	-43,18
B	1	retro (lato obiettivo)	0	-	-13	-	0	3	7,8	-8,30	-21,30
C	1	retro (lato antenna)	0	-	-13	-	-25	3	9,6	-10,10	-48,10
D 1	2	parete, retro (lato obiettivo)	46,98	30,24	-13	-13	-10	3	8,72	-9,27	-45,27
D 2	2	parete, retro (lato obiettivo)	46,98	30,24	-13	-13	-10	3	8,72	-9,27	-45,27
D 3	2	pavimento, retro (lato obiettivo)	71,57	11,77	0	-13	-4	3	8,06	-8,58	-25,58
D 4	2	soffitto, retro (lato obiettivo)	40,71	43,78	-13	-13	-6	3	12,14	-12,14	-44,14
E 1	2	retro (lato antenna), parete	22,99	67,01	-13	-12	-25	3	11,27	-11,50	-61,50
E 2	2	retro (lato antenna), parete	22,99	67,01	-13	-12	-25	3	11,27	-11,50	-61,50
E 3	2	retro (lato antenna), pavimento	8,62	81,38	-13	0	-30	3	6,5	-6,72	-49,72
E 4	2	retro (lato antenna), soffitto	34,87	55,12	-13	-12	-32	3	13,54	-13,09	-70,09
F 1	2	parete, parete opposta	14,99	14,99	-13	-13	-21	3	11,6	-11,75	-58,75
F 2	2	parete, parete opposta	14,99	14,99	-13	-13	-21	3	11,6	-11,75	-58,75
F 3	2	pavimento, soffitto	14,84	14,84	0	-13	-21	3	11,59	-11,74	-45,74
F 4	2	soffitto, pavimento	14,84	14,84	-13	0	-21	3	11,59	-11,74	-45,74

Tab. 2.5 – Attenuazione dei raggi a 1GHz (polarizzazione orizzontale)

Si inizia con la valutazione ottenuta a 1GHZ e si considerano le riflessioni indesiderate.

A 1	parete	-35,76
A 2	parete	-35,76
B	retro (lato obiettivo)	-21,30
D 3	pavimento, retro (lato obiettivo)	-25,58

*Tab. 2.6 – Riflessioni più critiche a 1 GHz*

I raggi più critici sono elencati in Tab. 2.6 dove si legge che quelli a maggior ampiezza sono B e D3 che si riflettono sulla parete dietro l'obiettivo. Il raggio B impatta ad un'altezza di 1 metro, mentre il raggio D3 ad un'altezza leggermente più bassa. Per ridurre la loro potenza si può aumentare l'attenuazione di quella parete collocando al suo centro delle piramidi di poliuretano impregnato.

Si anticipa che in alcuni test dove l'antenna è posizionata a 1,5 m o 2 m, il raggio B impatta rispettivamente a 1,5 m o 2 m di altezza.

Nella zona d'urto dei raggi B e D3 si posizionano quindi una superficie di piramidi di poliuretano impregnato di base 3,6 m e altezza 3 m come mostrato in figura 2.8. Le proprietà delle piramidi di poliuretano, che nelle figure appaiono di colore blu, sono descritte nel paragrafo 2.2.1 (Materiale anecoico).

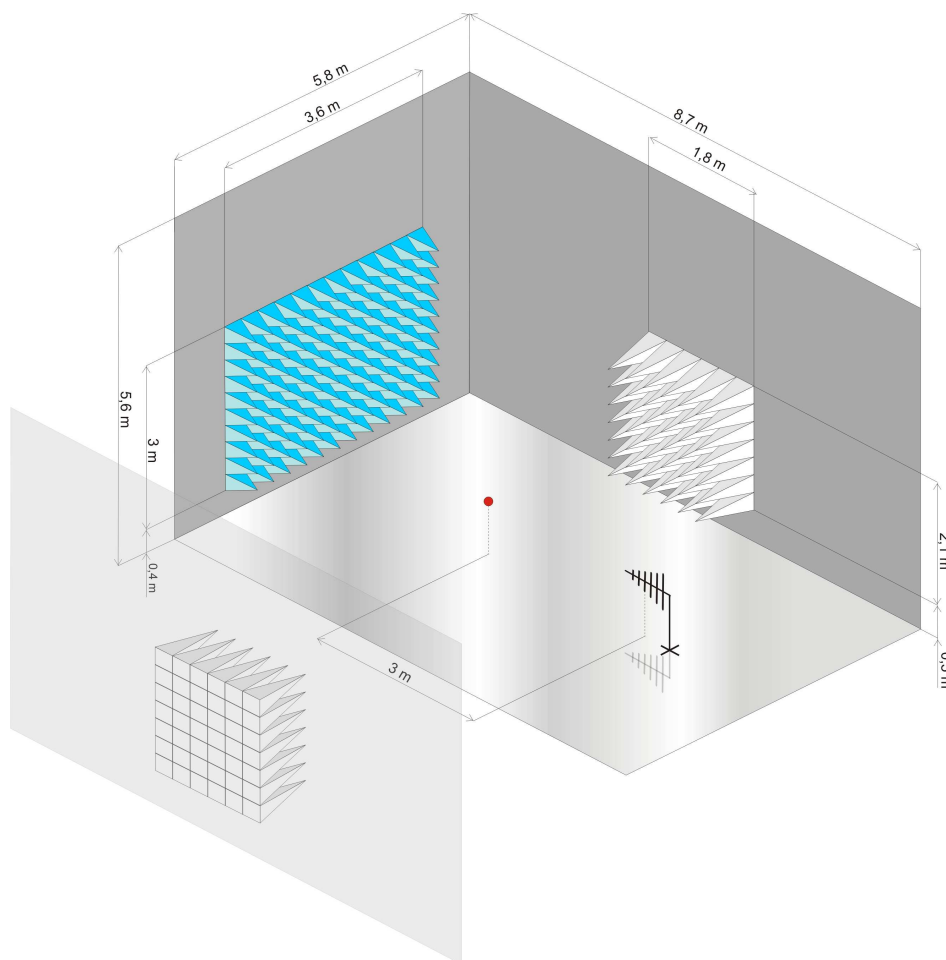


Fig. 2.11 – Sito dopo l'anechoicizzazione delle pareti

La parete retrostante l'antenna e il soffitto non contengono materiale assorbente ma sono rivestite solo di ferrite (in Fig. 2.11 non sono disegnate per rendere più chiara la rappresentazione grafica).

Si considerano ora i raggi A1 e A2. Per la simmetria della camera risultano entrambi di -35,76 dB e impatteranno alla stessa altezza della collocazione delle antenne.

Per attenuarli ulteriormente è sufficiente collocare del materiale assorbente in corrispondenza del centro di impatto delle zone di riflessione. Dal momento che nei test di taratura della camera le antenne vengono collocate fino a 2 m di altezza, si rivestiranno le pareti laterali di coni assorbenti fino a 2,3 m. Si assume inoltre che le riflessioni ad altezze superiori siano poco influenti. Questa ipotesi verrà dimostrata da una prova sperimentale successivamente descritta.

Si dispongono quindi i coni a rivestire un'area di 2,1x1,8 m a partire da 50 cm da terra così da coprire interamente la zona critica come rappresentato in Fig. 2.11.

Si precisa che i coni ora utilizzati sono coni assorbenti FrankoSorb lunghi con caratteristiche più performanti rispetto alle piramidi in poliuretano (caratteristiche descritte nel paragrafo 2.2.1 (Materiale anecoico)).

Si è visto, nel caso di 1 GHz, che le ampiezze dei raggi critici sono dell'ordine di circa -20/-30 dB.

In Tab. 2.7 si riportano solo le riflessioni più critiche a 100MHz che verranno analizzate.

A 1	parete	-36,76
A 2	parete	-36,76
B	retro (lato obiettivo)	-38,30
D 3	pavimento, retro (lato obiettivo)	-37,58
E 3	retro (lato antenna), pavimento	-37,72

*Tab. 2.7 – Riflessioni più critiche a 100 MHz*

È evidente che a questa frequenza i raggi sono molto più attenuati ma i più critici sono sempre A1, A2, B e D3. Avendoli in precedenza attenuati non sarà più necessario intervenire.

Osservando ora la traiettoria del raggio D3 si vede che assume valori più rilevanti a causa della omnidirezionalità a basse frequenze dell'antenna. In linea teorica, per attenuarlo, si dovranno collocare dei coni assorbenti nella parete retrostante l'antenna. Da test successivi si capirà però come questo raggio dà un vantaggio attenuando il segnale ricevuto in quanto una sua componente si somma in controfase. Per il momento non si posiziona nessun cono assorbente e si ricorda anche che la minore attenuazione globale dei raggi a 1 GHz è dovuta alla saturazione della ferrite.

Con questo studio si è così completata l'analisi delle rifrazioni nella camera in un range 30÷1000 MHz.

Nel range 1000÷6000 MHz la prova viene effettuata in modalità diverse in quanto si tiene conto del VSWR. Diversamente dalla stima dell'NSA il calcolo del VSWR prevede l'utilizzo di coni assorbenti sul piano metallico allo scopo di annullare il raggio (di tipo A) che viene riflesso dal pavimento. Inoltre in ricezione si usa una sonda omnidirezionale che ha lo scopo di captare ogni singola riflessione della camera.

A queste frequenze la ferrite è in completa saturazione e si comporta come un riflettore più che come un assorbitore. Risulta quindi difficile eseguire una simulazione teorica.



Dal momento che i punti critici rimangono più o meno gli stessi sarà là che si andrà a intervenire, ma difficilmente si riesce a calcolare la direzione della rifrazione dei raggi sui coni, perciò si ricorrerà all'aiuto di principi base, intuizioni e metodi sperimentali per apportare modifiche alla geometria della camera. Si vedrà questo in dettaglio nel capitolo 3.

## Capitolo 3

# TARATURA DEL SITO

Lo studio precedente (paragrafo 2.3 Modellizzazione delle riflessioni all'interno della camera) è stato eseguito per poter disporre i coni assorbenti solo nei punti critici così da rientrare nei limiti normativi. L'utilizzazione minima di coni assorbenti è una scelta dovuta a motivi economici visto il loro elevato costo. La scelta più performante, dal punto di vista dell'attenuazione delle riflessioni, sarebbe stata quella di ricoprire interamente tutte le pareti ed il soffitto della camera semianecoica (tranne il piano di massa in quanto richiesto dalla norma). In questa maniera però ci sarebbero voluti un elevato numero di coni assorbenti con un conseguente aumento dei costi.

Si procede ora al posizionamento di ulteriori coni assorbenti in altre zone critiche per la rifrazione dei raggi, laddove la sola attenuazione della ferrite non è sufficiente.

Si è visto come siano rilevanti i riflessi dovuti alle riflessioni singole laterali (raggi A che si riflettono nelle pareti laterali) e al raggio che si riflette dietro la parete dell'antenna trasmittente. Per questo motivo si decide di posizionare i coni assorbenti dietro l'antenna trasmittente e sulle pareti laterali. Sul soffitto i coni sarebbero superflui perché, essendo la stanza alta quasi 6 metri, i raggi che si riflettono sul soffitto vengono di per sé attenuati a causa dell'elevata lunghezza del tragitto (oltre all'attenuazione data dalla non appartenenza dei raggi al lobo principale dell'antenna). Si può vedere graficamente il risultato ottenuto in Fig. 2.11.

Con questa configurazione si procede a misurazioni e valutazioni sperimentali inizialmente del  $S_{VSWR}$  e successivamente dell'NSA.

## 3.1 Valutazione del VSWR

### 3.1.1 Norme di riferimento

Lo scopo della taratura è quello di assicurare l'adeguatezza della camera anecoica in considerazione dell'attenuazione nel range di frequenze 1÷6G.

La seguente procedura di taratura del sito risulta conforme alla CISPR 16-1-4:IEC 2007.

Apparecchi di misura per disturbi radio e immunità – attrezzatura ausiliaria – disturbi irradiati

*Radio disturbing and immunity measuring apparatus – Ancillary equipment – Radiated disturbances*

### 3.1.2 Strumentazione utilizzata

Descrizione	Caratteristiche	Marca/Modello
Ricevitore EMI	Conforme CISPR 16-1-1	Rohde&Schwarz / ESU8
Antenna Bilog	Conforme CISPR 16-1-4	Teseq / CBL6144
Antenna POD	Conforme CISPR 16-1-4	Seibersdorf / POD 16
Cavi	(RC=50Ω)	

*Tab. 3.1 - Strumentazione utilizzata per la stima del VSWR*

Taratura OKD eseguita per l'antenna Bilog Teseq. Mentre per l'antenna AUSTRIAN RESEARCH CENTERS POD 16 non ha ancora la taratura; tuttavia è da notare come nella misura dell'attenuazione del sito non bisogna conoscere l'AF delle antenne (né i valori dell'attenuazione dei cavi) in quanto la misura dell'attenuazione avviene per differenza tra le varie misure (vedremo questo principio nel dettaglio successivamente). Quindi la mancanza di taratura non influenzerà i valori trovati nelle prove (palese che la certificazione della camera non sarà possibile in questa condizione).

Cavi e analizzatore di spettro, essendo conformi alla CISPR 16-1-1/4, possono essere utilizzati per eseguire la taratura della camera.

Le due antenne usate per la prova (POD e Teseq) soddisfano i requisiti e i diagrammi di radiazione richiesti dalla CISPR 16-1-4.

### Modalità operative

La procedura fa riferimento a un sito che dovrebbe essere in spazio aperto, quindi ci si deve assicurare che le riflessioni della camera non influenzino la misura. La procedura di validazione è impiegata per qualificare un sito in presenza di un piano di massa metallico. Sarà quindi necessario coprire parte del pavimento metallico con del materiale assorbente per eseguire la taratura.

Si verifica la presenza delle seguenti condizioni ambientali:

- Temperatura: da 15°C a 35°C
- Umidità: da 30% a 75%
- Pressione atmosferica: da 86kPa a 106kPa (da 860 mbar a 1060 mbar)

Per la procedura di taratura non sono richiesti attenuatori da connettere direttamente alle due antenne per migliorarne l'adattamento di impedenza. Le misure vengono effettuate per tutti i valori di frequenza ed in tutte le posizioni riportate nella CISPR 16-1-4.

La convalidazione del sito è eseguita tramite la misura del *voltage standing wave ratio* del sito ( $S_{VSWR}$ ).

L' $S_{VSWR}$  è il rapporto tra il massimo segnale ricevuto e il minimo segnale ricevuto, causato dall'interferenza tra il segnale diretto (intenzionale) e quello riflesso, cioè:

$$S_{VSWR} = \frac{E_{MAX}}{E_{MIN}} = \frac{V_{MAX}}{V_{MIN}}$$

dove  $E_{MAX}$  e  $E_{MIN}$  sono rispettivamente il massimo e il minimo segnale ricevuto, e  $V_{MAX}$  e  $V_{MIN}$  sono i corrispettivi valori di tensione misurati. L' $S_{VSWR}$  è tipicamente espresso in dB e quindi si può scrivere:

$$S_{VSWR,dB} = 20 \log \left( \frac{V_{max}}{V_{min}} \right) = 20 \log \left( \frac{E_{max}}{E_{min}} \right) = V_{max,dB} - V_{min,dB} = E_{max,dB} - E_{min,dB}$$

L' $S_{VSWR}$  è relazionato all'influenza delle riflessioni indesiderate. Il criterio di approvazione per la validazione del sito, nel range di frequenze 1÷6G, è:

$$S_{VSWR} \leq 2:1, \text{ oppure } S_{VSWR} \leq 6,0dB$$

### 3.1.3 Procedura di taratura

Il cavo RF proveniente dall'antenna ricevente va collegato all'ingresso del ricevitore EMI attraverso l'apposito connettore passante in camera anecoica.

Il test per la validazione del sito deve essere eseguito per un volume di forma cilindrica di diametro 1,5 m. L' $S_{VSWR}$  è valutato, per ogni ubicazione e polarizzazione richiesta, per una sequenza di sei misure lungo l'asse passante per il punto di riferimento (antenna trasmittente) e l'antenna ricevente; come si può vedere dalla Fig. 3.1.

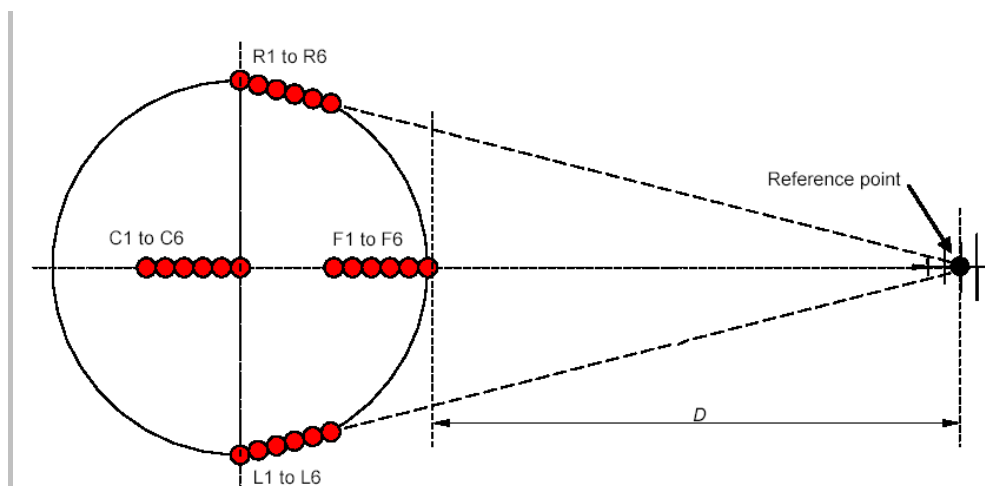


Fig. 3.1 – Misura di posizione del  $S_{VSWR}$  nel piano orizzontale

Entrambe le antenne sono posizionate a 1 metro d'altezza rispetto al piano di massa.

- a) Posizioni frontali 1-6 (F1 a F6): Per localizzare queste posizioni bisogna prima localizzare F6 nella parte anteriore dell'estensione del volume di test lungo l'asse; ed a una distanza di 3 metri dal punto di riferimento.

F5-F1 sono calcolati rispetto a F6 come segue, allontanandosi rispetto al riferimento dell'antenna ricevente:

- 1)  $F5 = F6 + 2$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 2)  $F4 = F6 + 10$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 3)  $F3 = F6 + 18$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 4)  $F2 = F6 + 30$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 5)  $F1 = F6 + 40$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente

b) Posizioni destra 1-6 (R1 a R6): Per localizzare queste posizioni bisogna prima localizzare R6 nella parte destra dell'estensione del volume di test.

R5-R1 sono calcolati rispetto a R6 come segue, allontanandosi rispetto al riferimento dell'antenna ricevente:

- 1)  $R5 = R6 + 2$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 2)  $R4 = R6 + 10$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 3)  $R3 = R6 + 18$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 4)  $R2 = R6 + 30$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 5)  $R1 = R6 + 40$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente

c) Posizioni sinistra 1-6 (L1 a L6): Per localizzare queste posizioni bisogna prima localizzare L6 nella parte sinistra dell'estensione del volume di test.

L5-L1 sono calcolati rispetto a L6 come segue, allontanandosi rispetto al riferimento dell'antenna ricevente:

- 1)  $L5 = L6 + 2$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 2)  $L4 = L6 + 10$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 3)  $L3 = L6 + 18$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 4)  $L2 = L6 + 30$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 5)  $L1 = L6 + 40$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente

d) Posizioni centrali 1-6 (L1 a L6): Per localizzare queste posizioni bisogna prima localizzare L6 nella parte centrale del volume di test.

L5-L1 sono calcolati rispetto a L6 come segue, allontanandosi rispetto al riferimento dell'antenna ricevente:

- 1)  $L5 = L6 + 2$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 2)  $L4 = L6 + 10$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 3)  $L3 = L6 + 18$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 4)  $L2 = L6 + 30$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente
- 5)  $L1 = L6 + 40$  cm allontanandosi rispetto all'antenna ricevente

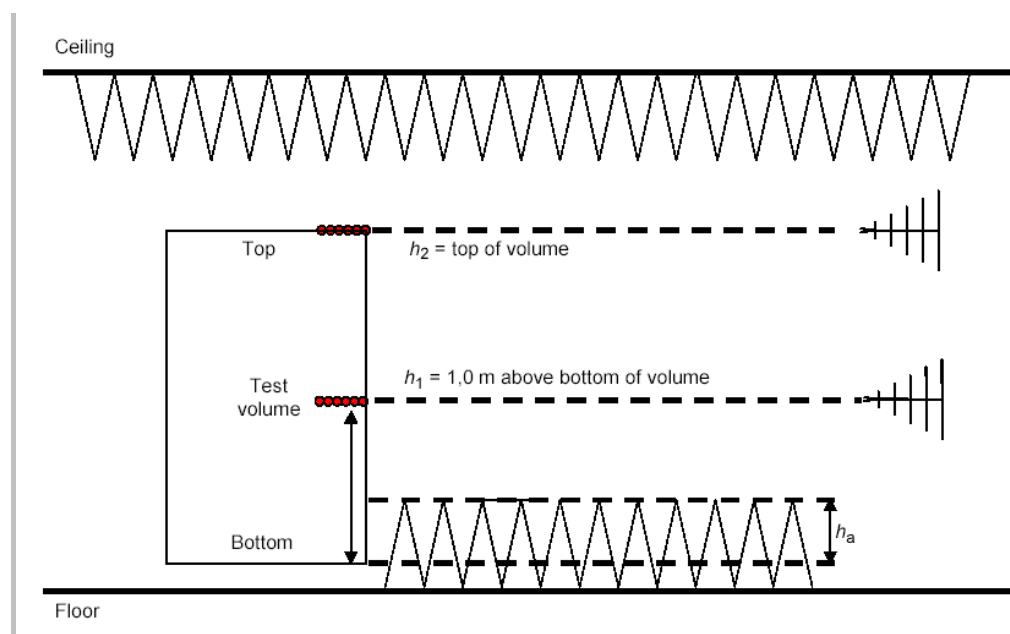


Fig. 3.2 – Schematizzazione per la misura del  $S_{VSWR}$

Si ricorda che per la misura dell'NSA il pavimento riflettente non poteva essere ostruito da coni assorbenti. Nella taratura da 1 GHz 6 GHz invece si devono collocare i coni assorbenti sul pavimento riflettente; disposti tra le due antenne. In Fig. 3.2 si ha la schematizzazione di come posizionare i coni assorbenti dove:

- $h_a$  è la porzione di volume di test che è ostruita dai coni assorbenti (30 cm al massimo)
- $h_1$  è l'altezza localizzata dal centro del volume di test al fondo del volume di test
- $h_2$  è l'altezza localizzata dalla parte superiore del volume di test; è richiesto il test nella parte superiore quando  $h_2$  è lontano almeno 0,5 m da  $h_1$

La misure effettuate in Fig. 3.1 vanno realizzate sia in polarizzazione orizzontale che in polarizzazione verticale a 1 metro di altezza. Successivamente bisogna ripetere le stesse misure posizionando entrambe le antenne all'altezza di 2 metri (che corrisponde all'altezza massima del volume di test). Si ricorda che il volume di test è lo spazio entro cui deve essere posizionato l'EUT in prova, in questo caso è un cilindro di diametro 1,5 m e altezza 2 m. Una volta allestita la strumentazione si può iniziare con le misurazioni nelle varie configurazioni sopra descritte.

Si è visto come per ogni posizione (destra, sinistra, centro e fronte) sono necessarie 6 misure su dei punti disposti su una linea di 40 cm. Per ottenere queste 6 misurazioni si ha a disposizione una base mobile che le rileverà automaticamente; basterà collocarla con il riferimento iniziale coincidente con il primo punto e avviare il software (che rileverà le misure dei sei punti). Mentre per la regolazione in altezza e polarizzazione l'antenna è dotata di tubi con connettori HV che consentono di eseguire tutte le varie configurazioni richieste per la taratura.

Tubi e connettori HV sono in materiale plastico e quindi, essendo trasparenti alle onde elettromagnetiche, non influiscono con i risultati delle misure. Da notare che l'antenna ricevente dovrà essere situata alla stessa altezza dell'antenna trasmittente per tutte le misure. Si deve inoltre verificare che il segnale ricevuto sia almeno 20 dB sopra il livello di rumore visualizzato dall'analizzatore di spettro; altrimenti è necessario usare range di frequenza parziali adeguati a mantenere il livello di rumore sotto i 20 dB. Quindi eseguire le misure in polarizzazione orizzontale e successivamente ripeterle in polarizzazione verticale.

Per tutte le misure il valore letto viene normalizzato considerando la posizione corrente rispetto al punto di riferimento; secondo la formula:

$$M'_{mnopq} = M_{mnopq} + 20 \log \left( \frac{D_{mnopq}}{D_{ref}} \right) (dB)$$

dove  $D_{mnopq}$  è l'attuale distanza dal primo posizionamento dell'antenna ricevente,  $D_{ref}$  è la distanza dal punto di riferimento, e  $M_{mnopq}$  è il segnale misurato in decibels. Le correzioni di misura viste sopra (che tengono conto della distanza del riferimento dell'antenna ricevente) vengono effettuate dal software in utilizzo. In questa maniera si ottengono tutte le misure richieste dalla procedura di taratura, e se  $S_{VSWR,dB}$  è minore (o uguale) di 6,0 dB per ogni misura, allora il criterio di approvazione per la validazione del sito è soddisfatto.

Per l'esecuzione della procedura di taratura è utilizzato il software CalStan 10.0 (dei laboratori Seibersdorf) il quale restituisce direttamente i valori di attenuazione delle varie configurazioni, che si possono trasferire in un file Excel. Ora, viste le nozioni base, si procede con le prove sperimentali che verranno descritte nel paragrafo successivo.



### 3.1.4 Prove sperimentali e tematiche

Per la validazione del sito si vuole misurare il  $S_{VSWR}$ ; per questa valutazione si segue la procedura di test alternativa usando una sonda isotropica (secondo la CISPR 16-1-4 e come descritto nel paragrafo precedente). Precisamente per gli impianti schermati (es. camera anecoica o camera semianecoica) è permesso valutare l' $S_{VSWR}$  usando una sonda isotropica posizionata nell'area cilindrica in ricezione e illuminando il volume di test con la stessa antenna che sarà usata successivamente come antenna ricevente nelle misure dei test di emissione.

Nel caso qui analizzato la sonda isotropica è costituita dall'antenna POD, mentre l'antenna in trasmissione utilizzata è la Bilog Teseq (Schaffner). Si è utilizzata l'antenna Teseq in quanto la misura del VSWR è avvenuta prima dell'arrivo in laboratorio dell'antenna SUNOL SCIENCES precedentemente descritta. L'antenna Teseq ha il range di funzionamento limitato a 3 GHz, pertanto l'analisi del VSWR sarà limitata a tale frequenza.

É da notare come nella misura del  $S_{VSWR}$  non bisogna introdurre nel programma di elaborazione né l'AF delle antenne né i valori dell'attenuazione dei cavi in quanto la misura del VSWR avviene per differenza tra le varie misure effettuate. In pratica si prendono il valore max e minimo delle misure (alla stessa frequenza) e si fa la differenza per tutto il range di frequenze. Questa differenza dovrà essere inferiore a 6 dB per essere entro specifica.

La norma prevede (come spiegato nel precedente paragrafo) l'utilizzo di coni assorbenti posizionati sopra il piano riflettente in quanto lo scopo di questa taratura è di ottenere un livello di riflessioni tali da rimanere entro specifica. Prima di procedere al posizionamento dei coni assorbenti sul pavimento si decide di effettuare una prova per rilevare il VSWR del sito. Come previsto dalla norma il test è effettuato posizionando la sonda isotropica (antenna POD omnidirezionale) nella posizione centrale, frontale, destra e sinistra dell'area di test.

Con delle rapide prove risulta che la condizione più gravosa si ha quando l'antenna POD è in posizione frontale. Si inizia quindi a studiare per prima questa configurazione.

Sempre in assenza di coni sul pavimento si esegue la prova frontale in polarizzazione orizzontale (FH-Front Horizontal) e successivamente in polarizzazione verticale (FV-Front Vertical). Il risultato è illustrato in Fig. 3.3.

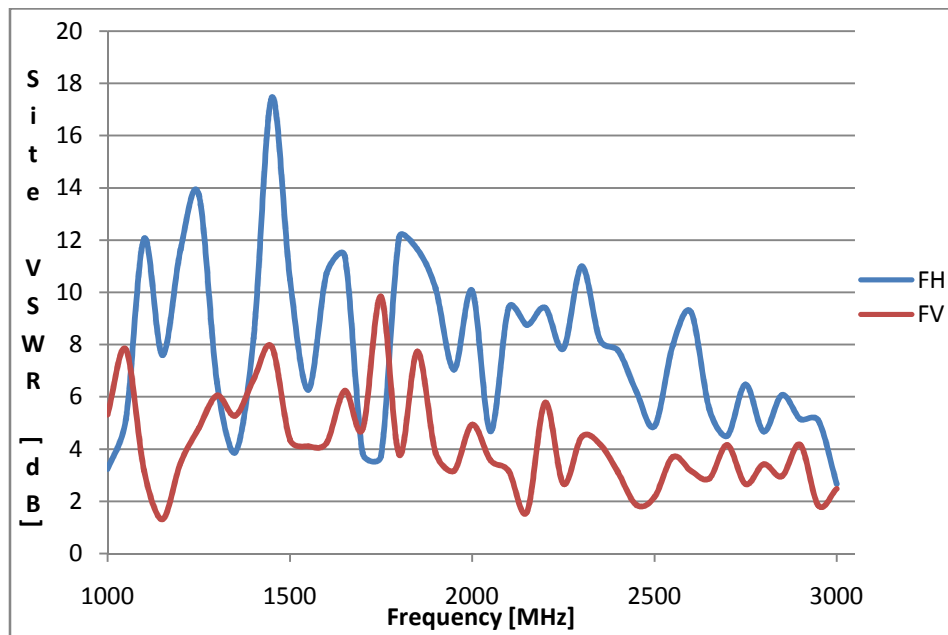


Fig. 3.3 – Misura del  $S_{VSWR}$  in assenza di coni assorbenti sul pavimento riflettente

Com'era prevedibile la configurazione in polarizzazione orizzontale è quella più gravosa in quanto risente di più delle riflessioni provenienti dal piano di massa. Per questa motivazione si è deciso di fare uno studio sperimentale più approfondito su questa configurazione.

Ora eseguiamo il test posizionando 30 coni assorbenti corti come mostrato in Fig. 3.2. I coni sono stati messi sul piano riflettente per attenuare il raggio (di tipo A) che dall'antenna trasmittente viene riflesso dal piano di massa all'antenna ricevente. I coni sono posizionati in maniera tale da garantire la simmetria della camera: disposti in 5 file da 6 coni (messi perpendicolarmente rispetto all'asse che congiunge le due antenne). Sono stati adoperati i coni assorbenti FrankoSorb corti (e non quelli lunghi) in quanto i coni non devono superare l'altezza di 30 cm rispetto alla base inferiore del volume di test dell'EUT (per non attenuare il raggio diretto tra le due antenne).

La figura 3.4 mostra l'andamento del VSWR del sito con 30 coni posizionati sopra il piano di massa in polarizzazione orizzontale. La norma CISPR 16-1-4 prevede che il  $S_{VSWR}$  sia inferiore (o uguale) a 6 dB. Per semplicità visiva in Fig. 3.4 è stato evidenziato il limite di 6 dB, e si nota chiaramente che dei 4 picchi fuori specifica, uno supera di 2 dB il limite.

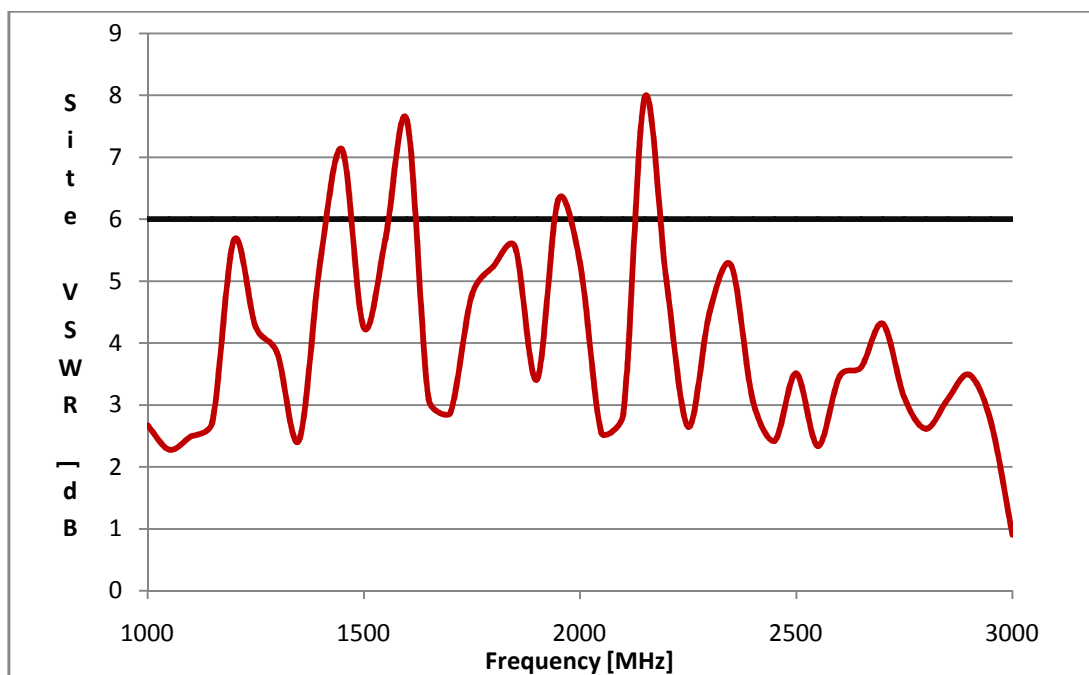


Fig.3.4 - Misura del  $S_{VSWR}$  in polarizzazione orizzontale con 30 coni assorbenti

Si mantiene questa configurazione di coni aggiungendone però altri 18 per un totale di 48 (disposti in 6 file da 8 coni).

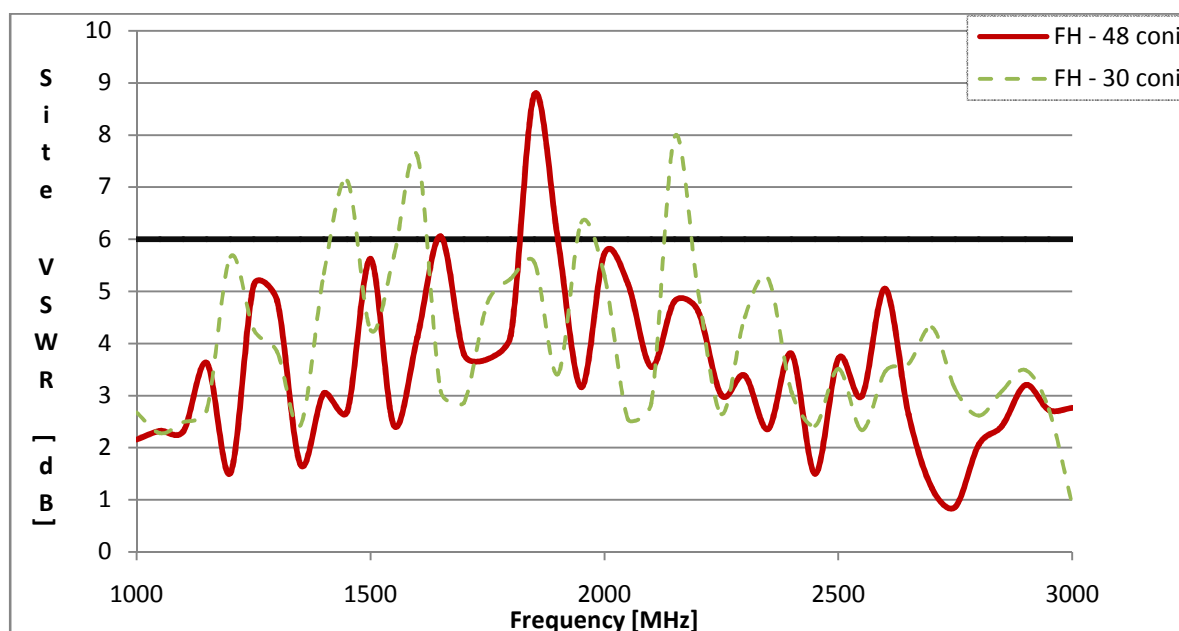


Fig. 3.5 – Misura del  $S_{VSWR}$  in polarizzazione orizzontale con 48 coni assorbenti

La figura 3.5 mostra l'andamento del VSWR del sito con 48 coni posizionati sopra il piano di massa in polarizzazione orizzontale. Nel grafico viene tratteggiato anche il risultato precedentemente trovato con 30 coni. Come si può percepire dal grafico con l'aggiunta dei coni si ha un netto miglioramento dal momento che l' $S_{VSWR}$  supera il limite solo in un punto, ma un peggioramento del picco massimo che passa da 8 dB a quasi 9 dB. Il miglioramento globale è attribuibile al fatto che aumentando il numero di coni si ha un'attenuazione complessiva maggiore delle rifrazioni dal pavimento metallico. Il peggioramento del picco massimo è invece imputabile al fatto che, con l'attenuazione dei raggi, si attenuano anche le riflessioni che si sommano in controfase (che quindi annullano parzialmente l'incremento del  $S_{VSWR}$  avendo polarizzazione opposta agli altri raggi raccolti dall'antenna ). Risulta quindi che alla frequenza di 1850 MHz la compensazione delle onde elettromagnetiche viene ridotta in maniera evidente.

Per cercare di migliorare ulteriormente l'attenuazione si prova a mettere uno strato di ferriti al di sotto dei coni assorbenti. Le ferriti in utilizzo hanno un limite di funzionamento a 1 GHz e sopra questa soglia danno comunque un contributo di attenuazione anche se minore.

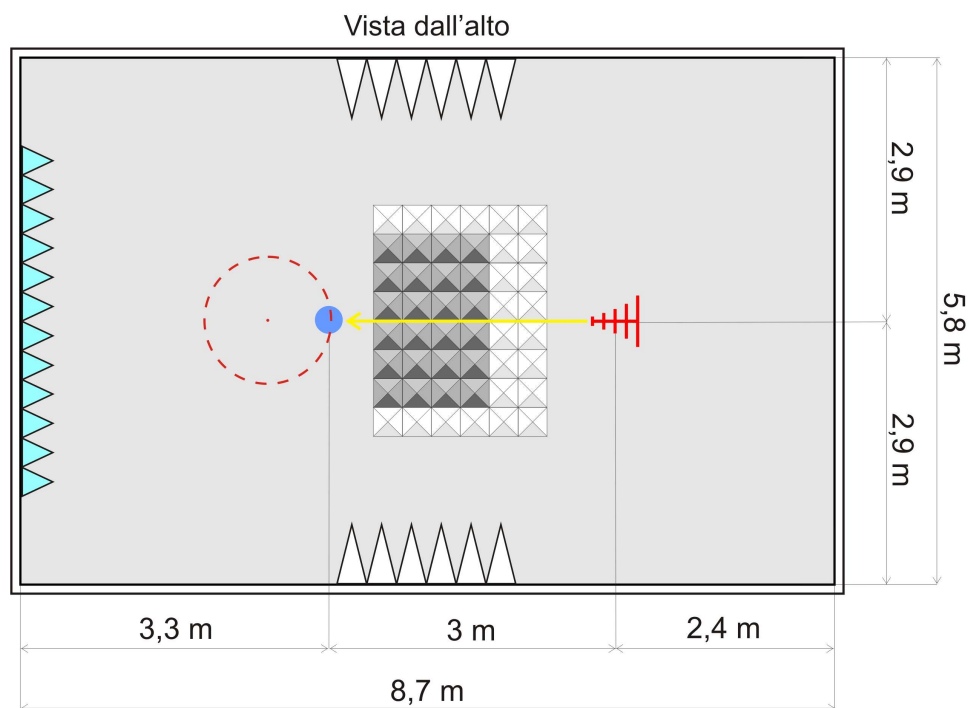


Fig.3.6 – Disposizione delle ferriti (120 x 180 cm) per effettuare la misura del  $S_{VSWR}$

Vengono quindi posizionate le ferriti sopra il pavimento metallico ricoprendo un'area di 120 x 180 cm come mostrato in Fig. 3.6. In figura sono stati colorati di grigio scuro i coni che al di sotto hanno lo strato di ferrite (rappresentazione grafica che sarà usata anche per le successive figure). Si procede con la misura del  $S_{VSWR}$  e si analizzano i risultati:

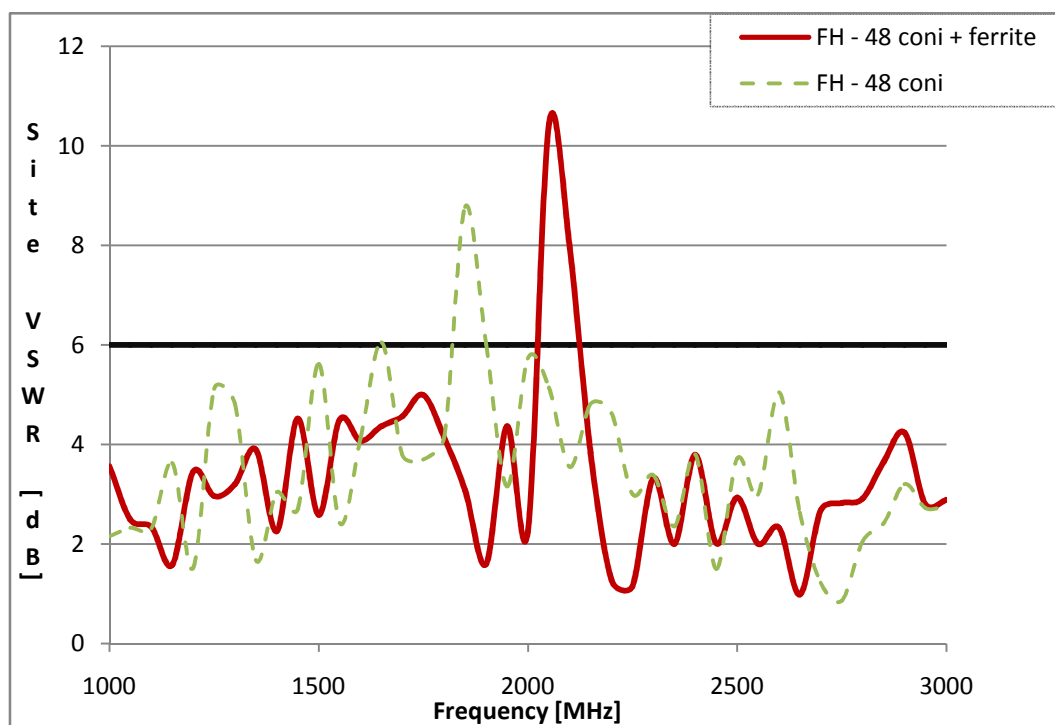


Fig. 3.7 – Misura del  $S_{VSWR}$  in polarizzazione orizzontale con 48 coni e ferrite (120cm x 180cm)

La Fig. 3.7 evidenzia un globale miglioramento per tutto il range di frequenza ad eccezione di un picco a 2050 MHz. Si nota che a 2050 MHz senza la ferrite si hanno solo 5 dB contro i 10,5 dB aggiungendole; questo è dovuto al fatto che senza ferriti (a 2050 MHz) si hanno riflessioni che garantiscono maggiore uniformità (perché le riflessioni si sommano in controfase con il segnale diretto diminuendolo). Annullando queste riflessioni favorevoli si ha un netto peggioramento del  $S_{VSWR}$ .

Si esegue anche una prova con 30 coni assorbenti con ferrite. Il grafico è tracciato in Fig.3.8.

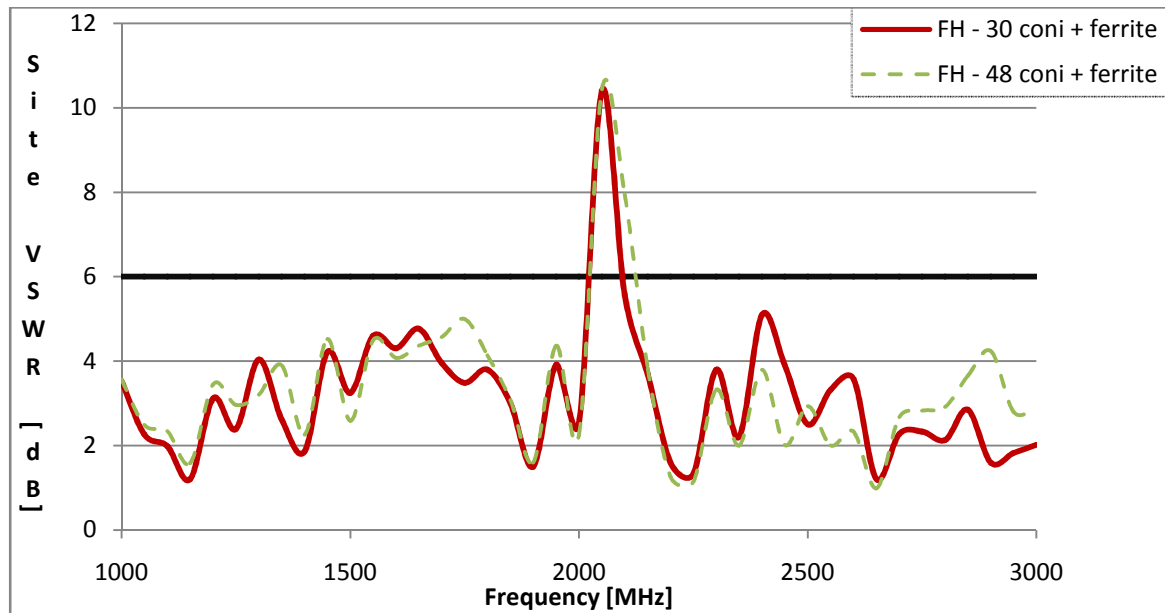


Fig. 3.8 – Misura del  $S_{VSWR}$  in polarizzazione orizzontale con 30 coni e ferrite

In Fig. 3.8 si nota come sostanzialmente non ci sia cambiamento variando il numero di coni in presenza di ferrite.

Da queste prove sperimentali si evince che l'eccesso di ferrite non porta ad una adeguata uniformità delle rifrazioni nella camera. Si decide quindi di ridurre l'area della superficie di ferriti sul piano metallico. La ferrite verrà mantenuta esclusivamente nei punti del piano riflettente in cui si ha la riflessione massima alla frequenza di 2050 MHz.

Si vuole quindi calcolare dove il raggio a 2050 MHz viene riflesso dal piano riflettente. Si sa che ad alte frequenze lavora la parte iniziale dell'antenna (la punta), mentre alle basse frequenze ad agire è la parte posteriore. Di conseguenza a 2050 MHz il raggio partirà vicino l'estremità dell'antenna. Dalla Fig. 3.9 si vede dove è posizionato il punto di massima riflessione a 2050 MHz; vale a dire quel punto del piano metallico in cui si ha la riflessione principale del raggio irradiato dell'antenna e ricevuto dal POD.

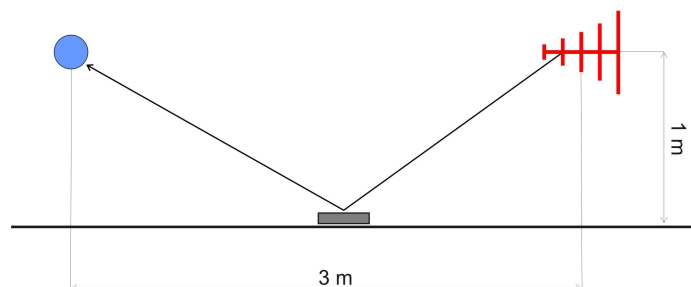


Fig 3.9 – Rappresentazione del punto di massima riflessione a 2050 MHz.

Le ferriti verranno lasciate nel punto di massima riflessione mentre verranno tolte nella zona circostante in quanto, come già verificato, troppe ferriti possono peggiorare il  $S_{VSWR}$ . Sul piano riflettente si dispone la ferrite solo su un rettangolo di 60x120 cm centrato rispetto al punto di maggiore riflessione a 2050 MHz (frequenza critica). Con questa disposizione (si veda Fig. 3.10) si misura l' $S_{VSWR}$  ottenendo il grafico di Fig.3.11.

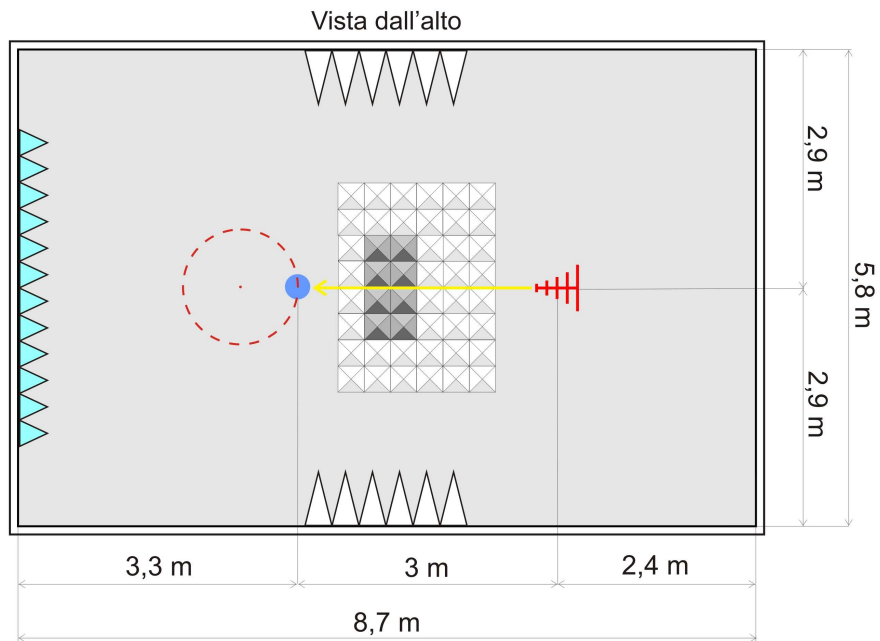


Fig.3.10 – Disposizione delle ferriti (60 x 120 cm) per effettuare la misura del  $S_{VSWR}$

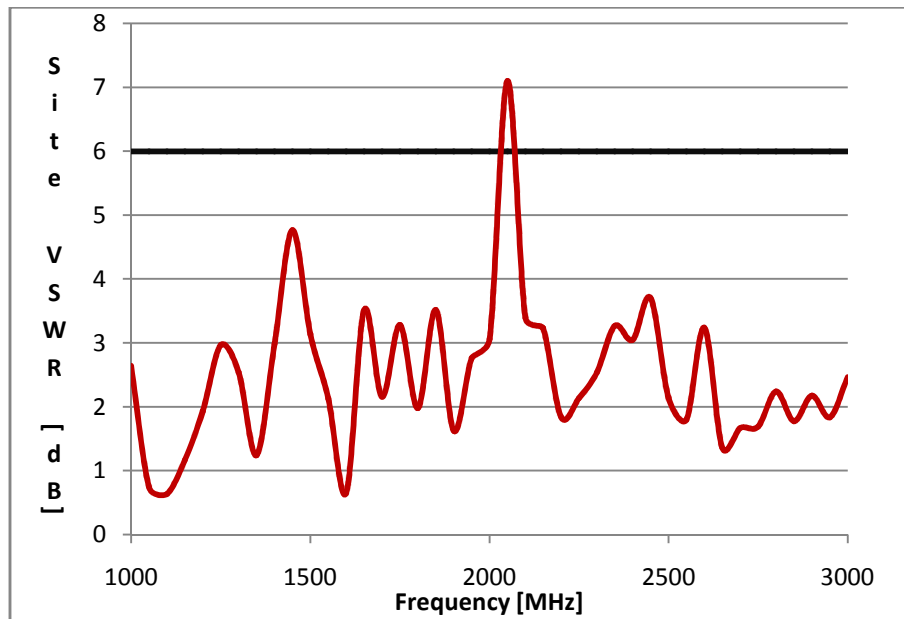


Fig. 3.11 – Misura del  $S_{VSWR}$  in polarizzazione orizzontale con 48 coni e ferrite (60cm x 120cm)

In Fig. 3.11 si nota un concreto miglioramento in quanto il picco massimo passa da 10,5 dB a circa 7 dB. Si analizza nel dettaglio questo picco. In particolare si considerano separatamente le singole sei misurazioni che elaborate restituiscono il grafico di Fig. 3.11.

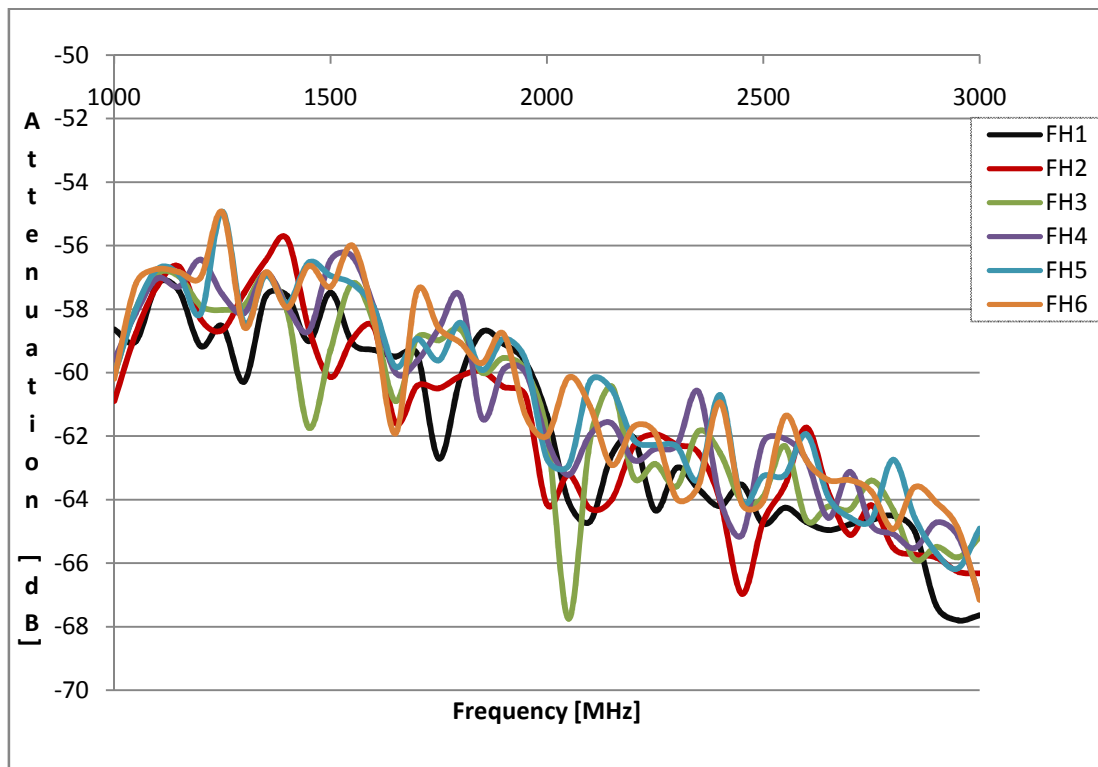


Fig. 3.12 – Attenuazione delle sei posizioni in polarizzazione orizzontale e posizione frontale



In Fig. 3.12 vengono visualizzate le attenuazioni delle 6 posizioni (a 0, 2, 10, 18, 30 e 40 cm dall'antenna ricevente). Il modulo della differenza tra il valore massimo e minimo di queste attenuazioni ci fa ottenere il  $S_{VSWR}$  mostrato in figura 3.11.

Il picco a 2050 MHz è influenzato dalla prova 3 (POD a 10 cm dal primo punto di test) e dalla prova 6 (POD a 40 cm dal primo punto di test). L'obiettivo della taratura è raggiungere uniformità nelle sei misure. Le riflessioni della camera possono peggiorare o migliorare il  $S_{VSWR}$ . In Fig. 3.13 è riprodotto un ingrandimento dell'attenuazione alla frequenza critica:

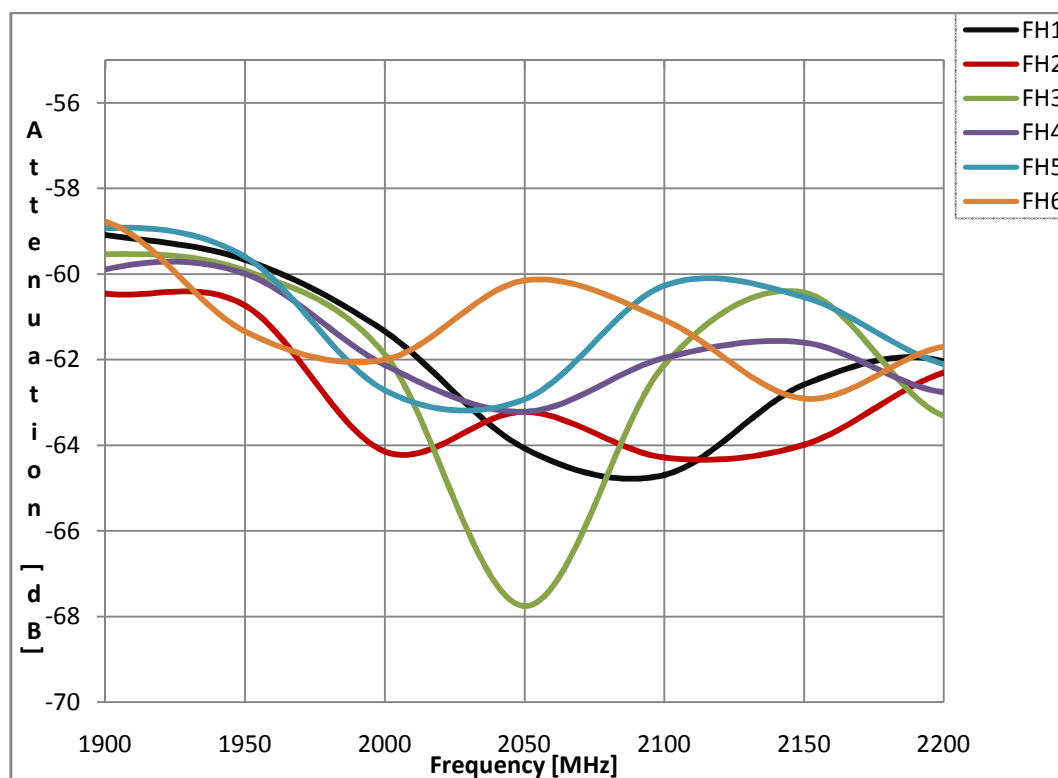


Fig. 3.13 – Ingrandimento dell'attenuazione delle sei posizioni alla frequenza critica

L'attenuazione maggiore si ha a -67,757 dB (data da FH3) mentre l'attenuazione minore si ha a -60,152 dB (data da FH6). Dopo questa analisi si continua con le prove sperimentali.

Per avere un miglioramento del  $S_{VSWR}$  si deve cercare di attenuare onde in fase o sommare onde in contro fase al segnale con più potenza (-60,152 dB), oppure sommare onde in fase, o attenuare onde in contro fase, al segnale con minor potenza (-67,757 dB).

Si decide di mantenere la stessa superficie di ferrite aumentando da 48 a 50 (5 file da 10 coni).

Misurato il  $S_{VSWR}$  con questa disposizione si ottiene il grafico in Fig. 3.14 dove si nota un notevole miglioramento che ci permette di entrare a specifica stando sotto ai 6 dB.

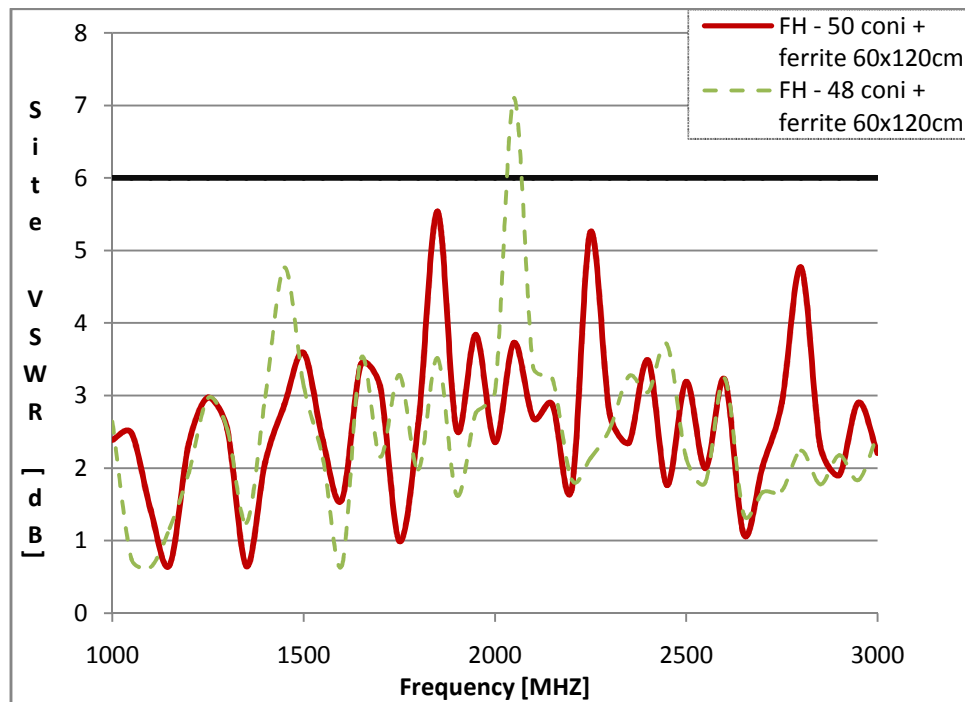


Fig. 3.14 – Misura del  $S_{VSWR}$  in polarizzazione orizzontale con 50 coni e con 48 coni

Mantenendo questa configurazione si procede al calcolo del  $S_{VSWR}$  con le antenne in polarizzazione verticale. Si esegue poi una prova spostando il POD nella posizione centrale (non più frontale) in polarizzazione orizzontale e se ne analizza il risultato (Fig. 3.15).

Il  $S_{VSWR}$  in posizione frontale e in polarizzazione verticale è entro i 6 dB. Questo risultato era prevedibile in quanto la polarizzazione orizzontale è più gravosa risentendo maggiormente del piano di massa.

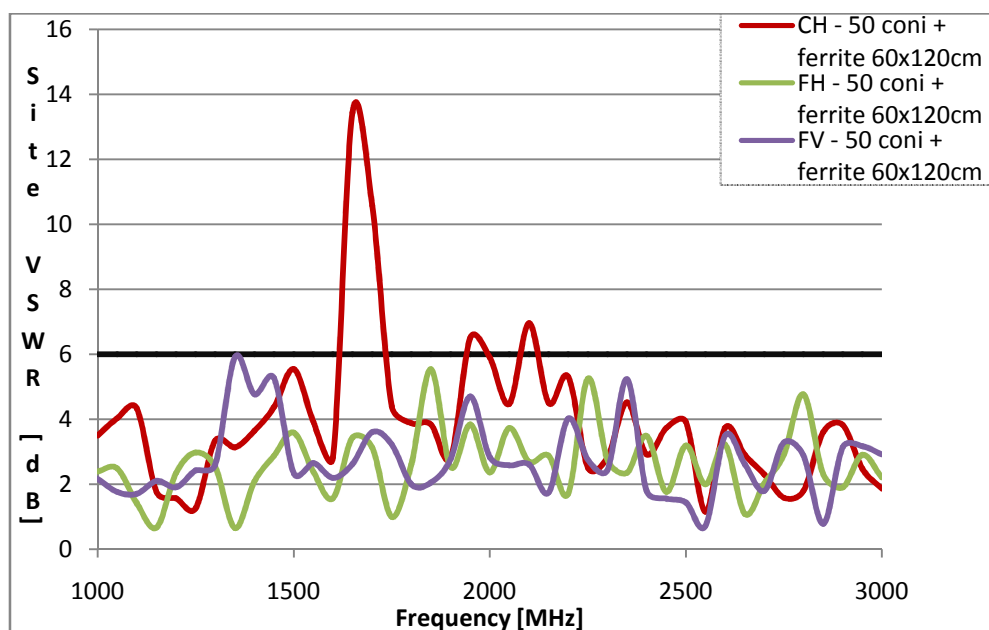


Fig. 3.15 – Misura del  $S_{VSWR}$  in posizione centrale e frontale con 50 coni e ferrite (60cm x 120cm)

Da notare invece un notevole peggioramento nel momento in cui si sposta l'antenna POD dalla posizione frontale alla posizione centrale. Questo perché spostando la POD (anche di pochi centimetri) si ottiene una notevole variazione di intensità delle riflessioni raccolte. La POD è quasi puntiforme e raccoglie le onde elettromagnetiche in una zona ristrettissima cosicché ogni suo minimo spostamento influisce sensibilmente sulla potenza del segnale ricevuto. Nel caso analizzato si è ottenuto un peggioramento di 8 dB. Lo spostamento di 75 cm del POD (rispetto alla posizione precedente) ha infatti determinato una traslazione verso sinistra del punto di massima riflessione perciò il raggio si rifrange sul piano di massa e non sulla ferrite.

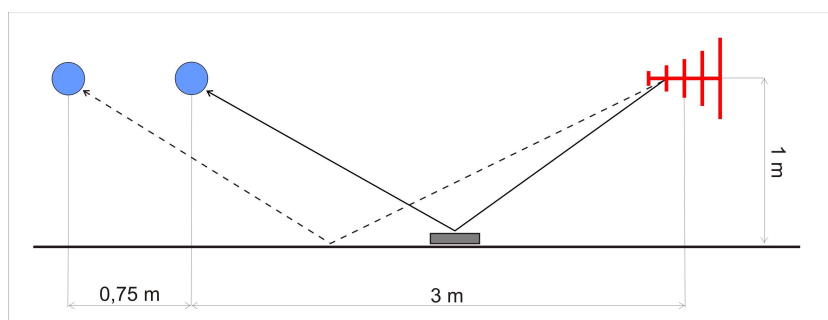


Fig. 3.16 – Spostamento del POD e variazione del punto di massima riflessione

Questa ferrite oltre a non attenuare la frequenza critica causa un'attenuazione delle onde riflesse che vanno a sommarsi in controfase; avendo diminuito queste onde riflesse si ha minore uniformità con un conseguente incremento del  $S_{VSWR}$ . Avendo modificato la posizione dell'antenna POD si ha una variazione della geometria e la frequenza critica passa da 2050 a 1650 MHz.

Questa sostanziale variazione è causata anche dalle elevate dimensioni dell'antenna Bilog Teseq, la quale ha una grave variazione del punto di funzionamento a seconda che si trovi a lavorare in bassa frequenza (parte dell'antenna vicina al connettore) o in alta frequenza (punta dell'antenna); questo implica una variazione di oltre un metro del punto di funzionamento causando quindi una disomogeneità del campo creato.

Questo viene risolto mettendo una piccola superficie di ferrite nel punto di riflesso massimo alla frequenza critica. Però la norma prevede di spostare la sonda POD in ricezione e questo comporta una variazione della geometria; laddove la ferrite prima aiutava, la nuova disposizione porterà ad un sostanziale svantaggio. Discapito peggiorato anche dalle elevate dimensioni dell'antenna Teseq trasmittente che non permette di avere grande uniformità.

Per questa motivazione si è deciso di acquistare la nuova antenna SUNOL SCIENCES che ha dimensioni molto più compatte; inoltre ha un range di funzionamento fino ai 6 GHz, permettendo in questo modo di coprire l'intero intervallo di frequenze previste dalla normativa.

Le misure eseguite in questo paragrafo sono state effettuate nel periodo precedente l'arrivo dell'antenna SUNOL SCIENCES e avevano lo scopo di capire i concetti base in quanto alle pareti laterali mancavano diversi coni che avrebbero sicuramente aiutato ad avere uniformità.

All'arrivo dell'antenna SUNOL SCIENCES e di ulteriori coni assorbenti si è preferito iniziare con lo studio dell'NSA in quanto la mancanza di accreditamento fino a 1 GHz comportava gravi costi per l'azienda (la norma da 1 GHz a 6 GHz entrerà in vigore solo da ottobre 2011).

### 3.2 Valutazione del NSA

Lo scopo della taratura è quello di assicurare l'adeguatezza della camera anecoica in considerazione dell'attenuazione nel range di frequenze 30M÷1GHz.

Una camera anecoica è caratterizzata da un parametro fondamentale che rappresenta un indice dell'equivalenza del sito reale rispetto ad uno ideale (*Open Area Test Site*). Tale parametro è l'attenuazione normalizzata del sito (NSA). Nella banda da 30MHz ad 1GHz, le prestazioni di una camera anecoica si misurano per mezzo dei valori dell'NSA. Per definire l'NSA è necessario definire, innanzitutto, il parametro

$$SA = \frac{V_I}{V_R}$$

detto attenuazione del sito.

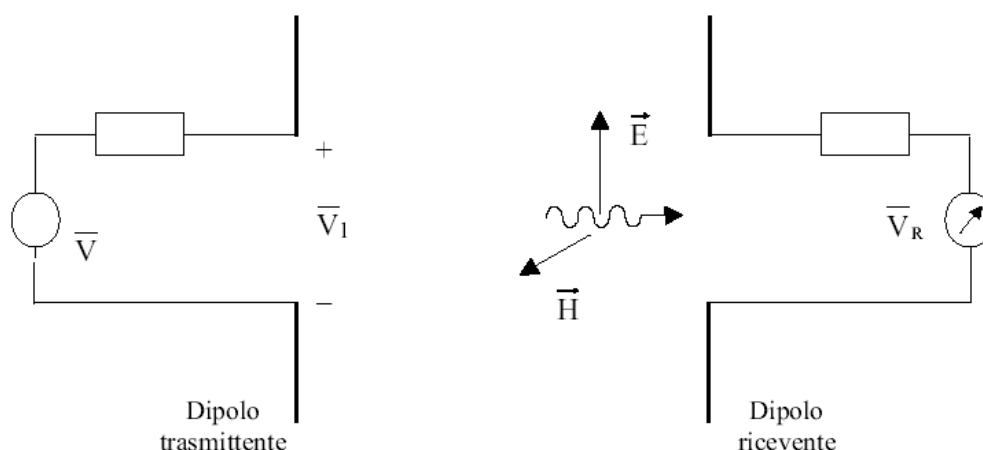


Fig.3.17 – Definizione dell'attenuazione del sito

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

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

modo da ottenere il massimo segnale ai morsetti dell'antenna) del dipolo ricevente, la tensione  $V_R$  può essere espressa, in funzione del campo elettrico incidente sul dipolo:

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

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

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

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

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

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

$$SA = \frac{279.1 * AF_R * AF_T}{f * E_{Dmax}}$$

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

**Configurazione per la misura dell'attenuazione del sito**

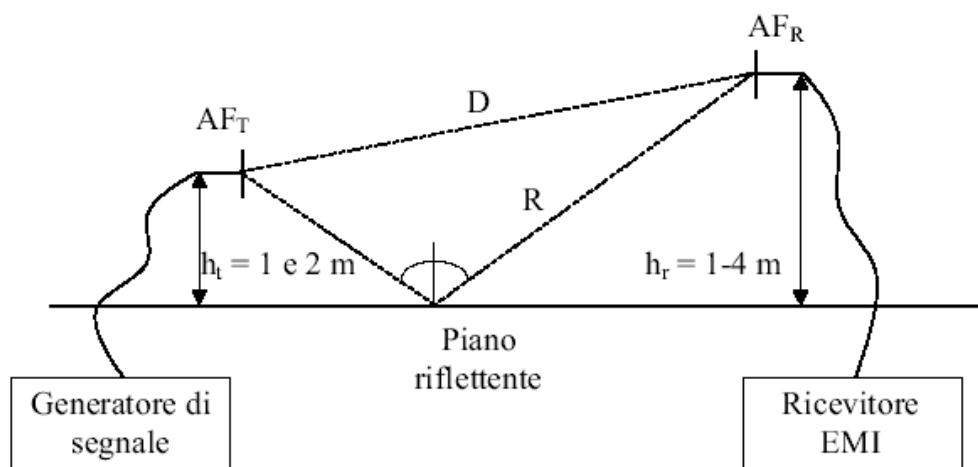


Fig.3.18 – Configurazione per la misura dell'attenuazione del sito

La relazione dell'SA espressa in decibel diventa:

$$SA = 48,92 + AF_R + AF_T - 20 \log(f) - E_{Dmax}$$

con  $AF_R$  e  $AF_T$  espresse in dB,  $f$  espressa in MHz e  $E_{Dmax}$  in dB $\mu$ V/m. Conoscendo i valori  $AF_R$  e  $AF_T$  è possibile svincolarsi dalla tipologia dell'antenna, per cui non è necessario utilizzare dipoli accordati. Si definisce, poi, attenuazione normalizzata del sito la grandezza:

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

mediante la quale è possibile svincolarsi completamente dal tipo d'antenna utilizzata. Si utilizza comunemente anche l'espressione dell'NSA in decibel:

$$NSA = 48,92 - 20 \log(f) - E_{Dmax}$$

con  $f$  espressa in MHz ed  $E_{Dmax}$  in dB $\mu$ V/m.

### Configurazione per la misura dell'NSA: polarizzazione orizzontale

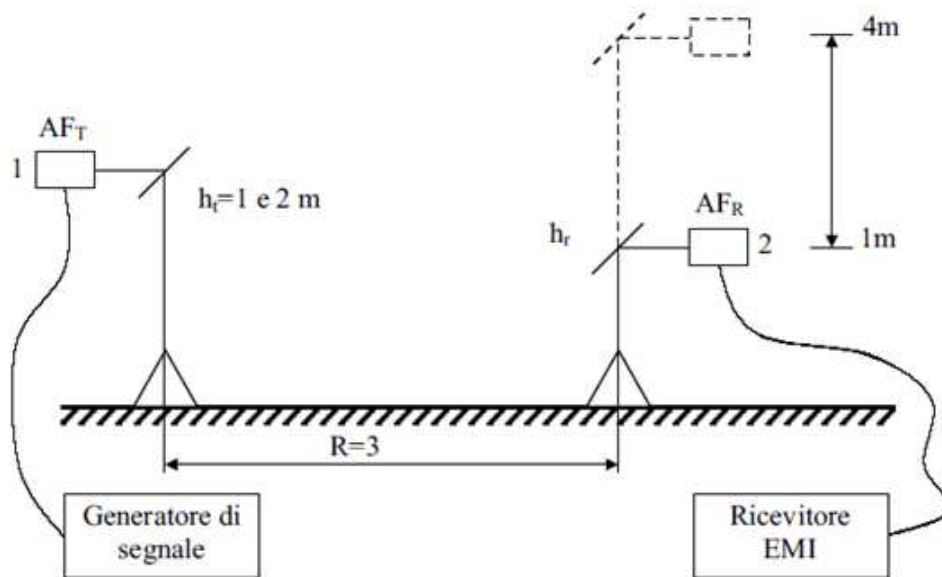


Fig. 3.19 – Configurazione per la misura dell'NSA

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

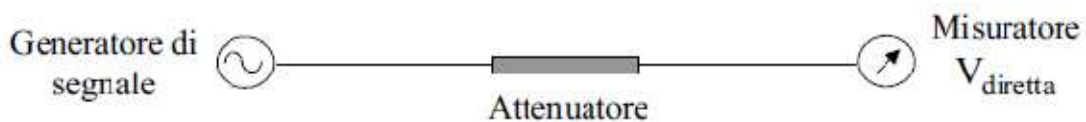


Fig. 3.20 – Misura della tensione diretta

Il valore dell' NSA può essere calcolato come:

$$NSA = V_{\text{diretta}} - V_{\text{sito}} - AF_T - AF_R - \Delta AF_{\text{tot}}$$



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

### 3.2.1 Norme di riferimento

Lo scopo della taratura è quello di assicurare l'adeguatezza della camera anecoica in considerazione dell'attenuazione nel range di frequenze 30M÷1GHz. La seguente procedura di taratura del sito risulta conforme alla CISPR 16-1-4:IEC 2007.

Apparecchi di misura per disturbi radio e immunità – attrezzatura ausiliaria – disturbi irradiati /*Radio disturbante and immunity measuring apparatus – Ancillary equipment – Radiated disturbances*

### 3.2.2 Strumentazione utilizzata

Descrizione	Caratteristiche	Marca/Modello
Ricevitore EMI	Conforme CISPR 16-1-1	Rohde&Schwarz / ESU8
Antenna Bilog	Conforme CISPR 16-1-5	Sunol / JB6
Antenna Bilog	Conforme CISPR 16-1-5	Schaffner / CBL6144
Cavi	(RC=50Ω)	

Tab. 3.2 – Strumentazione utilizzata per la stima dell'NSA

Taratura OKD eseguita per le due antenne Bilog: SCHAFFNER CBL6144 in trasmissione e SUNOL SCIENCES JB6 in ricezione (taratura eseguita presso il laboratorio metrologico Seibersdorf Labor GmbH). Antenne, cavi e analizzatore di spettro, essendo conformi alla CISPR 16-1-1/5, possono essere utilizzati per eseguire la taratura della camera.

### 3.2.3 Procedura di taratura

La procedura fa riferimento a un sito che dovrebbe essere in spazio aperto, quindi ci si deve assicurare che le riflessioni della camera non influenzino la misura. La procedura di validazione e i requisiti per l'attenuazione normalizzata del sito (NSA – *normalized site attenuation*) sono impiegati per qualificare un sito in presenza di un piano di massa metallico.

Si verifica la presenza delle seguenti condizioni ambientali:

- Temperatura: da 15°C a 35°C
- Umidità: da 30% a 75%
- Pressione atmosferica: da 86kPa a 106kPa (da 860 mbar a 1060 mbar)

e si registrano i valori rilevati, in modo che vengano riportati nel report di taratura.

Per la procedura di taratura non sono richiesti attenuatori. Le misure vengono effettuate per tutti i valori di frequenza ed in tutte le posizioni riportate nella CISPR 16-1-4 (nel range di frequenze 30M÷1GHz).

#### **Predisposizione dell'apparecchiatura**

Disponendo di una camera anecoica con un pavimento conduttivo si esegue un “test volume”. Il “test volume” è definito come il volume più ampio tracciato dal dispositivo o sistema testato mentre ruota su una piattaforma girevole (nel caso in esame con un diametro di 2 m). Si esegue quindi una valutazione in polarizzazione orizzontale e verticale come mostrato in Figg.3.21 e 3.22.

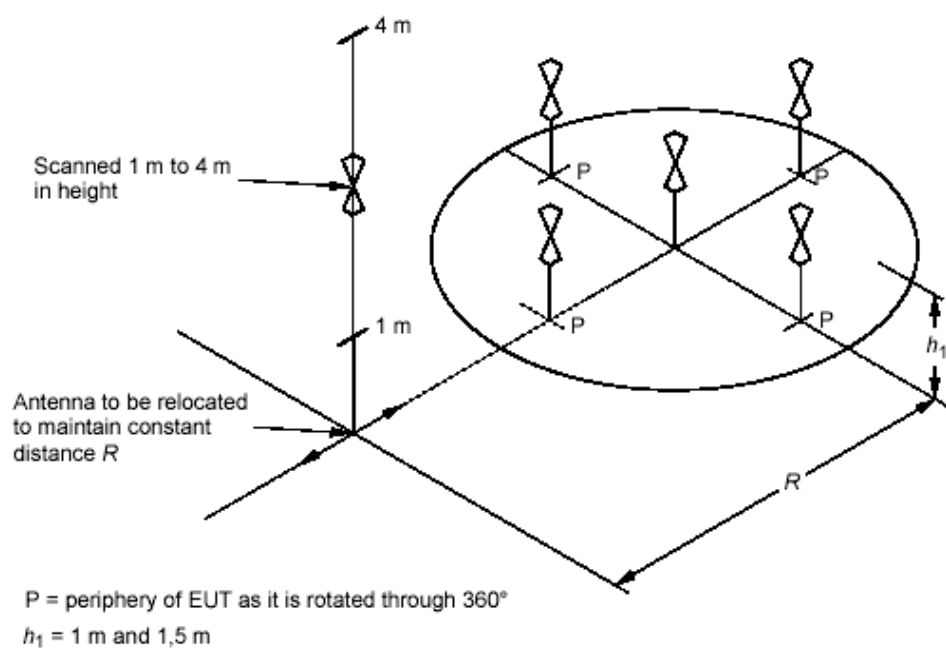


Fig. 3.21 – Polarizzazione verticale per la misura dell'NSA

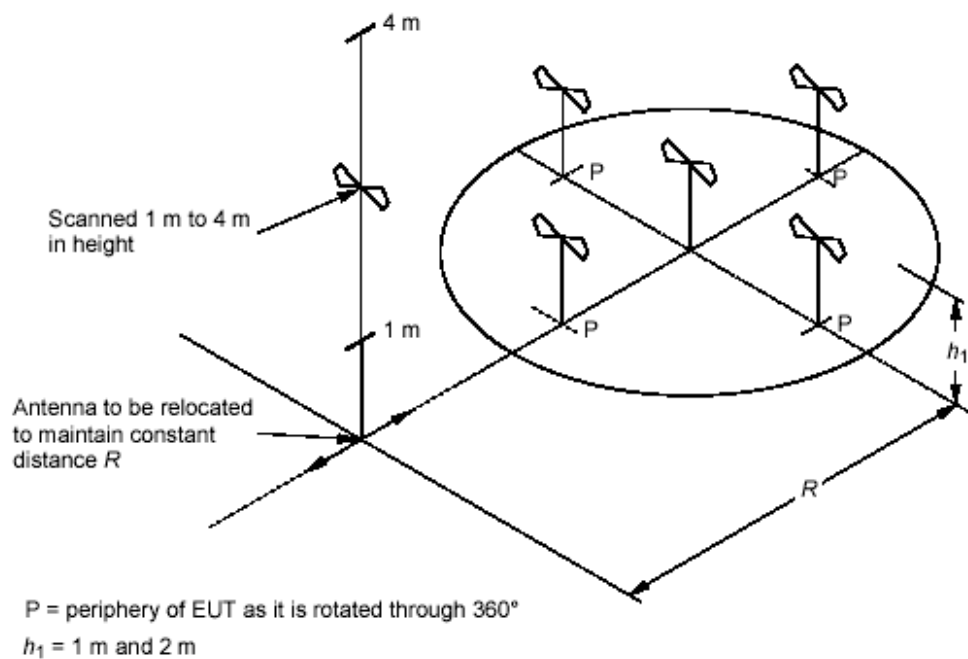


Fig. 3.22 – Polarizzazione orizzontale per la misura dell'NSA

Sono richieste 20 distinte misure dell'attenuazione del sito: cinque posizioni nel piano orizzontale (centro,destra,sinistra,fronte e retro, rispetto all'asse passante per il centro della piattaforma girevole e l'antenna), per due polarizzazioni (orizzontale e verticale), e per due altezze (1 m e 2 m orizzontalmente, 1 m e 1.5 m verticalmente). Si deve tenere in considerazione il fatto che la più bassa estremità del dipolo ricevente deve essere tenuto ad una distanza non inferiore a 25 cm dal pavimento metallico.

Le misure sono effettuate secondo le varie configurazioni ma mantenendo costante la distanza R (3m) tra i centri delle due antenne. Il sito è considerato idoneo se le misure orizzontali e verticali dell'NSA sono comprese tra  $\pm 4$  dB rispetto ai valori teorici dell'NSA per un sito ideale.

### **3.2.4 Prove sperimentali e tematiche**

Per l'NSA ci si sofferma con particolare attenzione alla posizione centrale. Per esperienza precedentemente acquisita da prove sperimentali, è infatti emerso che la posizione centrale risulta più critica rispetto alle altre posizioni. Quando le rilevazioni effettuate con l'antenna nella posizione centrale rientrano nella specifica imposta dalla norma, ne consegue che nelle posizioni destra, sinistra e anteriore, le misurazioni rientrano tranquillamente nei limiti.

Non necessita invece la verifica nella posizione posteriore in quanto l'antenna dista più di 0.5 m dal materiale assorbente. Durante i test EMC la posizione posteriore sulla piattaforma girevole viene infatti fatta ruotare fino alla posizione anteriore rendendo il contributo della posizione retrostante ininfluenza rispetto al valore massimo del segnale. Si può pertanto omettere la verifica della posizione posteriore.

Con la configurazione di coni mostrata in figura 2.11. viene misurato l'NSA nelle varie posizioni dell'antenna trasmittente (centrale, sinistra, destra e anteriore) e in entrambe le polarizzazioni delle antenne (orizzontale e verticale). Queste misure vengono compiute con l'antenna a 1, 1,5 e 2 m dal piano di massa. Si nota come la condizione più critica sia in posizione centrale con le antenne in polarizzazione verticale a 1 m d'altezza.

Visto che è molto difficile capire la direzione delle riflessioni, viene scelto di effettuare test sperimentali posizionando dei coni assorbenti in varie posizioni. Allo scopo si hanno a disposizione due pannelli (di larghezza 1,5 m e altezza 2,2 m) con piramidi di poliuretano impregnato che si possono collocare lungo le pareti della camera. L'antenna trasmittente usata è la Bilog Teseq e l'antenna ricevente è la Bilog SUNOL.

Nelle schematizzazioni l'antenna trasmittente è rappresentata in colore verde e l'antenna ricevente in rosso (colori reali). Per la condizione più critica, cioè con l'antenna trasmittente in posizione centrale e con le antenne in polarizzazione verticale a 1 m d'altezza, viene mostrato il  $V_{SITE\ MAX}$  trovato.

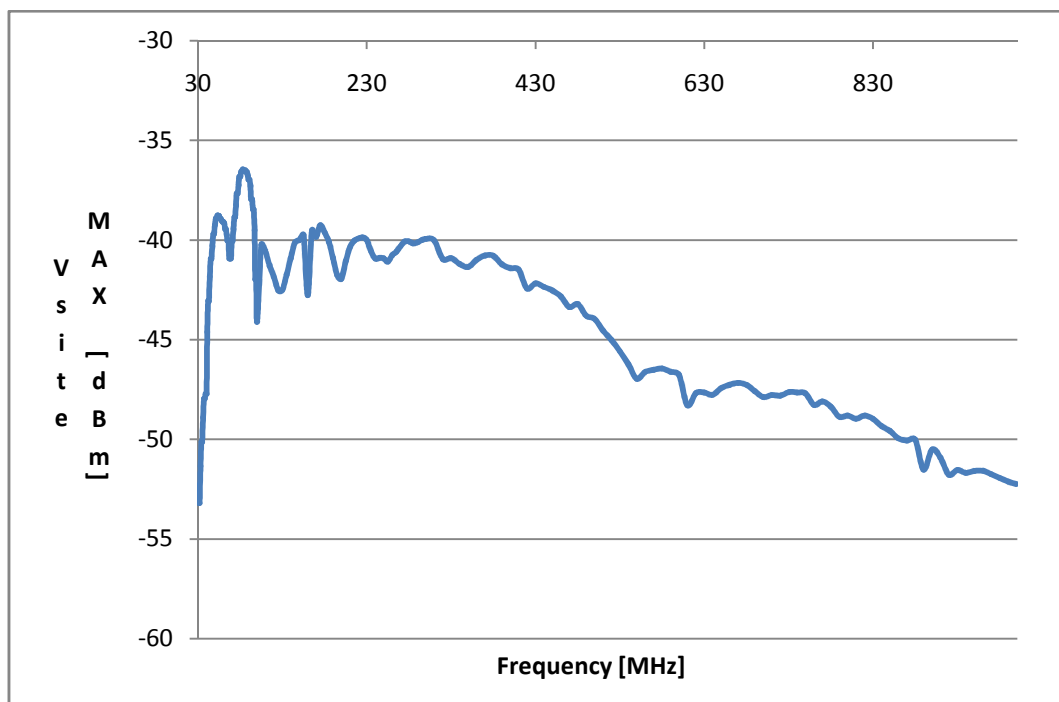


Fig. 3.23 –  $V_{SITE\ MAX}$

Si può notare come all'aumentare della frequenza il  $V_{SITE}$  massimo diminuisca. Questo è dovuto all'aumento di direttività dell'antenna ricevente (a causa del crescere della frequenza). Ne risulta che l'antenna ricevente non capta più le riflessioni laterali, si ha una diminuzione del segnale ricevuto e quindi una diminuzione della tensione ai suoi capi.

Dal  $V_{SITE\ MAX}$  si ricava l'NSA, ottenendo i grafici visualizzati in Fig.3.24 e Fig.3.25.

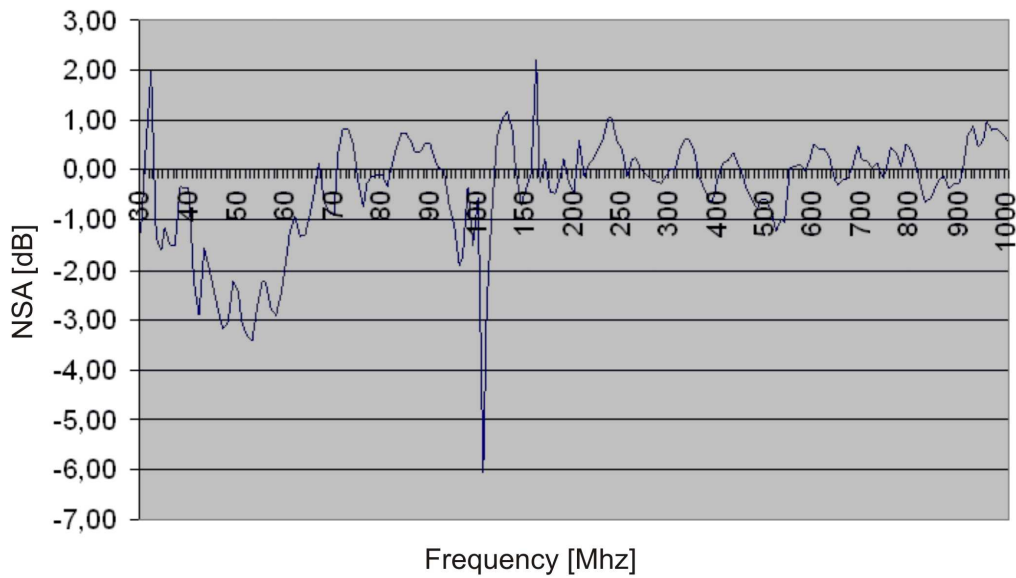


Fig 3.24 – Differenza tra NSA misurato e NSA teorico in polarizzazione verticale

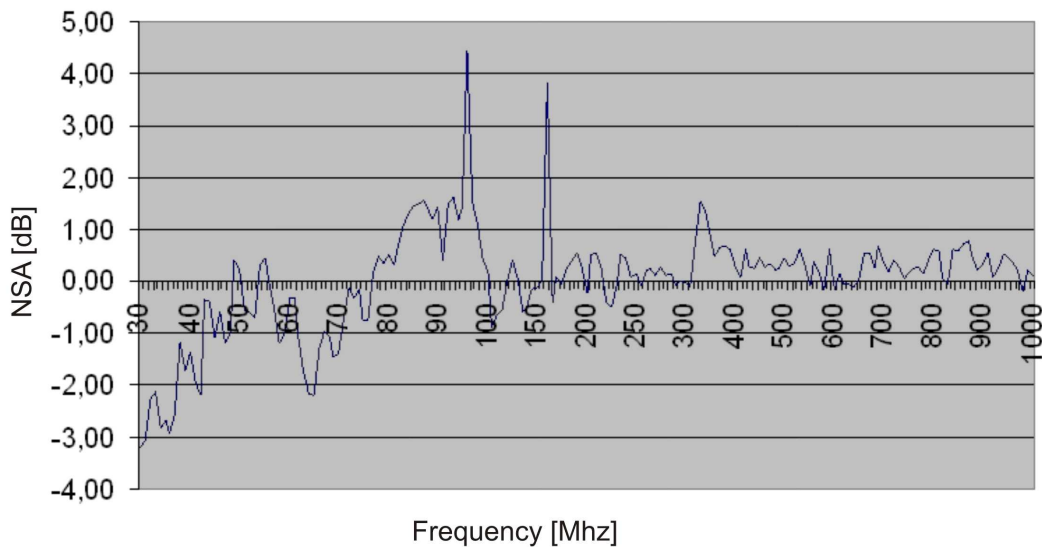


Fig.3.25 – Differenza tra NSA misurato e NSA teorico in polarizzazione orizzontale

Dalla Fig.3.24 vediamo come la differenza tra NSA misurato e NSA teorico sia molto marcata in quanto l'NSA esce da specifica di ben 2 dB (nel picco a 105 MHz). Dalla Fig.3.25 si nota come l'NSA sia fuori specifica anche se di poco. Per questa motivazione si è deciso di fare uno studio sperimentale più approfondito in questa configurazione. Si

cerca di individuare una disposizione dei coni che permetta di ottenere un NSA migliore basandosi sui risultati ottenuti nel paragrafo 2.4 (Studio delle riflessioni nella stima dell'NSA del sito) non considerando però il raggio A3 in quanto previsto. Non verranno esaminati inoltre i raggi A1, A2, B e D3 in quanto supponiamo che siano molto attenuati a causa del precedente posizionamento dei coni assorbenti. Diversamente dalla precedente trattazione ora dobbiamo considerare un'altra antenna al posto dell'obiettivo. Va però aggiunto che quest'antenna ha una direttività che va tenuta in considerazione. Usiamo una Bilog che ha quindi un diagramma di radiazione abbastanza simile all'antenna trasmittente (piuttosto omnidirezionale a basse frequenze e più direzionale alle alte).

Anche in questo studio prendiamo come frequenze significative 100 MHz e 1 GHz. I risultati sono riportati in Tab. 3.3.

Designazione del raggio	N. di riflessioni	Riflessioni	Prima riflessione (gradi)	Seconda riflessione (gradi)	Prima riflessione (dB)	Seconda riflessione (dB)	Direttività ant. trasmitt (dB)	Direttività ant. ricev. (dB)	D <sub>1</sub> (m)	D <sub>2</sub> (m)	Fattore di propag. P (dB)	Ampiezza del raggio (dB)
A 4	1	soffitto	18,82	-	-27	-	-9	-8	3	9,68	-10,18	-54,18
C	1	retro (lato ricevente)	0	-	-30	-	0	0	3	9,6	-10,10	-40,10
D 1	2	parete, retro (lato ricevente)	46,98	30,24	-17	-25	-2	-3	3	8,72	-9,27	-56,27
D 2	2	parete, retro (lato ricevente)	46,98	30,24	-17	-25	-2	-3	3	8,72	-9,27	-56,27
D 4	2	soffitto, retro (lato ricevente)	40,71	43,78	-18	-17	-3	-3	3	12,14	-12,14	-53,14
E 1	2	retro (lato trasmittente), parete	22,99	67,01	-27	-8	-2	-2	3	11,27	-11,50	-50,50
E 2	2	retro (lato trasmittente), parete	22,99	67,01	-27	-8	-2	-2	3	11,27	-11,50	-50,50
E 3	2	retro (lato trasmittente), pavimento	8,62	81,38	-30	0	-1	-2	3	6,5	-6,72	-39,72
E 4	2	retro (lato trasmittente), soffitto	34,87	55,12	-22	-13	-5	-3	3	13,54	-13,09	-56,09
F 1	2	parete, parete opposta	14,99	14,99	-28	-28	-6	-6	3	11,6	-11,75	-79,75
F 2	2	parete, parete opposta	14,99	14,99	-28	-28	-6	-6	3	11,6	-11,75	-79,75
F 3	2	pavimento, soffitto	14,84	14,84	0	-28	-7	-8	3	11,59	-11,74	-54,74
F 4	2	soffitto, pavimento	14,84	14,84	-28	0	-7	-8	3	11,59	-11,74	-54,74

Tab. 3.3 – Attenuazione dei raggi a 100 MHz (polarizzazione orizzontale)

Designazione del raggio	N. di riflessioni	Riflessioni	Prima riflessione (gradi)	Seconda riflessione (gradi)	Prima riflessione (dB)	Seconda riflessione (dB)	Direttività antenna trasmittente (dB)	Direttività antenna ricevente (dB)	D <sub>t</sub> (m)	D <sub>r</sub> (m)	Fattore di propagazione P (dB)	Ampiezza del raggio (dB)
A 4	1	soffitto	18,82	-	-13	-	-20	-18	3	9,68	-10,18	-61,18
C	1	retro (lato ricevente)	0	-	-13	-	-25	0	3	9,6	-10,10	-48,10
D 1	2	parete, retro (lato ricevente)	46,98	30,24	-13	-13	-10	-28	3	8,72	-9,27	-73,27
D 2	2	parete, retro (lato ricevente)	46,98	30,24	-13	-13	-10	-28	3	8,72	-9,27	-73,27
D 4	2	soffitto, retro (lato ricevente)	40,71	43,78	-13	-13	-6	-27	3	12,14	-12,14	-71,14
E 1	2	retro (lato trasmittente), parete	22,99	67,01	-13	-12	-25	-3	3	11,27	-11,50	-64,50
E 2	2	retro (lato trasmittente), parete	22,99	67,01	-13	-12	-25	-3	3	11,27	-11,50	-64,50
E 3	2	retro (lato trasmittente), pavimento	8,62	81,38	-13	0	-30	-2	3	6,5	-6,72	-51,72
E 4	2	retro (lato trasmittente), soffitto	34,87	55,12	-13	-12	-32	-4	3	13,54	-13,09	-74,09
F 1	2	parete, parete opposta	14,99	14,99	-13	-13	-21	-10	3	11,6	-11,75	-68,75
F 2	2	parete, parete opposta	14,99	14,99	-13	-13	-21	-10	3	11,6	-11,75	-68,75
F 3	2	pavimento, soffitto	14,84	14,84	0	-13	-21	-16	3	11,59	-11,74	-61,74
F 4	2	soffitto, pavimento	14,84	14,84	-13	0	-21	-16	3	11,59	-11,74	-61,74

Tab. 3.4 – Attenuazione dei raggi a 1 GHz (polarizzazione orizzontale)

Da notare come a 100 MHz prevalgano il raggio C ed E3 con ampiezza di entrambi di -40 dB mentre a 1 GHz prevale il raggio C con ampiezza -48 dB. Il raggio C si riflette sul retro dell'antenna ricevente, come pure il raggio E3.

## Test 1

Per attenuare questi raggi si procede con il posizionamento dei due pannelli mobili con piramidi di poliuretano impregnato sul retro dell'antenna ricevente. Vengono disposti centralmente in modo da intercettare la riflessione di entrambi i raggi (che avviene in posizione centrale a 1 m d'altezza per C e un po' più in basso per E3).



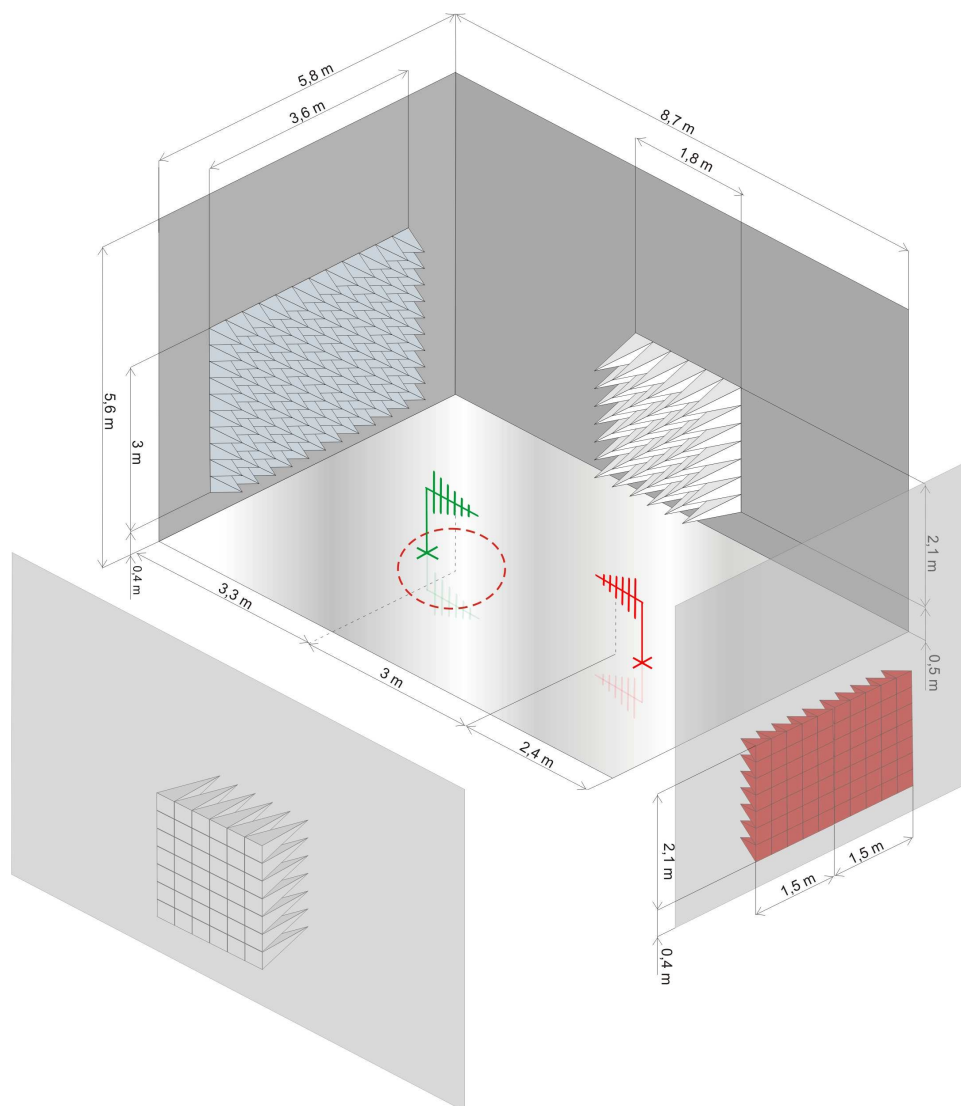


Fig. 3.26 – Test 1

In Fig. 3.26 i due pannelli mobili con piramidi di poliuretano sono di colore rosso per evidenziarli. Si esegue ora la misura dell'NSA, sempre con l'antenna trasmittente in posizione centrale e con le antenne in polarizzazione verticale a 1 m d'altezza. Si nota però (non viene riportato il grafico) un peggioramento di circa un dB alla frequenza di 105 MHz a causa dell'aumento del picco da -6 dB a circa -7. L'aggiunta di questi coni assorbenti ha quindi causato un'attenuazione delle onde riflesse che vanno a sommarsi in contofase; con la diminuzione di queste onde si ha un aumento del segnale ricevuto dall'antenna ricevente e un peggioramento dell'NSA. Pertanto i coni aggiunti vengono rimossi.

## Test 2

Ora l'attenzione si focalizza alle basse frequenze in quanto è in questo range che ci sono difficoltà (105 MHz). A 100 MHz (quindi vicino a 105 MHz) i raggi successivi (come ampiezza) a quelli già trattati sono E1 e E2 che rimbalzano prima sul retro (lato trasmittente) e poi sulla parete laterale. Viene deciso quindi di posizionare dei coni, come evidenziato in Fig. 3.27, sulle pareti laterali dove i raggi riflettono, così da attenuarli ulteriormente.

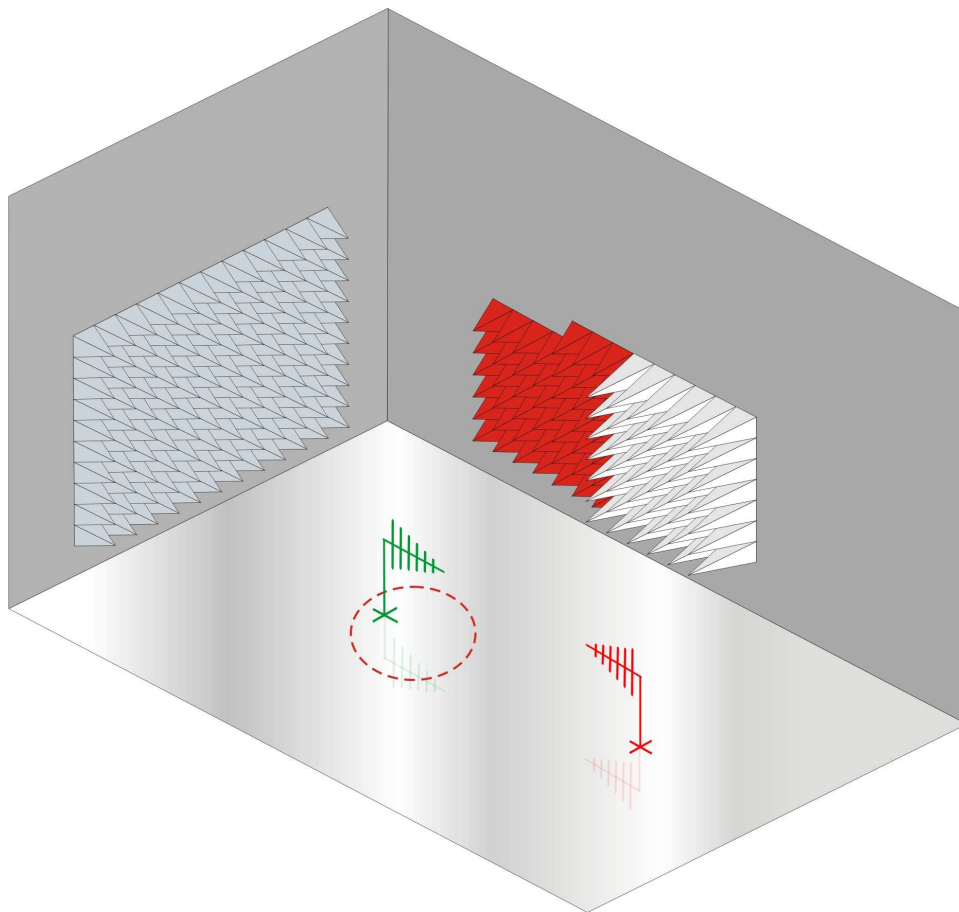


Fig. 3.27 – Test 2

Per semplificazione in figura 3.27 è rappresentata solo una parete laterale, in realtà vengono simmetricamente posizionati i coni anche nella parete opposta.

Ora si misura l'NSA ottenendo il grafico in Fig.3.28 dove si nota un lieve miglioramento a 105 MHz ma un peggioramento nell'intorno della frequenza di 55 MHz rimanendo però entro specifica.

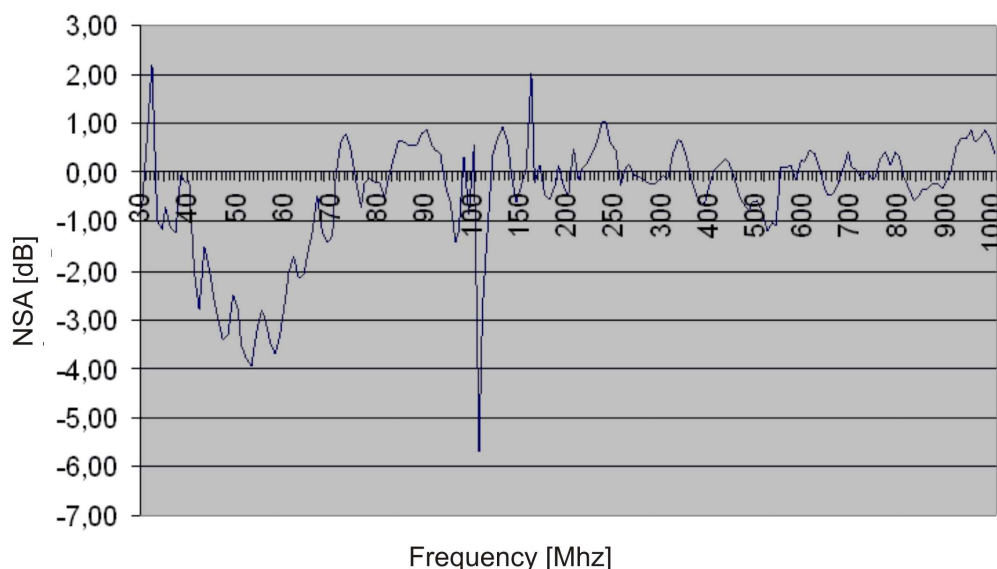


Fig.3.28 – Test 2: NSA in polarizzazione verticale

Si sono così ulteriormente attenuati i raggi alla frequenza di interesse. In realtà i raggi che impattano nei coni non vengono assorbiti completamente ma si rifrangono parzialmente in direzioni imprevedibili. Per questo motivo all'interno della camera, avendo posizionato molti coni, ci saranno riflessioni difficilmente studiabili. Rimangono da studiare i raggi meno rilevanti con attenuazione simile (si veda Tab. 3.3).

### Test 3

Si cerca ora di individuare le zone di massima riflessione con un metodo più sperimentale. Si scansiona l'intera camera posizionando un piano riflettente conduttore metallico, di circa 1x2 m, in vari punti delle pareti e si rileva la differenza dei valori di attenuazione con e senza questo piano. Più la differenza sarà alta, tanto maggiore sarà la riflessione derivante dal piano metallico piazzato. In quel punto, in assenza del piano, si avrà un flusso di segnali a maggiore potenza. Vengono in questo modo individuate zone di maggior potenza di segnale.

Collocando dei coni assorbenti in queste zone si potrà attenuare sensibilmente la riflessione ottenendo così un comportamento migliore della camera. Per questo test l'analizzatore di spettro viene impostato in un intorno della frequenza da analizzare. Stabilita un'amplificazione di -10dBm alla frequenza di 105 MHz (stessa amplificazione usata per la misura dell'NSA) si confrontano i valori dell'NSA con e senza piano metallico.

Il  $V_{\text{site,MAX}}$  senza piano metallico risulta essere di -40.26 dBm (a cui corrisponde una differenza rispetto l'NSA teorico di 5,6 dB). Collocando il piano metallico sulla parete vicino ai coni lunghi (dalla parte dell'antenna ricevente) si ottiene un  $V_{\text{site,MAX}}$  di -42.69 dBm: questo  $V_{\text{site,MAX}}$  ci restituisce un NSA che ci permetterebbe di rientrare dentro specifica (con una differenza rispetto all'NSA teorico di -3.17).

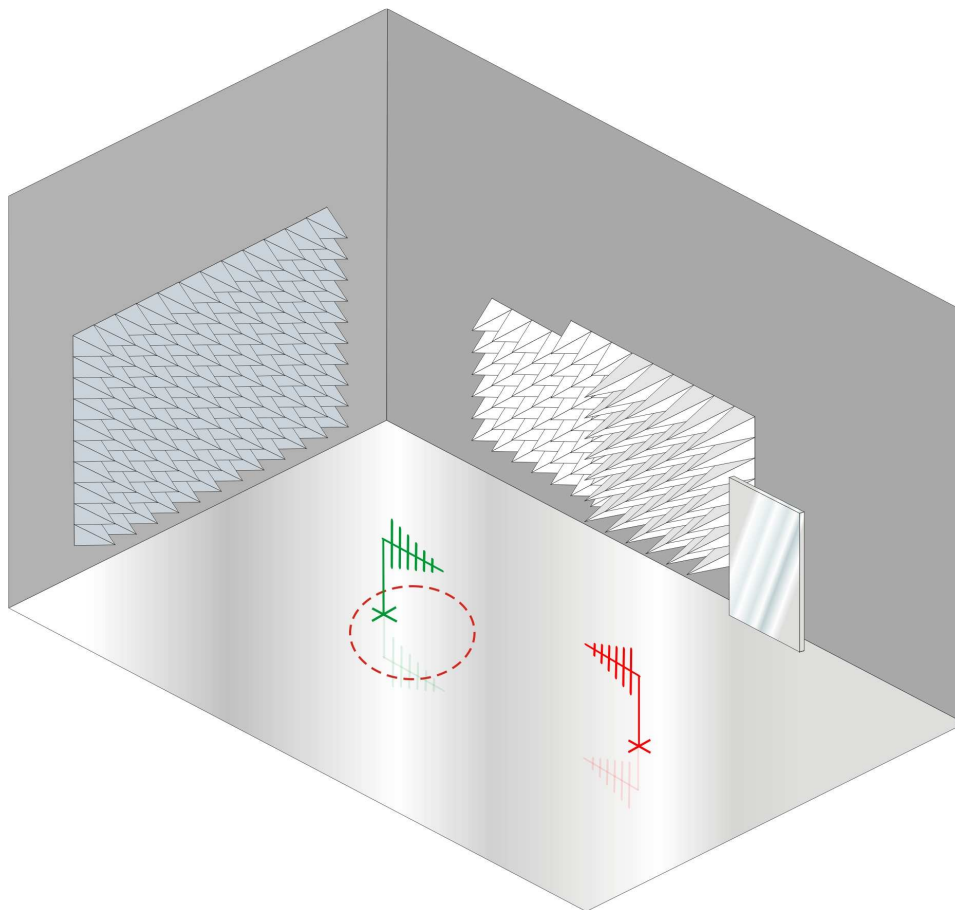
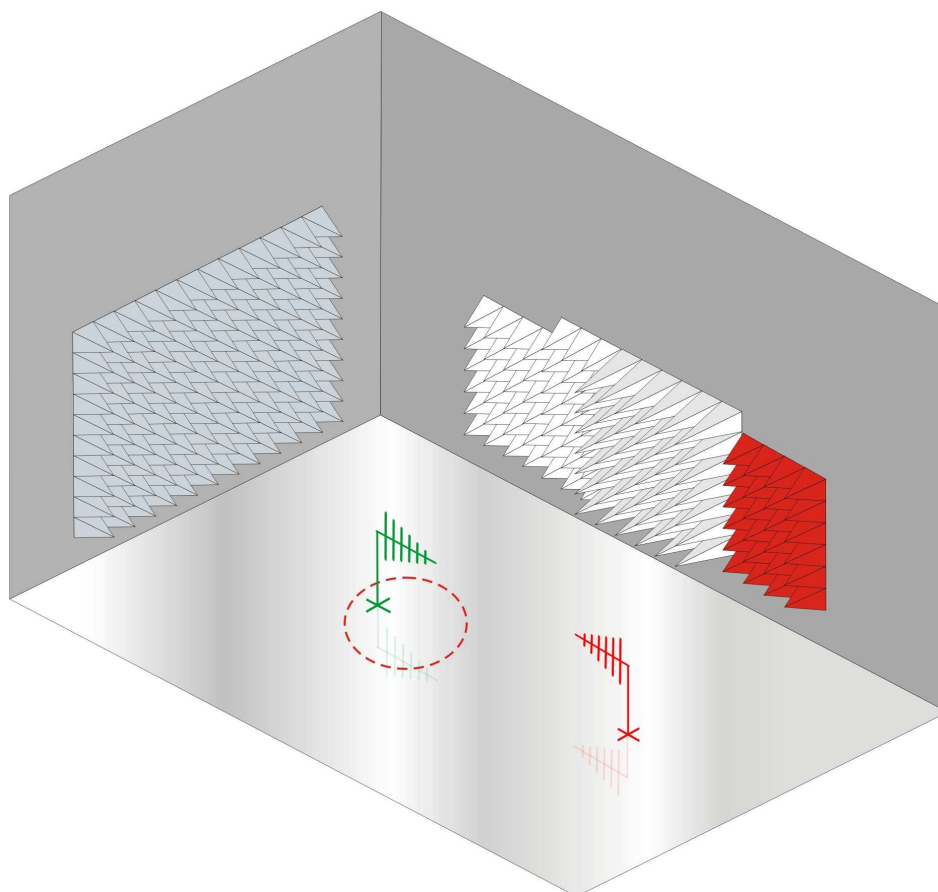


Fig. 3.29 – Test 3

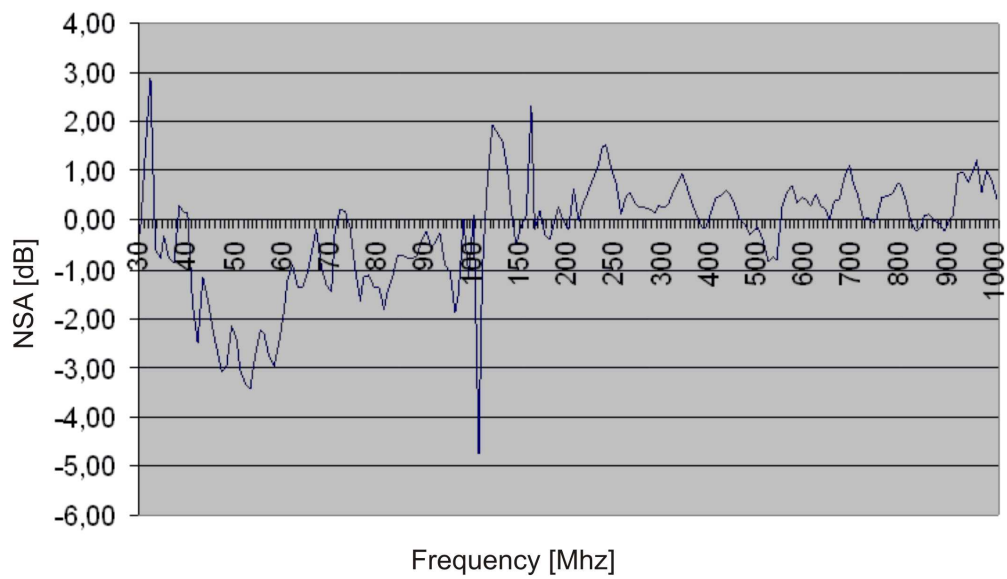
Questo avviene con il piano riflettente collocato a ridosso della parete (Fig. 3.29). È interessante notare come allontanando il piano metallico dal muro anche solo di qualche centimetro si ha una sostanziale variazione del  $V_{\text{site,MAX}}$

Per esempio allontanando di 40 cm il piano metallico dalla parete si ottiene un  $V_{\text{site,MAX}}$  di -37,87 dBm (con una differenza rispetto all'NSA teorico di -7,99 dB). Una sostanziale differenza si rileva anche spostando il piano metallico a destra e sinistra. Un risultato analogo si ottiene posizionando il piano metallico simmetricamente nella parete opposta. Posizionando il piano metallico in altri punti della camera la variazione dell'NSA è molto meno rilevante.

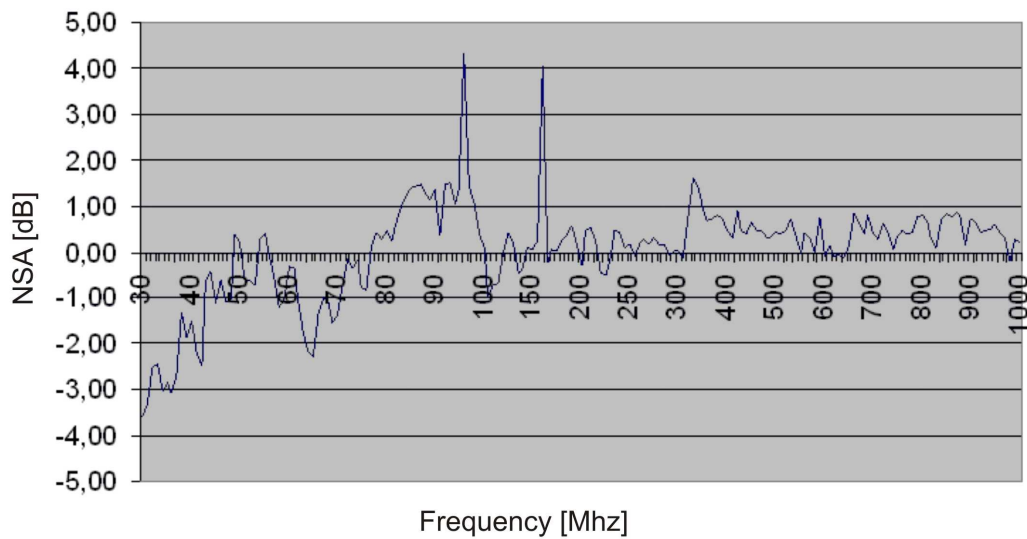
Si decide quindi di aggiungere dei coni assorbenti come in figura 3.30. Da notare che la zona in cui si aggiungono i coni è quella colpita dai raggi D1 e D2 che hanno ampiezza -56 dB. Quindi si ha anche una conferma teorica. Si collocano quindi ulteriori coni a coprire quella zona come evidenziato in figura 3.30 e si misura l'NSA.



*Fig. 3.30 – Test 3: Aggiunta dei coni ai lati dell'antenna ricevente*



*Fig.3.31 – Test 3: NSA in polarizzazione verticale*



*Fig.3.32 – Test 3: NSA in polarizzazione orizzontale*

In questa situazione si ha un ottimo miglioramento a 105 MHz: si passa infatti a -4,8 dB, solo 0,8 dB fuori dalla norma. In polarizzazione verticale l'andamento non subisce variazioni continuando a rimanendo di pochissimo fuori specifica.

### Approfondimento del Test 3 a 105 MHz

Il grafico in Fig. 3.31 riproduce la differenza tra NSA misurato e NSA teorico del Test 3 che si va ora ad analizzare separatamente.

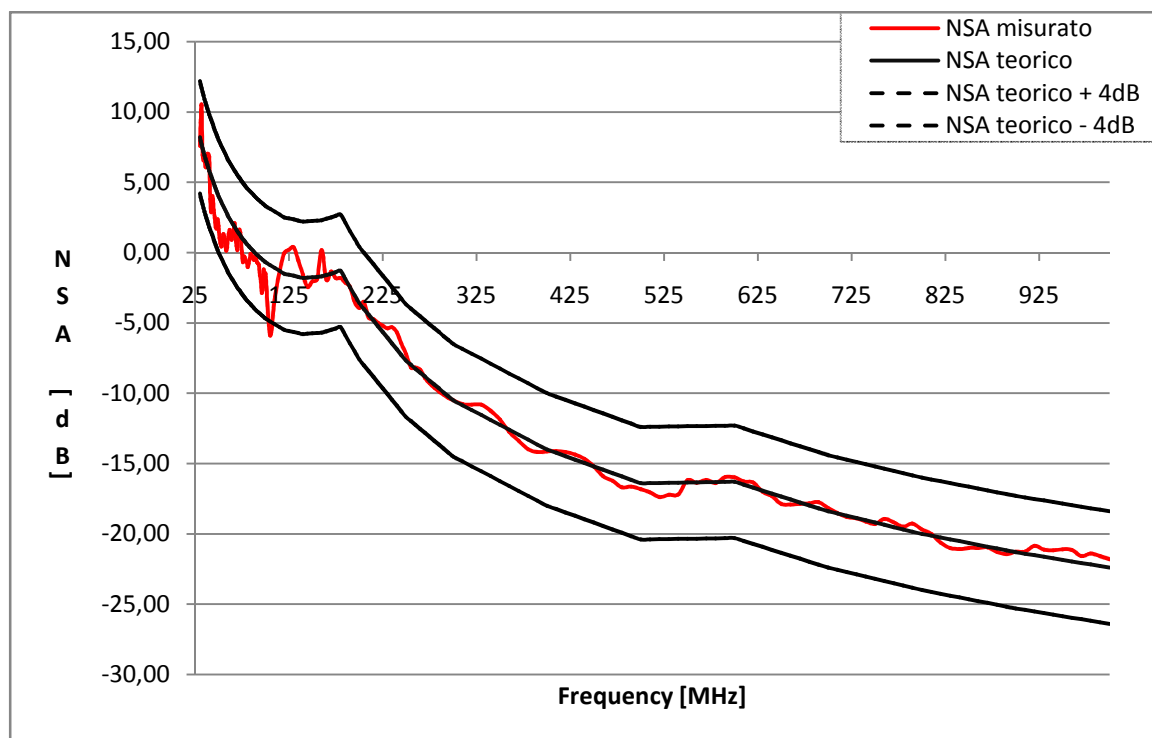


Fig. 3.33 – NSA misurato e teorico

In Fig. 3.33 si percepisce quanto l'NSA misurato si discosta dai limiti normativi dell'NSA teorico.

### Considerazioni alle diverse altezze del Test 3

Si esamina il caso critico a 105 MHz, individuando la configurazione più gravosa e cercando di risolverla.

Precedentemente lo studio teorico era stato effettuato con le antenne poste alla stessa altezza (1, 1,5 e 2 m). Nel test l'antenna ricevente viene traslata linearmente da 1 m a 4 m di altezza durante il rilevamento dell'NSA, mentre l'antenna trasmittente rimane ferma. Vengono memorizzati i valori di NSA più critici, vale a dire i punti in cui si ha minore attenuazione del sito. Si vuole determinare a quale altezza dell'antenna ricevente si hanno i valori più critici.

Si misura il  $V_{SITE}$  con l'antenna ricevente fissa a 1 m, 2 m, 3 m e 4 m d'altezza (Fig. 3.34).

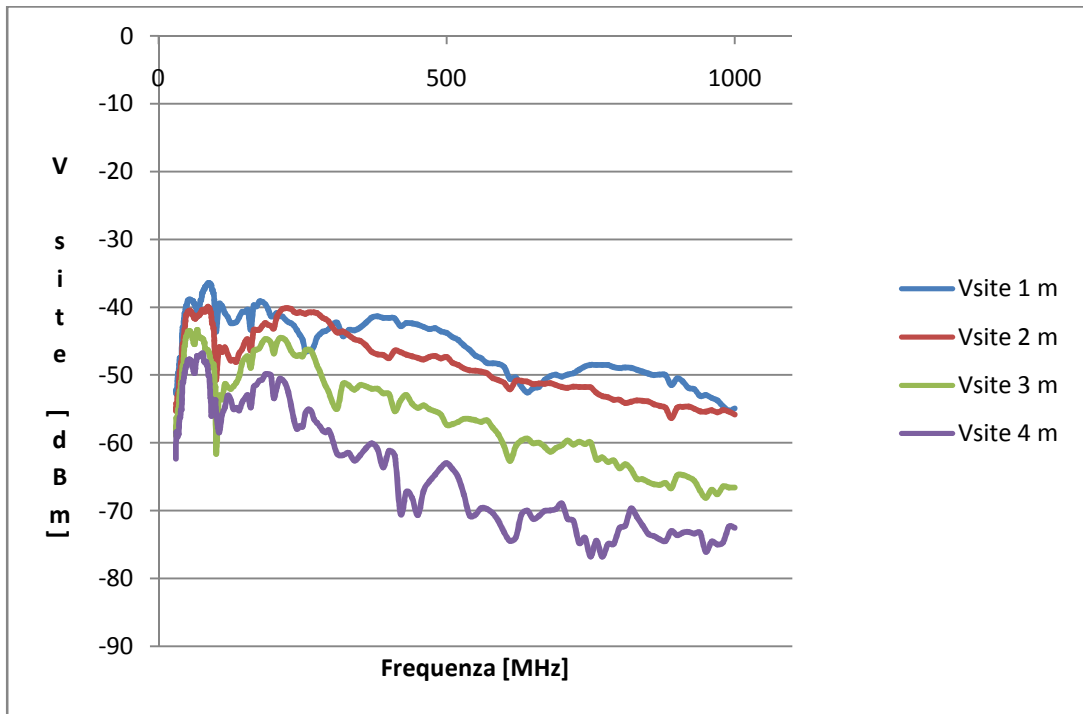


Fig. 3.34 -  $V_{SITE}$  a varie altezze dell'antenna ricevente

Il  $V_{SITE}$  massimo sarà dato dall'involuppo superiore della sovrapposizione delle quattro curve (Fig.3.34).

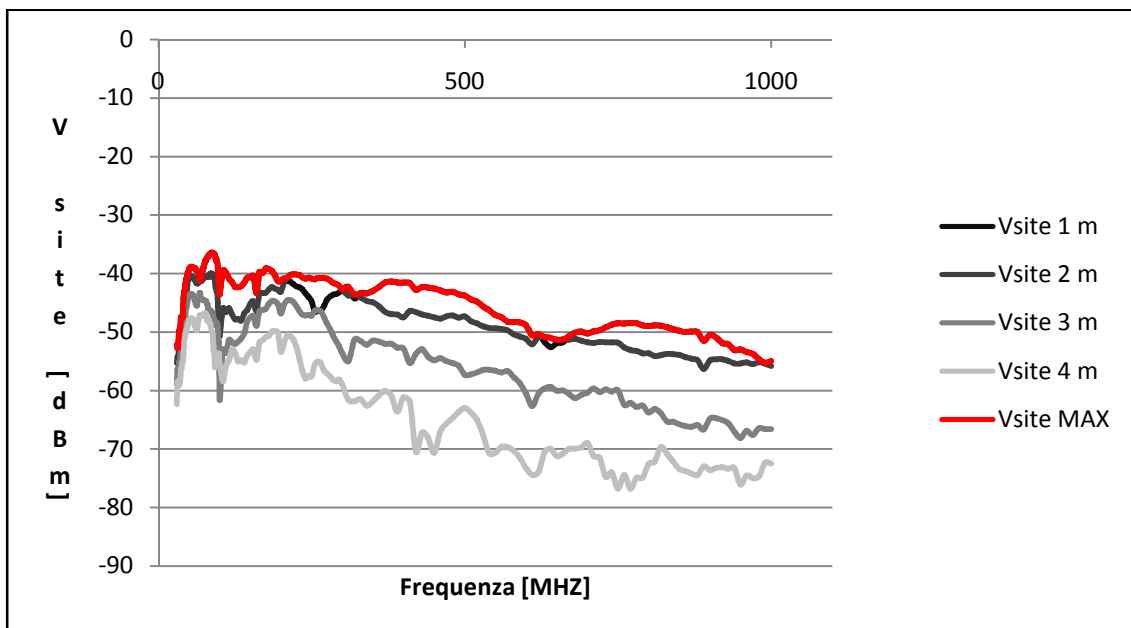


Fig.3.35 -  $V_{SITE MAX}$



Dalla Fig. 3.35 è chiaro che il contributo al  $V_{\text{SITE MAX}}$  è quasi esclusivamente quello della prova effettuata con l'antenna ricevente a un metro d'altezza (tranne che nei range di frequenza 205-295 e 620-660 MHz, in cui prevale il test eseguito con l'antenna ricevente a due metri d'altezza). Le prove a 3 e 4 m di altezza sono ininfluenti al fine del calcolo del  $V_{\text{SITE MAX}}$ . Alla frequenza in studio (105 MHz) si ha quindi il caso peggiore con l'antenna ricevente a 1 m d'altezza.

Ulteriori prove effettuate ad altezze intermedie tra 1 e 2 m hanno confermato che la situazione critica si ha con l'antenna ricevente all'altezza di 1 m. Il risultato era prevedibile in quanto alzando l'antenna ricevente si ha un allontanamento delle due antenne e ne consegue, per la traiettoria più lunga dei segnali riflessi, una riduzione della potenza all'antenna ricevente. Per di più le antenne non sono più allineate e si ha un'aggiuntiva attenuazione a causa della direttività delle antenne.

Il seguente studio si è reso necessario perché le due pareti laterali della camera semianecoica sono ricoperte da coni assorbenti solo fino all'altezza di 2,3 metri. Se il  $V_{\text{SITE MAX}}$  fosse stato determinato da valori con l'antenna ricevente collocata sopra i 2-3 metri, avremmo dovuto posizionare coni assorbenti anche oltre tale altezza.

### **Confronto tra AF teorico e AF del certificato di taratura**

Si è inoltre confrontato l'AF teorico dell'accoppiata delle antenne con quello dato dal certificato di taratura. Il grafico in Fig. 3.36 riporta i valori dell'Antenna Factor dell'accoppiata delle antenne utilizzate per la stima dell'NSA: valore teorico dato dalla somma dei due singoli AF teorici delle due antenne (Sunol e Teseq) e valore reale dato dal rapporto di taratura delle due antenne tarate in accoppiata.

Nella tabella 3.5 sono riportati alcuni valori specifici della differenza tra AF teorico e AF del certificato di taratura.

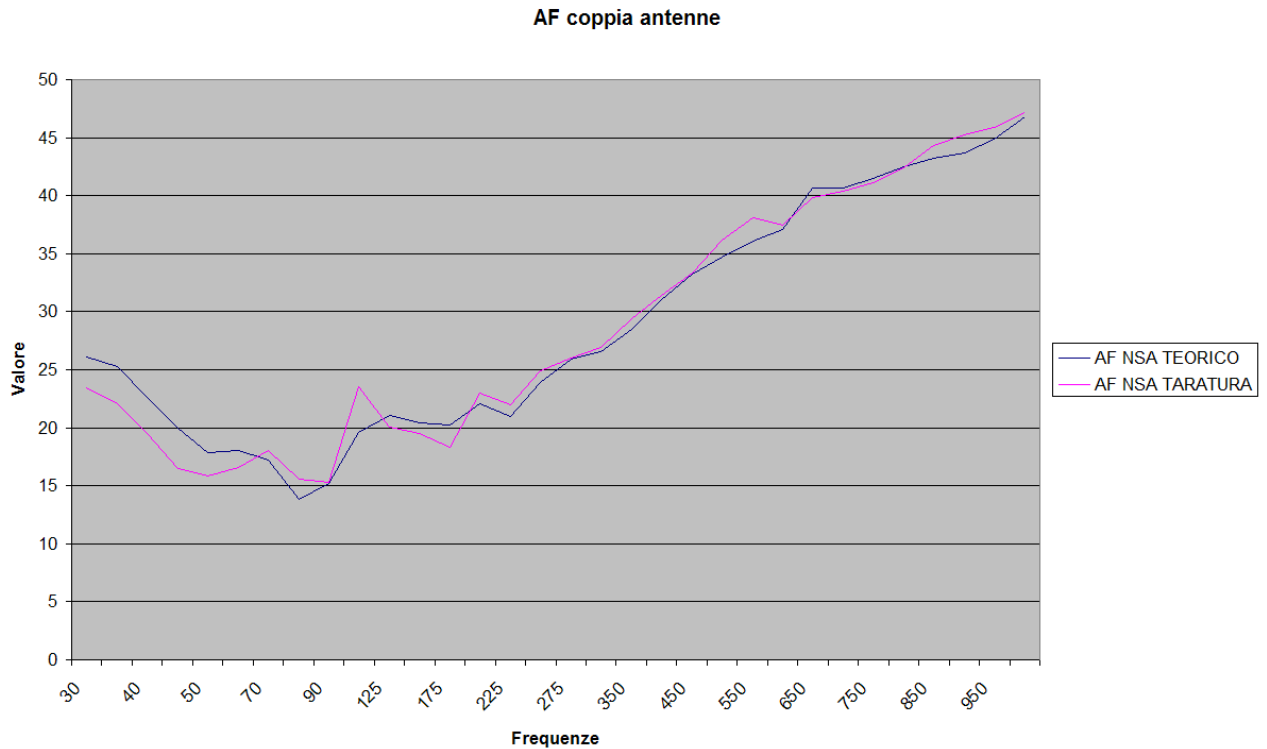


Fig. 3.36 – Confronto tra AF teorico e AF del certificato di taratura

freq.	TEORICO Sunol (dB)	TEORICO Teseq (dB)	TEORICO AFx2 (dB)	TARATURA AFx2 (dB)	differenza (dB)
30	20,9	5,17	26,07	23,48	2,59
40	13,3	9,29	22,59	19,52	3,07
50	7,8	10,08	17,88	15,8	2,08
60	7,4	10,68	18,08	16,54	1,54
70	7,8	9,42	17,22	18,08	-0,86
80	7,3	6,55	13,85	15,57	-1,72
90	7,9	7,34	15,24	15,27	-0,03
100	10,4	9,24	19,64	23,53	-3,89
110	12,4	7,8	20,2	21,56	-1,36
120	13,3	7,69	20,99	19,65	1,34
130	13,1	7,77	20,87	19,81	1,06
140	12,5	7,81	20,31	20,02	0,29
150	12,5	7,96	20,46	19,47	0,99
160	12,4	8,96	21,36	20,04	1,32
170	11,8	8,57	20,37	18,45	-1,92
180	11	8,99	19,99	18,59	-1,4

Tab. 3.5 – AF teorico e AF del certificato di taratura

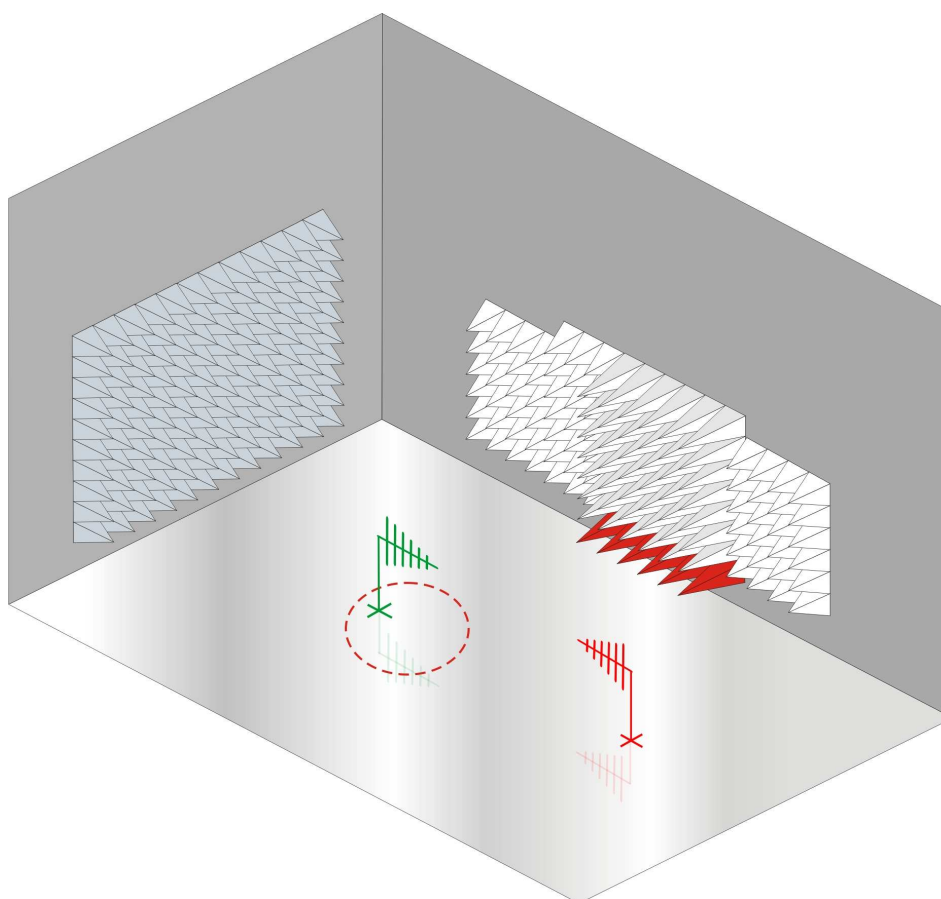
In prossimità di 105 MHz si ha uno scostamento di quasi 4 dB tra NSA teorico e quello riportato nel certificato di taratura. La differenza esatta è -3,89 dB: con una netta analogia con il picco di -4,75 dB analizzato nel Test 3 (si veda Fig. 3.31) che si ottiene in fase di taratura come differenza tra l'NSA misurato e l'NSA teorico.

Analoga che aveva inizialmente portato a pensare ad un'impresione di taratura; è stato contattato il Centro di taratura che però ha confermato l'esattezza dell'AF.

(NB: Di recente si è deciso di mandare a tarare nuovamente l'accoppiata delle antenne in un diverso Centro di taratura in quanto diffidenti sui risultati forniti).

#### Test 4

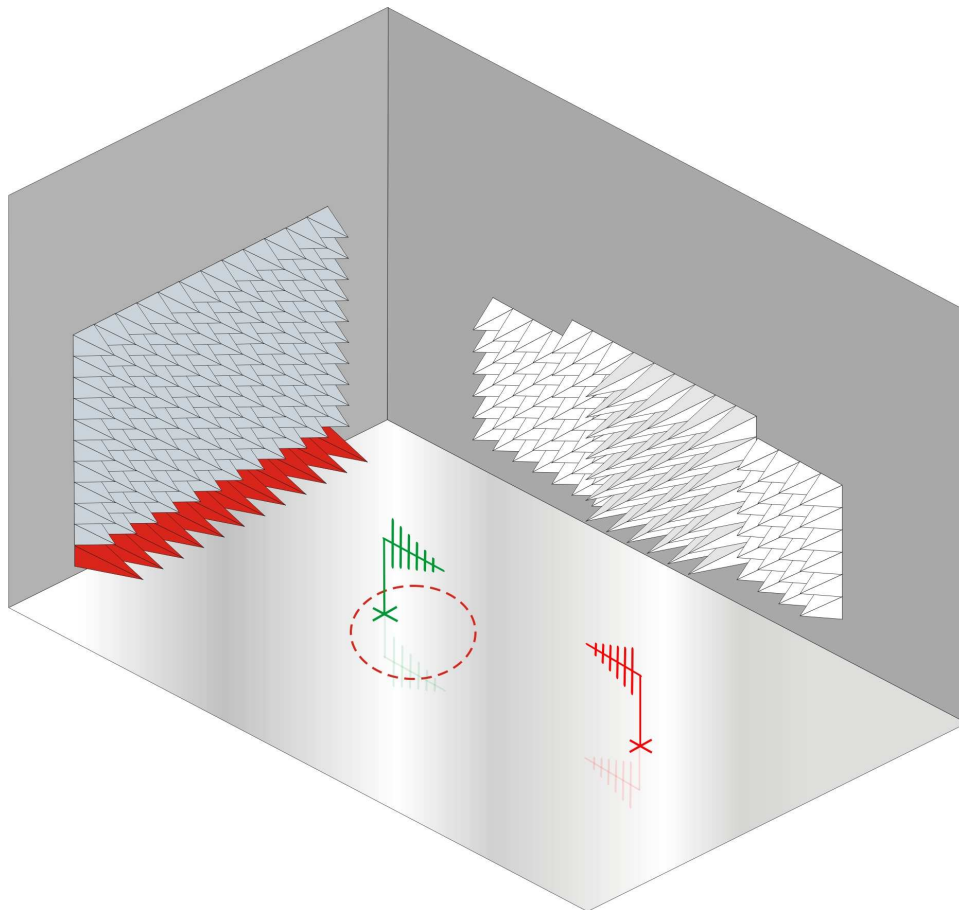
Non avendo trovato una soluzione al test precedente si cerca di agire con il posizionamento di ulteriori coni. Il test consiste in una prova sperimentale posizionando dei coni lunghi in vicinanza del piano metallico come mostrato in figura 3.37 e simmetricamente nella parete di fronte. Dal calcolo dell'NSA si rileva un lieve peggioramento.



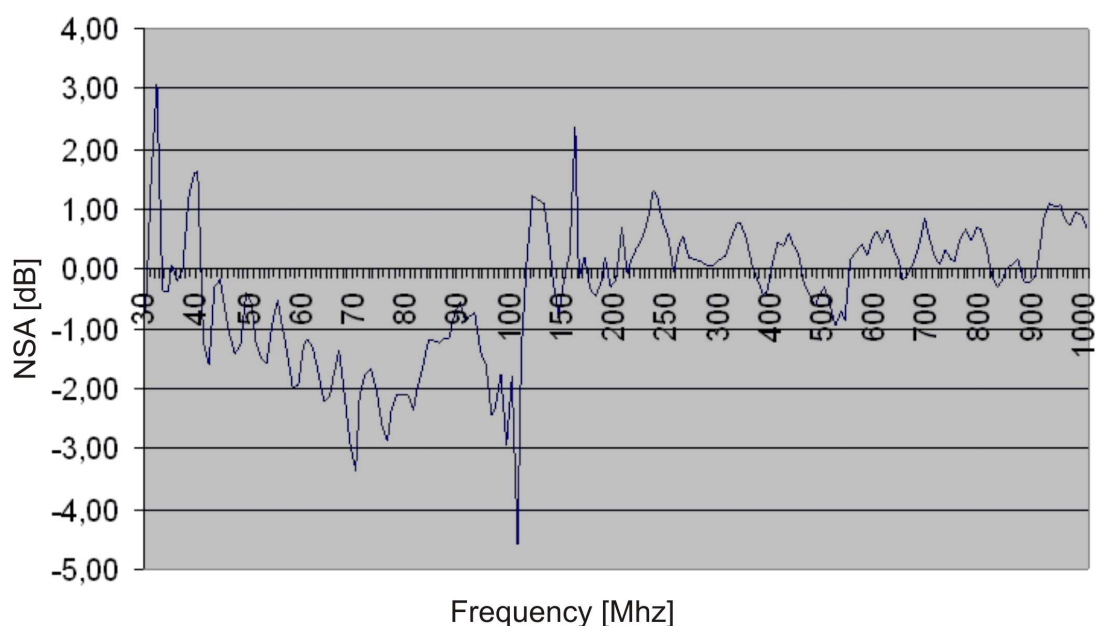
*Fig. 3.37 – Test 4: coni su pareti laterali*

Effettuando altre prove, aggiungendo e/o togliendo altri coni lunghi sia lateralmente che centralmente, si ottengono sempre risultati peggiorativi. Questa riduzione del segnale all'antenna ricevente si deve al fatto che si attenuano dei raggi che, riflettendosi sul piano di massa, dovrebbero essere invece raccolti dall'antenna ricevente (infatti il confronto viene fatto con l'NSA calcolato in un OATS). Questi coni vengono quindi rimossi.

Si prova ora a posizionarli nella parete retrostante l'antenna trasmittente a 10 cm dal piano metallico come mostrato in figura 3.38 ottenendo un lievissimo miglioramento (si veda Fig. 3.39).



*Fig. 3.38– Test4: coni su parete retrostante l'antenna trasmittente*



*Fig. 3.39 – Test 4: NSA finale*

Altre prove vengono eseguite con i pannelli negli angoli della camera. Posizionando i coni nei due angoli dalla parte della antenna trasmittente non si ottiene una sostanziale differenza di NSA. Collocandoli invece agli angoli della camera dalla parte dell'antenna ricevente ne consegue un peggioramento. Per questo motivo viene deciso di non mettere alcun cono negli angoli.

Si prova infine a sovrapporre alle piramidi in poliuretano, presenti nella parete retrostante dell'antenna trasmittente, dei coni FrankoSorb corti più performanti: si ottiene un buon miglioramento con un picco portato a -4.2 dB.

Da più prove è emerso che la zona centrale del pannello, com'era prevedibile, è più critica.

### **Soluzione**

La problematica appena studiata è legata alla bassa frequenza e una soluzione ottimale si otterrebbe sostituendo con dei coni assorbenti lunghi (più performanti alle basse frequenze) le piramidi in poliuretano sulla parete dietro l'antenna trasmittente.

Viene deciso quindi di ordinare altri coni lunghi sufficienti a ricoprire quella zona ed eventualmente a sostituire i coni corti nelle pareti laterali. In questa maniera si otterrà un notevole miglioramento che ci permetterà di rientrare a specifica.



# Capitolo 4

## **TECNICHE DI PROVA E DI MISURA**

### **4.1 Prova d'immunità ai campi elettromagnetici a radiofrequenza irradiati**

#### **4.1.1 Norme di riferimento**

##### **La procedura di taratura : uniformità di campo**

La procedura di taratura dell'uniformità di campo è conforme a:

CEI EN 61000:2007-04;

Tecniche di prova e di misura – Prova d'immunità ai campi elettromagnetici a radio frequenza irradiati

*/Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*



### 4.1.2 Strumentazione utilizzata

Descrizione	Marca/Modello
Generatore RF	HP / 8648C
Amplificatore	Kalmus / 116FC-CE
Amplificatore	Eurotest/ IDO2004
Amplificatore	DePaoli/ PA1-2.5-2
Accoppiatore direzionale	Maury Microwave / 4098A
Accoppiatore direzionale	Narda / 4242-20
Attenuatore 6dB	JFW / 50FH-006-100
Power meter	HP / 438A
Power sensor	HP / 8452A
Transient limiter	HP / 11867A
Antenna	Chase / Bilog CBL6111B
Antenna	Schwarzbeck / BBHA 9120 LFA
Software di Test	Eurotest/SW-CEIEN61004_3
Misuratore di campo elettrico	Wandel & Goltermann
Accoppiatore bidirezionale	HP/778D
Terminazione 50Ohm	GENEX/C3020560LV

Si tenga presente che per l'esecuzione della prova si devono utilizzare i cavi BNC di seguito descritti, in modo da mantenersi prossimi alle condizioni di verifica:

fra 80MHz e 1000MHz si usa CAVOSC15 fra generatore di segnale ed amplificatore;

fra 1000MHz e 2500MHz si usa CAVOSC05 fra generatore di segnale ed amplificatore;

dall'amplificatore relativo fino all'antenna, si usa CAVOSC01 e CAVOSC02.

### **4.1.3 Procedura di taratura**

La taratura deve essere allestita in camera anecoica nella quale è già predisposto il sito di prova (tavolo non conduttivo, tavola rotante, supporto mobile per antenna,...).

Condizioni ambientali:

- \* Temperatura: da 15°C a 35°C
- \* Umidità: da 30% a 75%
- \* Pressione atm.: da 86kPa a 106kPa (da 860 mbar a 1060 mbar: cond. meteo standard)

Si registrano (non è necessaria la registrazione della pressione atm) i valori rilevati, in modo che vengano riportati nel report di prova.

#### **Taratura del campo**

Lo scopo della taratura del campo è quello di assicurare che l'uniformità del campo sull'esemplare in prova sia sufficiente ad assicurare la validità dei risultati di prova. La IEC 61000-4-3 utilizza il concetto di area di campo uniforme (UFA, vedere Fig. 4.1 da intendersi come rappresentata da un ipotetico piano verticale nel quale le variazioni del campo sono accettabilmente piccole. In una procedura comune (taratura del campo), è dimostrata la capacità di generare un tale campo da parte dell'impianto di prova e dell'apparecchiatura di prova. Contemporaneamente, si ottiene un database per l'impostazione dell'intensità di campo richiesta per la prova di immunità. La taratura del campo è valida per tutti gli EUT le cui singole facce (compreso qualsiasi cablaggio) possano essere completamente coperte dall'UFA.

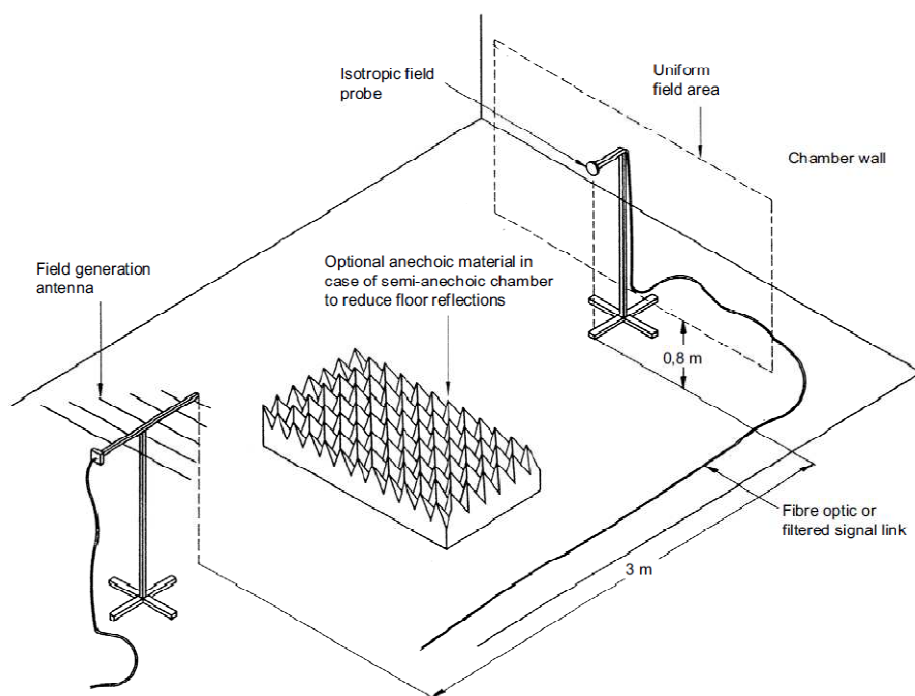


Fig. 4.1 – Taratura del campo

Per la taratura del campo si posizionano dei coni sul pavimento riflettente; questi coni poi verranno tenuti nel momento in cui si andranno a fare le prove di immunità irradiata sul dispositivo in prova.

L'intensità del campo di prova, indicata nella norma di prodotto, vale 1,3,10 o 30 V/m.

Per la prova di un'apparecchiatura questo segnale è modulato in ampiezza all'80% con un'onda sinusoidale a 1 kHz per simulare le minacce reali.

La taratura del campo è eseguita senza aver installato alcun EUT (Fig. 4.1). In tale procedura si determina il rapporto tra l'intensità del campo all'interno dell'UFA e la potenza diretta applicata all'antenna. Durante la prova la potenza diretta richiesta è calcolata partendo da tale rapporto e dall'intensità di campo voluta (per esempio 10V/m). La taratura è valida finché la configurazione di prova utilizzata rimane invariata per la prova, pertanto deve essere registrata l'impostazione di taratura (antenna, assorbitore supplementare, cavi, ecc.). È importante documentare, per quanto ragionevolmente possibile, l'esatta posizione delle antenne emittenti, dei cavi e dei coni posizionati sul pavimento. Le stesse posizioni devono essere utilizzate anche per la prova di immunità, poiché anche spostamenti minimi possono influenzare il campo in modo significativo.

L'antenna trasmittente deve essere posizionata a una distanza sufficiente da consentire all'UFA di cadere nel raggio d'azione del campo trasmesso. Il sensore del campo deve

essere posto ad almeno 1 m dall'antenna trasmittente. Verrà applicata una distanza di 3 m (Fig. 4.1) tra l'antenna e l'UFA. Questa distanza è calcolata a partire dal centro dell'antenna Bilog. Il rapporto di taratura e il rapporto di prova devono indicare la distanza utilizzata.

A meno che l'EUT e il suo cablaggio non possano essere illuminati completamente all'interno di una superficie inferiore, la dimensione dell'UFA deve essere di almeno 1,5 m x 1,5 m, con il bordo inferiore posto a un'altezza di 0,8 m dal pavimento. Le dimensioni dell'UFA non devono essere inferiori a 0,5 m x 0,5 m. Durante la prova di immunità, la faccia dell'EUT da illuminare deve essere coincidente a tale UFA.

Per stabilire la severità della prova per gli EUT e i cablaggi da provare vicino al suolo (piano di riferimento di terra), l'ampiezza del campo è registrata anche a un'altezza di 0,4 m. I dati ottenuti sono documentati nel rapporto di taratura ma non considerati per l'idoneità dell'impianto di prova e per il database di taratura.

A causa dei riflessi del pavimento di una camera semianecoica, è difficile definire un'UFA vicino a un piano di riferimento di terra. Ulteriore materiale assorbente sul piano di riferimento di terra può risolvere tale problema.

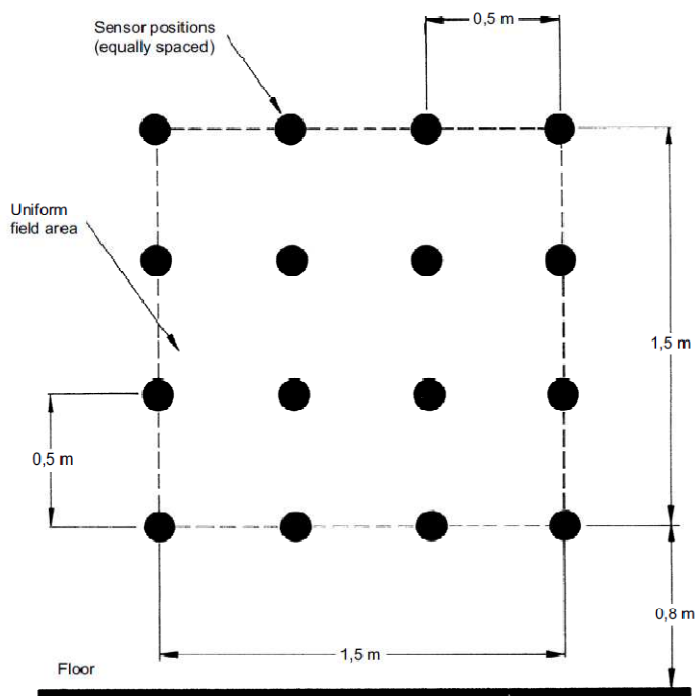


Fig. 4.2 – Taratura del campo, dimensioni dell'area uniforme

L'UFA è suddivisa in una griglia con spaziatura di 0,5 m (Fig. 4.2) per un esempio di un'UFA di 1,5 m x 1,5 m). A ogni frequenza, un campo è considerato uniforme se la sua ampiezza misurata sui punti della griglia è compresa tra  $\begin{matrix} -0 \\ +6 \end{matrix}$  dB del valore nominale per almeno il 75% di tutti i punti della griglia (cioè se almeno 12 dei 16 punti di un'UFA di 1,5x1,5 m misurati rientrano nella tolleranza). Per un'UFA minima di 0,5x0,5 m, l'ampiezza del campo nei quattro punti della griglia deve situarsi all'interno di tale tolleranza.

A frequenze diverse, punti di misurazione diversi possono rientrare nella tolleranza.

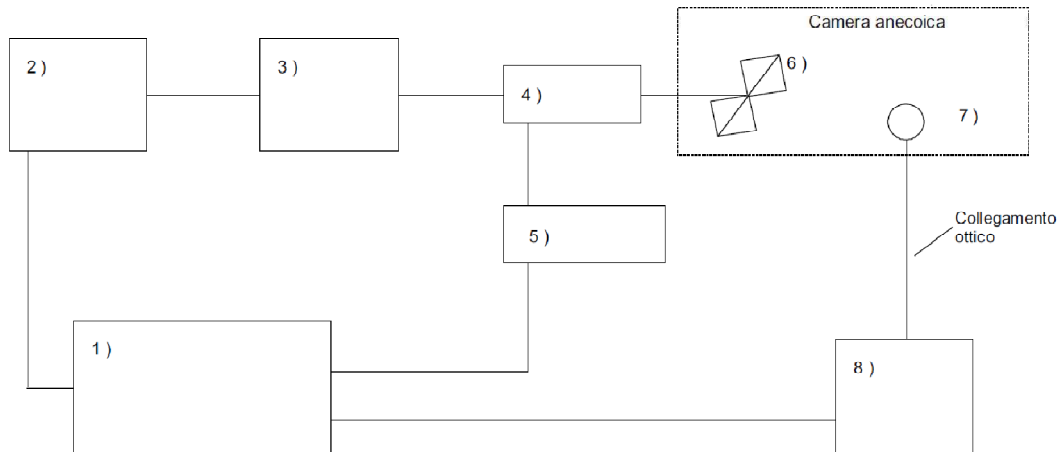
La tolleranza da  $\begin{matrix} -0 \\ +6 \end{matrix}$  dB è stata scelta per assicurare che l'intensità di campo non scenda sotto il valore nominale con una probabilità accettabile. La tolleranza di 6 dB è considerata il minimo ottenibile nelle condizioni pratiche di prova.

Nel campo di frequenze fino a 1 GHz, è ammessa una tolleranza superiore a +6 dB e fino a +10 dB, ma non inferiore a -0 dB, per un massimo del 3% delle frequenze di prova, a patto che la tolleranza effettiva sia segnalata nel rapporto di prova. In caso di controversie, prevale la tolleranza  $\begin{matrix} -0 \\ +6 \end{matrix}$  dB.

Se l'area che deve essere occupata dalla faccia dell'EUT è superiore a 1,5 m x 1,5 m e non è possibile realizzare un'UFA di dimensioni sufficienti (metodo preferenziale), l'intera area destinata a essere occupata dall'EUT può essere illuminata in una serie di prove ("illuminazione parziale").

Cioè:

- la taratura deve essere effettuata in diverse posizioni dell'antenna irradiante, in modo che le UFA combinate coprano l'area che deve essere occupata dalla faccia dell'EUT, e l'EUT deve essere sottoposto a prova con l'antenna posta successivamente in ciascuna posizione;
- oppure l'EUT deve essere spostato in punti diversi, in modo che ciascuna sua parte si trovi nell'UFA durante almeno una di tali prove.



- 1) Controllore, per esempio un PC
- 2) Generatore di segnali
- 3) Amplificatore di potenza
- 4) Accoppiatore direzionale <sup>(a)</sup>
- 5) Strumento di misura <sup>(a)</sup>
- 6) Antenna trasmittente
- 7) Sensore di campo
- 8) Misuratore di campo

(a) L'accoppiatore direzionale e il misuratore di potenza possono essere sostituiti con un rivelatore di potenza diretta o un monitor posto tra l'amplificatore 3) e l'antenna 6).

*Fig. 4.3 – Allestimento di misura*

La taratura del campo nella camera semianecoica deve essere effettuata utilizzando l'allestimento di prova mostrato in figura 4.3.

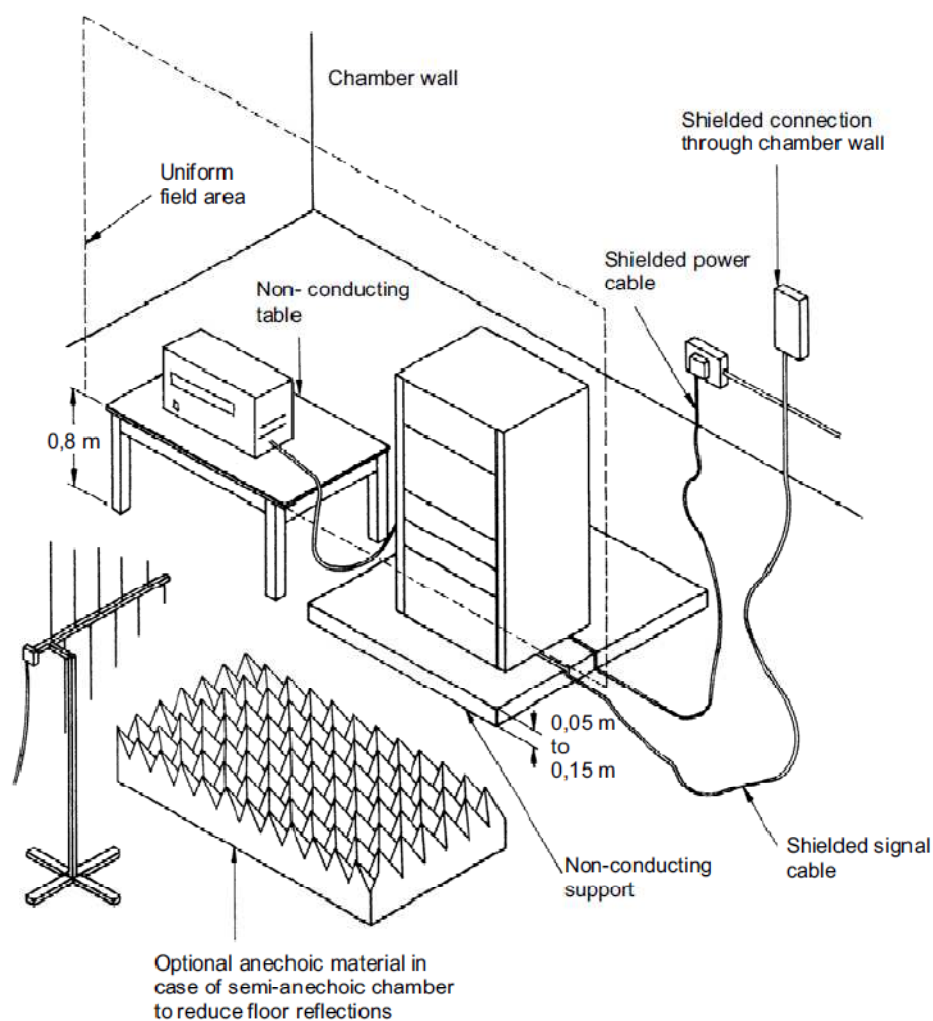


Fig. 4.4 – Allestimento di prova per apparecchiature da pavimento

In figura 4.4 è riportato l'allestimento di prova per apparecchiature da pavimento che verrà utilizzato nel prossimo capitolo per eseguire il test di immunità su un inverter eolico.

### Svolgimento della prova

La prova deve essere svolta in base a un piano di prova che comprenda la verifica delle prestazioni dell'EUT così come definite nella specifica tecnica.

L'EUT deve essere sottoposto a prova in condizioni di funzionamento normali.

Il piano di prova deve includere:

- le dimensioni dell'EUT;

- le condizioni di funzionamento rappresentative dell'EUT;
- se l'EUT deve essere provato come apparecchiatura da tavolo, da pavimento o come una combinazione di entrambe;
- per le apparecchiature da pavimento, l'altezza del supporto;
- le tipologie di impianti di prova da utilizzare e la posizione delle antenne radianti;
- i tipi di antenne da utilizzare;
- la gamma delle frequenze, il tempo di permanenza e i passi di frequenza;
- le dimensioni e la forma dell'area del campo uniforme;
- l'eventuale uso di illuminazione parziale;
- il livello di prova da applicare;
- il tipo(i) e il numero di cavi di interconnessione usati e la porta di interfaccia (dell'EUT) a cui questi devono essere connessi;
- i criteri di prestazioni ritenute accettabili;
- una descrizione del modo in cui l'EUT viene sottoposto a prova.

Prima della prova, il valore dell'intensità di campo tarato deve essere controllato per verificare che l'apparecchiatura/sistema di prova funzioni correttamente.

Una volta verificata la taratura, il campo di prova può essere generato utilizzando i valori ottenuti dalla taratura.

Inizialmente l'EUT viene sistemato con una faccia coincidente con il piano di taratura. La faccia illuminata dell'EUT deve essere contenuta all'interno dell'UFA.

Le gamme di frequenze da considerare sono scandite con il segnale modulato, facendo una pausa per regolare il livello di segnale a radiofrequenza, o per commutare gli oscillatori e le antenne, se necessario. Quando la gamma di frequenze è scandita in modo incrementale, la dimensione del passo non deve superare l'1% del valore della frequenza precedente.

Il tempo di permanenza della portante modulata in ampiezza a ogni frequenza non deve essere inferiore al tempo necessario all'EUT per essere attivato e per essere in grado di rispondere, ma in nessun caso deve essere inferiore a 0,5 s. Le frequenze sensibili (come per esempio le frequenze di clock) devono essere analizzate separatamente, secondo le prescrizioni delle norme di prodotto.

La prova deve essere solitamente eseguita con l'antenna posta di fronte a ogni lato dell'EUT.

Qualora l'apparecchiatura può essere utilizzata con orientamenti diversi (cioè verticale o



orizzontale) la prova deve essere eseguita su tutti i lati. Quando è giustificato tecnicamente,

alcuni EUT possono essere provati esponendo un numero minore di facce all'antenna emittente. Negli altri casi, per esempio in funzione del tipo e della dimensione

La polarizzazione del campo generata da ogni antenna richiede di provare ciascun lato prescelto due volte, una volta con l'antenna posizionata verticalmente e l'altra con l'antenna posizionata orizzontalmente.

Si devono fare tutti i tentativi per far funzionare completamente l'EUT durante le prove, al fine di verificare l'immunità in tutti i modi di funzionamento critici selezionati. Si raccomanda l'uso di programmi di prova speciali.

## **4.2 Caratteristiche di radiodisturbo - Limiti e metodi di misura**

### **4.2.1 Norme di Riferimento**

La procedura di misura dei disturbi irradiati (30MHz ÷ 1000MHz) è conforme a:

CEI EN 55011:2009:03

EN 55011:2007-03; EN 55011/A2:2007-03

Apparecchi a radiofrequenza industriali, scientifici e medicali (ISM) - Caratteristiche di radiodisturbo - Limiti e metodi di misura

*/Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement*

CEI EN 55022: 2009-01

EN 55022:2006-09; EN 55022/A1:2007-10

Apparecchi per la tecnologia dell'informazione - Caratteristiche di radiodisturbo - Limiti e metodi di misura

*/Information technology equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement*

## 4.2.2 Strumentazione utilizzata

Descrizione	Caratteristiche	Marca/Modello
Analizzatore di spettro	Conforme CISPR 16-1-1	Rohde & Schwarz / ESU8
Antenna Bilog	Conforme CISPR 16-1-1	Schaffner / CBL6144

## 4.2.3 Procedura di taratura

### Modalità operative

La prova deve essere allestita in camera anecoica nella quale è già predisposto il sito di prova (tavolo non conduttivo, tavola rotante, supporto mobile per antenna).

L'EUT deve essere sottoposto a prova nelle condizioni operative e climatiche di progetto.

La temperatura e l'umidità relativa devono essere registrate nel rapporto di prova.

### Allestimento della prova

#### Disposizione del sito di prova

Eeguire i collegamenti di Fig. 4.5, mantenendo una distanza di 3m tra il centro dell'antenna e l'EUT Il cavo RF proveniente dall'antenna va collegato all'ingresso del ricevitore EMI attraverso l'apposito connettore passante in camera anecoica.

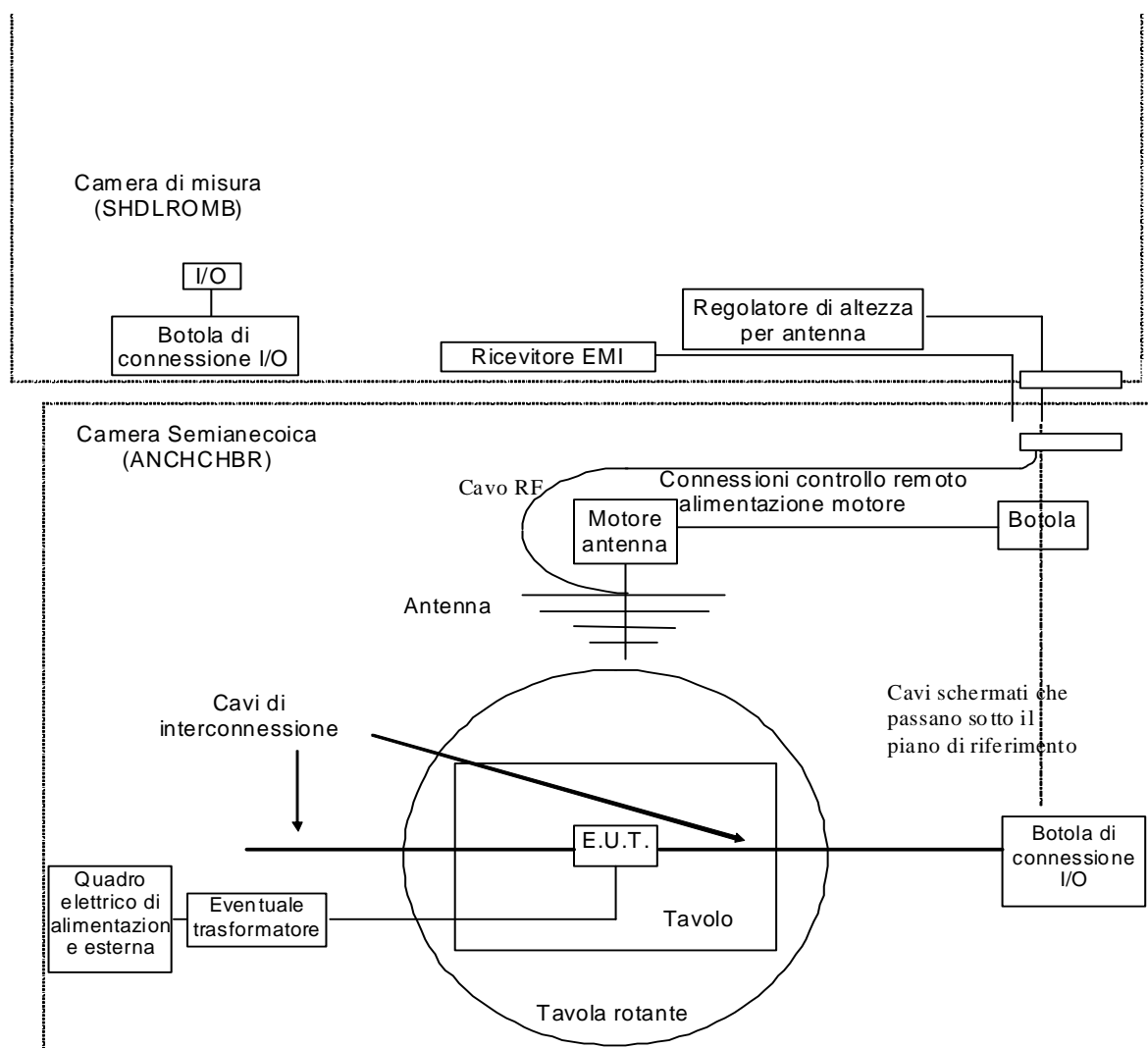


Fig. 4.5

## Predisposizione dell'apparecchiatura

### Configurazione secondo 55011

L'apparecchiatura da testare (EUT) deve avere una configurazione il più vicino possibile alle condizioni di installazione, con cavi e connessioni conformi a quanto dichiarato dal costruttore. Se possibile, va posta al centro del tavolo predisposto in camera anecoica.

I cavi devono essere orientati in modo da massimizzare il livello di disturbo; spesso questo si ottiene disponendoli come riportato in Fig. 4.5.

Usare cavi della lunghezza specificata dal costruttore; se la lunghezza si può modificare, scegliere quella che produce la massima emissione. Qualora non fosse specificata, impiegare cavi di almeno 2,5m.

Il cavo di alimentazione va direttamente alla presa posta al centro della tavola rotante. Qualora fosse necessario può essere derivato dal quadro elettrico posizionato nell'angolo della camera anecoica.

Le connessioni di terra devono essere conformi a quanto dichiarato dal costruttore.

Se per ottenere la conformità si utilizzano cavi schermati o speciali, si deve specificare l'uso di tali cavi nel manuale di istruzioni.

Qualora l'EUT debba interfacciarsi con un AE (apparecchiatura ausiliaria), l'AE andrebbe posizionato fuori dalla camera anecoica (in camera schermata di controllo o in laboratorio EMC) e collegato mediante la botola di connessione situata in camera schermata o mediante l'uscita cavi situata nell'angolo della camera anecoica.

Qualora il dispositivo sia da pavimento oppure troppo grande per essere posizionato sul tavolo, può essere posto ad una altezza di 0,1m circa dal piano di terra avendo cura di riportare tale fatto nel Rapporto di prova.

Se un apparecchio può effettuare un gruppo di funzioni, deve essere provato durante l'esecuzione di ciascuna di queste funzioni e la misura deve essere effettuata almeno durante l'esecuzione della funzione che produce il massimo disturbo.

## **Configurazione secondo 55022**

### ***Allestimento da tavolo***

Se l'apparecchio è da pavimento va posto direttamente sul piano di massa metallico.

Se è progettato per funzionare a parete deve essere provato come EUT da tavolo.

Gli apparecchi destinati all'uso da tavolo devono essere posti come in Fig. 4.6.

In particolare:

1. i cavi che pendono a meno di 40cm dal piano di massa sono raccolti in matasse di lunghezza 30-40cm
2. l'estremità dei cavi I/O non collegate a AE possono essere terminate usando la corretta impedenza
3. il cavo di alimentazione è connesso direttamente alla tavola rotante
4. i cavi per i dispositivi utilizzati a mano (mouse, tastiera, ...) sono posizionati come nell'uso normale

5. le periferiche devono essere poste a una distanza di 10 cm l'una dall'altra e dal controllore eccetto per il monitor che, se previsto, può essere posto sopra il controllore.
6. i cavi di alimentazione e connessione alle AE devono pendere liberi fino al pavimento e venire disaccoppiati tramite pinze o tubi di ferrite (perdita di inserzione >15 dB tra 30 e 1000 MHz) nel punto in cui raggiungono il suolo.

Possono essere utilizzate:

- *absorbing clamp* (ABSCLP01)
- *EM clamp* non terminata a 50 ohm (CDN\_EM01)
- elementi costituiti da ferriti (minimo 6).

Non più di un cavo per pinza.

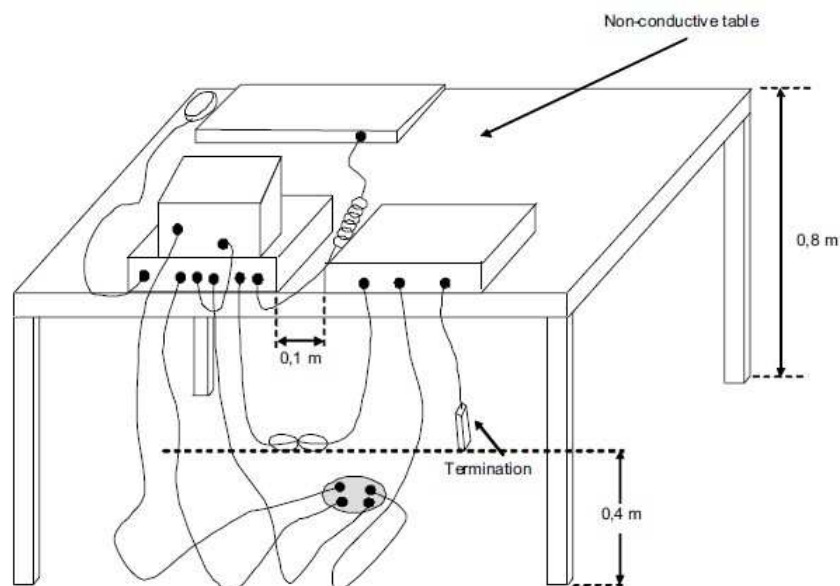


Fig. 4.6

Tutti i gruppi di risultati devono essere accompagnati da una descrizione completa dell'orientamento dei cavi in modo da poter ripetere i risultati.

### ***Allestimento da pavimento***

Se l'apparecchio è da pavimento va posto direttamente sul piano di massa metallico.

Se è progettato per funzionare a parete deve essere provato come EUT da tavolo.

## **Predisposizione dell'apparecchiatura**

### ***Allestimento della strumentazione di misura***

Le misure devono essere eseguite con un ricevitore di misura con rivelatore di quasi-picco nella gamma di frequenze da 30 MHz a 1000 MHz.

Per ridurre il tempo di prova, si può usare un ricevitore con rivelatore di picco, anziché un ricevitore con rivelatore di quasi-picco. In caso di contestazione, prevalgono le misure eseguite mediante un ricevitore con rivelatore di quasi-picco.

### **Esecuzione della misura**

I ricevitori con rivelatori di quasi-picco devono essere conformi alla CISPR 16-1-1.

I ricevitori con rivelatori di picco devono avere una larghezza di banda di 6 dB, conformemente alla CISPR 16-1-1.

L' antenna deve essere un dipolo accordato. Per frequenze di 80 MHz e superiori, la lunghezza dell' antenna deve essere regolata alla corrispondente frequenza di risonanza, mentre per frequenze inferiori a 80 MHz la lunghezza dell' antenna deve essere regolata uguale a quella della frequenza di risonanza di 80 MHz.

In alternativa si può usare un' antenna Bilog in quanto i risultati sono correlati, con un grado di accuratezza accettabile, a quelli di un' antenna a dipolo accordato.

L' antenna deve essere variata in altezza tra 1 m e 4 m sopra il piano di massa, per ricercare il disturbo massimo per ogni frequenza di prova.

Anche l' azimut dell' antenna rispetto all' EUT deve essere variato durante le misure per trovare le indicazioni dell' intensità di campo massima. Per facilitare la misura, si può ruotare l' EUT. Se ciò non è possibile, l' EUT rimane fisso e le misure vengono eseguite attorno a esso.

Durante la misura la polarizzazione dell' antenna (orizzontale e verticale) rispetto all' EUT deve essere variata per trovare l' indicazione massima di intensità di campo.



## Capitolo 5

# RAPPORTO DI PROVA PER UN INVERTER EOLICO

In quest'ultima parte della trattazione, nonostante non ci sia l'accreditamento della camera semianecoica, si sono fatti dei test *pre-compliance* su un inverter eolico di un cliente. Si è allestito il banco di prova e successivamente si sono compiuti i test e valutato i risultati ottenuti.

### 5.1 Condizioni operative e set up di prova

#### EUT: condizioni operative e set up di prova

**Campione n°01: TN420 6,5KW, 10 A**

<b>Model</b>	<b>N° Phases</b>	<b>Nominal VAC (V)</b>	<b>Nominal AC Power (KW)</b>	<b>I Max</b>
TN 420	3 + PE	400	6,5	10 A

Descrizione: Inverter eolico  
Modello: TN 420  
Tensione Nominale: 400Vac @ 50 Hz  
Release Software: TN07-\$118-Rev2



## Equipaggiamento ausiliario

### Campione n°02

Quadro motore:

Alimentazione: 400Vac 3ph

### Campione n°03

Banco sorgente composto da:

Motore Brushless servomotor Br series

Type:	096XXX
S/N:	42179/01
Power	11,78 kW
Vn:	399V
In:	18A
Speed:	750 rpm

Generatore: Brushless servomotor Br series

Type:	094XXX
S/N:	43151/10
Power	8,42 kW
Vn:	376V
In:	13A
Speed:	750 rpm

### Campione n°04

Quadro Navicella:

Elenco segnali di input output al quadro in test

- DI 1x - anemometro: contatti lasciati aperti : segnale non utilizzato
- AI 1x - banderuola: 2,5 V
- DI 3x – posizione pitch: la posizione del pitch può essere solo una, pertanto per effettuare i test uno dei digital (numero 8) input è stato terminato a 24V e gli altri due (6 e 7) sono stati lasciati aperti
- AI 2x – sensore di vibrazione: è stato fornito un doppio segnale 2,5V

- DI 2x – impulsi imbardata: i segnali sono stati terminati a 24V nel quadro navicella
- DI 2x – sensori numero di giri: i segnali sono stati terminati a 24V nel quadro navicella
- AI 1x – sensore di temperatura generatore termo resistivo: è stata installata una resistenza da 500Ohm nel quadro navicella
- DO 4x – abilitazione, direzione,: sono stati lasciati aperti

**Setup di prova e verifiche funzionali durante i test di immunità:**

Durante l’esecuzione delle prove la sorgente è stata simulata tramite il campione n°03 in cui il generatore viene azionato meccanicamente tramite il motore alimentato dal campione n°02.

Durante i test di immunità la classe di prestazione è stata verificata monitorando i parametri d’uscita dell’inverter dall’apposito software SAIA PG5 SP1.4.300 fornito dal cliente nonché verificando il corretto funzionamento del display e dei tasti funzione.

Per il funzionamento a potenza ridotta ai valori 33%, 66% come richiesti dal cliente sono stati impostati via software la velocità del generatore (rpm) e la coppia in percentuale:

Potenza (kW)	Potenza (%)	Velocità del rotore (rpm)	Velocità del generatore	Coppia
6,5	100	62	700	82
4,3	66	53	617	56
1,4\	33	40	466	30



*Fig. 5.1 – Foto frontale dell'EUT*



Fig.5.2 - Vista interna 1



Fig.5.3 - Vista interna 2



*Fig. 5.4 – Vista interna 3*

### **Campione n°05**

Il campione 05 è uguale al campione 01 con le seguenti modifiche:

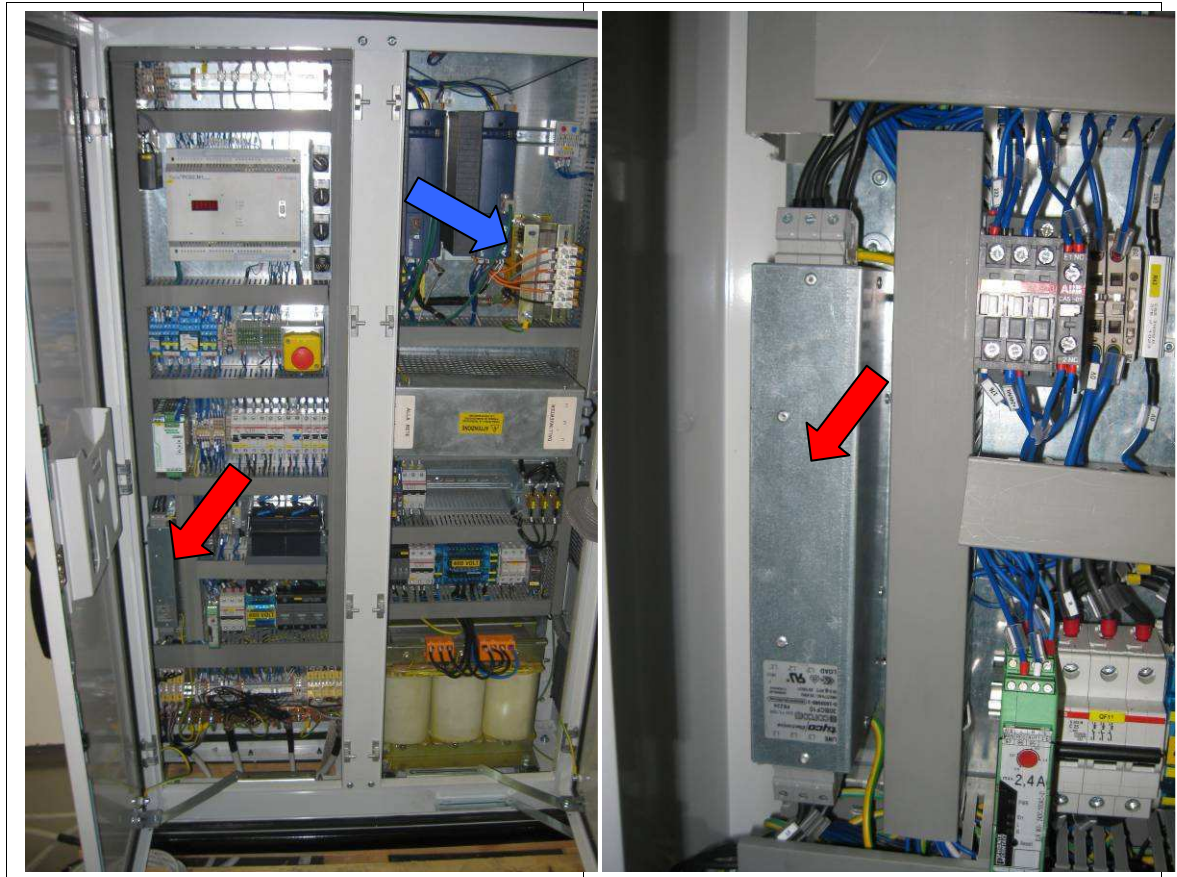


Fig. 5.5 – Campione 05

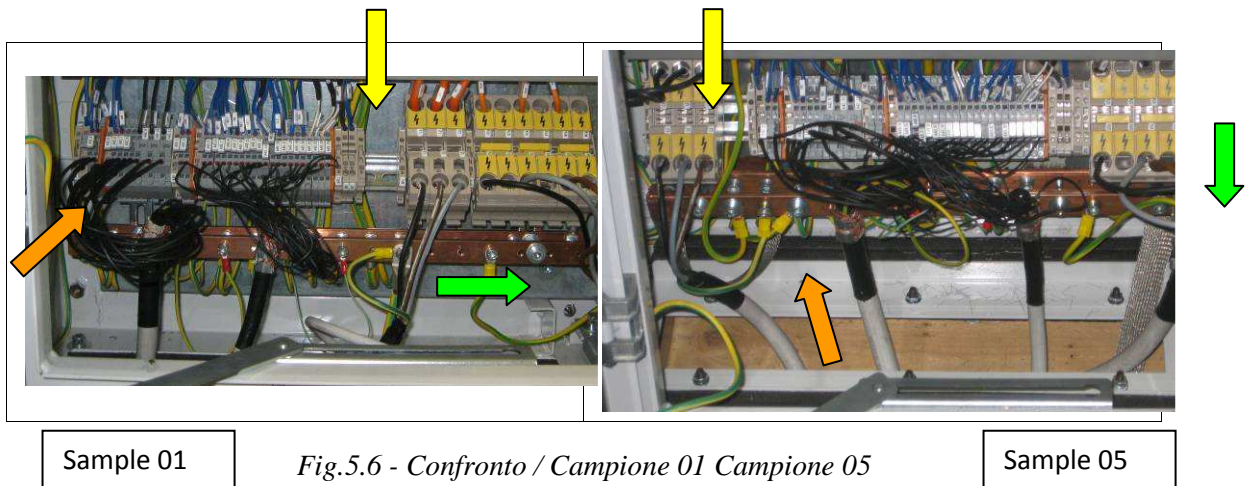
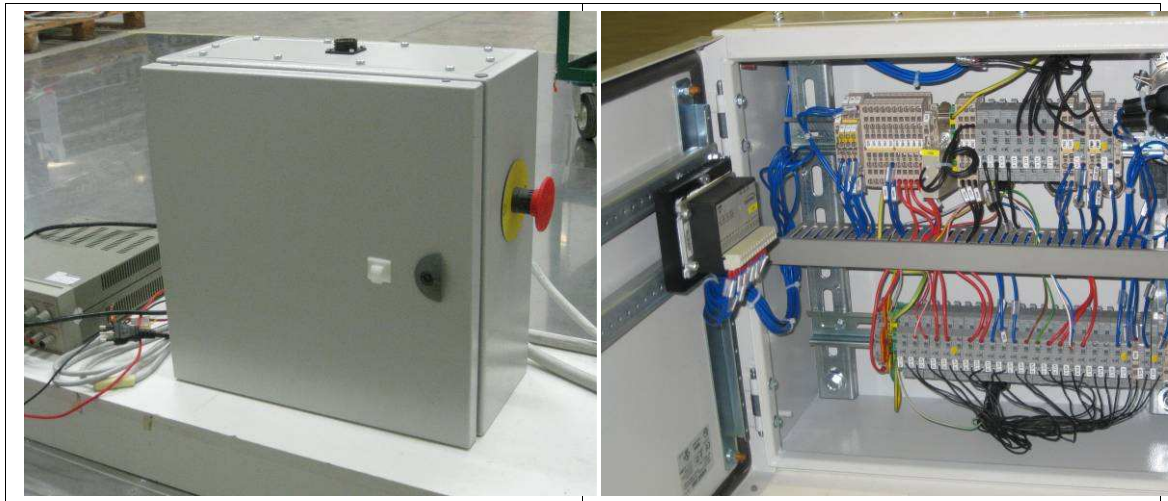


Fig.5.6 - Confronto / Campione 01 Campione 05

- 1) lato uscita: spostati a sinistra cavi rete (freccie gialle)
- 2) calza cavo generatore connessa alla barra equipotenziale (freccie verdi)
- 3) cavo generatore schermato e schermo connesso a PE da entrambi i lati
- 4) Ricavato spazio per filtro EMI e installato filtro EMI TYCO mod: 30BCF10
- 5) K54 è stato abbassato e sono stati spostati a sinistra F2 e A2 (protezione interfaccia e fusibili protezione)  
QF48 è stato alzato (magnetotermico delle batterie)
- 6) Le porte dell'armadio sono state sostituite con le porte del sample 01
- 7) E' stato cambiato l'induttore in ingresso dell'inverter: stesso valore di induttanza, stessa portata di corrente, ma nucleo diverso e fornitore diverso (freccia blu)

#### ID Ausiliari



*Fig.5.7 – AE: Quadro Navicella*



*Fig. 5.8 – AE: Simulatore sorgente*



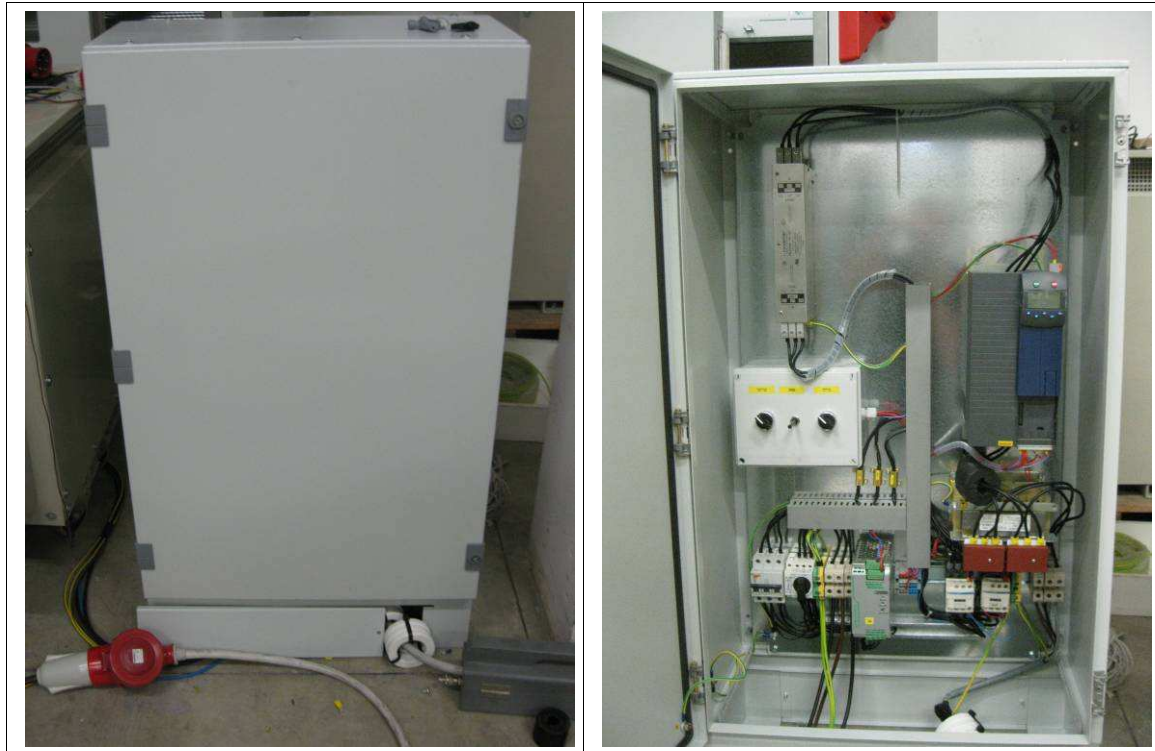


Fig. 5.9 - AE: Quadro motore

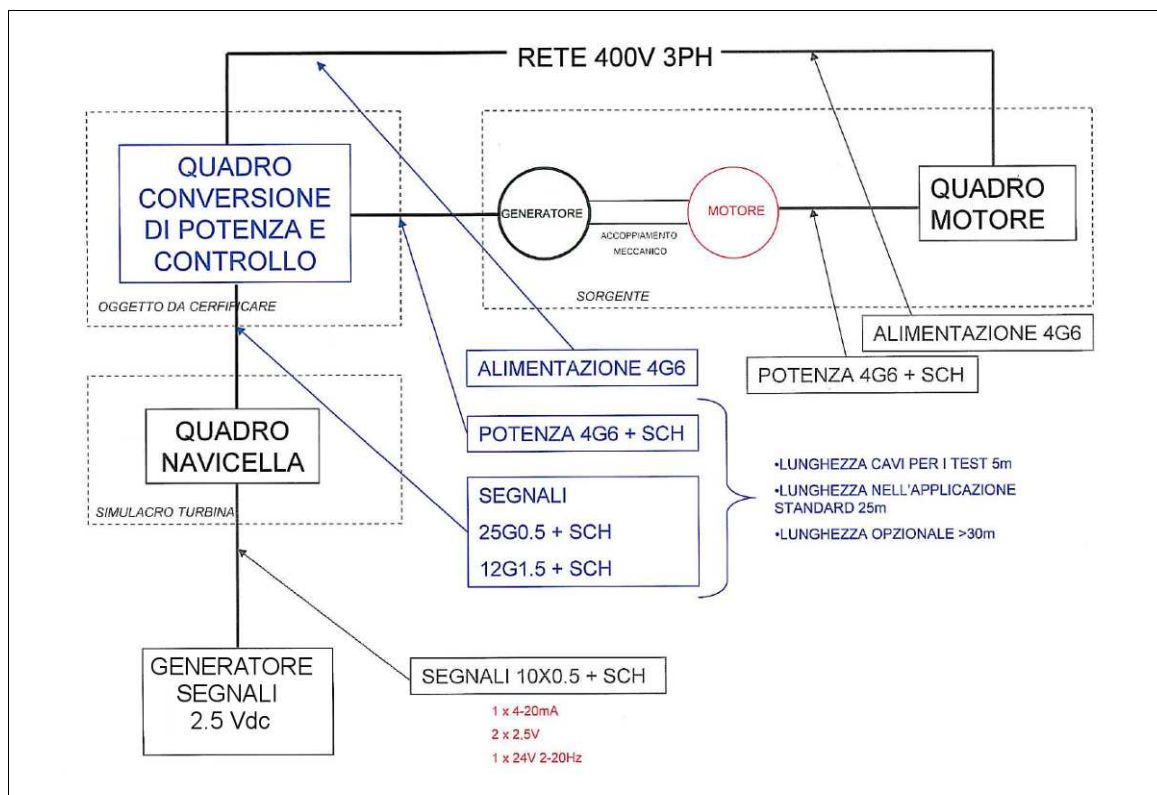


Fig.5. 10 - Schema Setup di prova

## Modifiche

Inserimento del filtro EMI TYCO mod: 30BCF10 (Vedere Fig. 5.5)

Il filtro di rete è stato inserito per evitare disturbi irradiati dal cavo di alimentazione

Disturbi irradiati (30MHz – 1000MHz)

Norme di riferimento

CEI EN 61000-6-3:2007-11

EN 61000-6-3:2007-01

IEC 61000-6-3:2006-07

Compatibilità elettromagnetica (EMC)

Parte 6-3: Norme generiche - Emissione per gli ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera

## Strumentazione utilizzata

Strumenti ed attrezzature	Modello	Codice Interno
Ricevitore EMI con preselettore	ROHDE & SCHWARZ / ESU8	EMIRCV02
	ROHDE & SCHWARZ / ESCI	EMIRCV03
Antenna bi logaritmica	Schaffner CBL6144	ANTBLG02

## 5.2 Sequenza dei test e risultati

<b>Procedura di test</b>		LPADIR00
Procedura e allestimento della prova conformi alla normativa CEI EN 55011		
Taratura del campo	Area di campo uniforme	Distanza antenna – EUT
Proc. LCADIR00	2m x 2m	3m

<b>Incertezza di misura</b>	f<200MHz: 5dB 200MHz<f<1GHz: 4,2dB
L'incertezza di misura dichiarata è espressa come due volte lo scarto tipo, corrispondente ad un livello di confidenza di circa il 95%	

<b>Luogo di prova</b>	Laboratorio immunità				
CONDIZIONI AMBIENTALI					
Temperatura	25	°C	Umidità relative	46.1	%

### 5.2.1 Prova di emissione e risultati – Disturbi irradiati (30MHz – 1000MHz)

Con riferimento alla norma CISPR 22 l'apparecchio viene considerato di Classe B.

#### Grafici delle misure – Disturbi irradiati

Vengono effettuate le misure con l'antenna in polarizzazione orizzontale e in polarizzazione verticale. Si riportano di seguito i risultati.

**Polarizzazione orizzontale frontale:**



**INVERTER EOLICO**

**Meas Type** Disturbi irradiati  
**Equipment under Test** INVERTER  
**Manufacturer**  
**OP Condition** Orizzontale Ogradi  
**Operator** PA  
**Test Spec**  
 MAX POWER

**Time Domain Scan (1 Range)**

Scan Start: 30 MHz  
 Scan Stop: 1 GHz  
 Detector: Trace 1: MAX PEAK  
 Transducer: 6-3-ORI2

Start Frequency	Stop Frequency	Step Size	Res BW	Meas Time	RF Atten	Preamp Input
30.000000 MHz	1.000000 GHz	30.00 kHz	120.00 kHz	100 $\mu$ s	0 dB	INPUT1

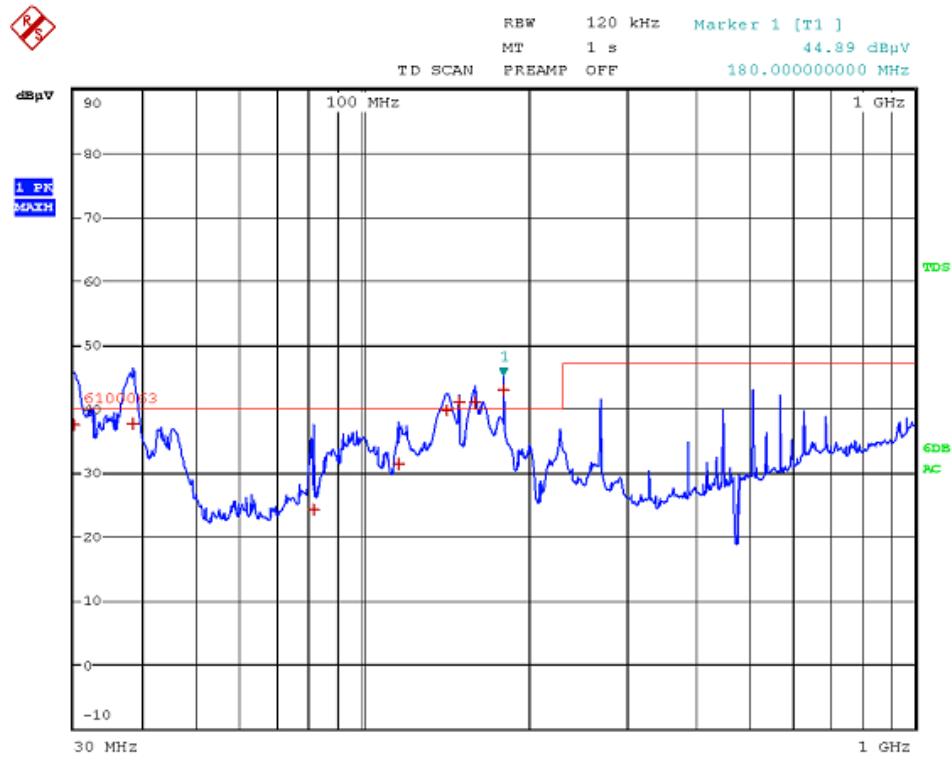


Fig. 5.11 – Disturbi irradiati in polarizzazione orizzontale

### **Final Measurement**

Meas Time: 1 s  
 Margin: 3 dB  
 Peaks: 8

Trace	Frequency	Level (dB $\mu$ V)	Detector	Delta Limit/dB
1	30.000000000 MHz	37.38	Quasi Peak	-2.62
1	38.280000000 MHz	37.67	Quasi Peak	-2.33
1	81.360000000 MHz	24.06	Quasi Peak	-15.94
1	116.310000000 MHz	31.18	Quasi Peak	-8.82
1	141.900000000 MHz	39.64	Quasi Peak	-0.36
1	150.000000000 MHz	40.91	Quasi Peak	0.91
1	159.990000000 MHz	40.99	Quasi Peak	0.99
1	180.000000000 MHz	42.86	Quasi Peak	2.86

In figura 5.11 e 5.12 si vede rispettivamente la misura dei disturbi irradiati in polarizzazione orizzontale e verticale nel range 30M-1GHz. Entrambe le prove sono state eseguite con il rivelatore di picco. Nei punti critici invece è stato utilizzato il rivelatore di quasi picco.



## **Final Measurement**

Meas Time: 1 s  
 Margin: 3 dB  
 Peaks: 16

Trace	Frequency	Level (dBμV)	Detector	Delta Limit/dB
1	30.420000000 MHz	55.98	Quasi Peak	15.98
1	38.580000000 MHz	57.05	Quasi Peak	17.05
1	43.710000000 MHz	43.96	Quasi Peak	3.96
1	45.180000000 MHz	47.05	Quasi Peak	7.05
1	85.470000000 MHz	35.80	Quasi Peak	-4.20
1	91.290000000 MHz	36.74	Quasi Peak	-3.26
1	92.100000000 MHz	38.55	Quasi Peak	-1.45
1	92.910000000 MHz	36.28	Quasi Peak	-3.72
1	96.000000000 MHz	37.67	Quasi Peak	-2.33
1	100.560000000 MHz	34.99	Quasi Peak	-5.01
1	101.520000000 MHz	35.82	Quasi Peak	-4.18
1	119.910000000 MHz	34.95	Quasi Peak	-5.05
1	144.030000000 MHz	40.85	Quasi Peak	0.85
1	180.000000000 MHz	45.76	Quasi Peak	5.76
1	196.620000000 MHz	35.52	Quasi Peak	-4.48
1	510.000000000 MHz	49.68	Quasi Peak	2.68

## **Analisi risultati**

**Esito finale della prova**

**NON SUPERATA**

Si vede chiaramente la non conformità del prodotto. In merito si è pensato inizialmente di schermare l'intero armadio mettendo lateralmente delle maglie conduttrici per chiudere tutto l'armadio. L'armadio è di metallo rivestito di vernice per cui è stato necessario rimuovere la vernice superficiale per permettere il contatto della maglia conduttrice con il case metallico.

Purtroppo nel lato sottostante non era possibile eseguire la schermatura per la struttura dell'armadio. Con la schermatura parziale sono migliorate le emissioni solo nel range di frequenze intermedie.

Sono state effettuate varie prove spegnendo singolarmente dei componenti e poi vedendo quanto irradiava l'EUT. Si è notato che spegnendo i due inverter si riduceva moltissimo l'emissione irradiata: è stata quindi fatta una prova sperimentale coprendo i due inverter con della stagnola notando come l'emissione diminuisse notevolmente e rientrasse nei limiti.

Si è consigliato al cliente di realizzare uno schermo metallico fisso che schermasse i due inverter e facesse rientrare nei limiti previsti dalla norma l'intero dispositivo.

## 5.2.2 Test di immunità e risultati – Campi irradiati a radiofrequenza da 80MHz a 2700MHz

Norme di riferimento

CEI EN 61000-4-3:2007-04 + CEI EN 61000-4-3/A1:2009-01

EN 61000-4-3:2006-05 + EN 61000-4-3/A1:2008-02

IEC 61000-4-3:2006-02 + IEC 61000-4-3/A1:2007-11

Compatibilità elettromagnetica (EMC)

Parte 4-3: Tecniche di prova e di misura - Prova d'immunità ai campi elettromagnetici a radiofrequenza irradiati

<b>STRUMENTAZIONE UTILIZZATA</b>		
Strumenti ed attrezzature	Modello	Codice Interno
Camera anecoica	Eurotest	ANCHCHBR
Generatore di segnali RF	Farnell PSG1000B	GNRRF001
Generatore di segnali RF <sub>r</sub>	Hewlett Packard 8648B	GNRRF002
Generatore di segnali RF	Hewlett Packard 8648C	GNRRF004
Generatore di forme d'onda	Hewlett Packard 33120A	FNCGNR01
Amplificatore RF	Eurotest IDO2004	AMPLRF07
Amplificatore RF	Kalmus 116FC-CE	AMPLRF03
Amplificatore RF	Frankonia FLG-30C	AMPLRF08



<b>STRUMENTAZIONE UTILIZZATA</b>		
Strumenti ed attrezzature	Modello	Codice Interno
Antenna bi logaritmica	Schaffner CBL6144	ANTBLG02
Software di test	Eurotest	CEA.vxe
Attenuatore da 6dB	JFW 50FH-006-100	ATTN0608
Misuratore di potenza	Hewlett Packard 438A	PWRMTR01
Sensore di potenza	Hewlett Packard 8482A	PWRSNS02
Limitatore di impulsi	Hewlett Packard 11867A	TRNLMT02
Accoppiatore direzionale	Maury Microwave 4098A	DIRCPL01
Accoppiatore direzionale	Narda 4242-20	DIRCPL02

<b>Procedura di test</b>		LPACEA00
Procedura e allestimento della prova conformi alla normativa CEI EN 61000-4-3		
Taratura del campo	Area di campo uniforme	Distanza antenna – EUT
Proc. LCACEA00	1,5m x 1,5m	3m

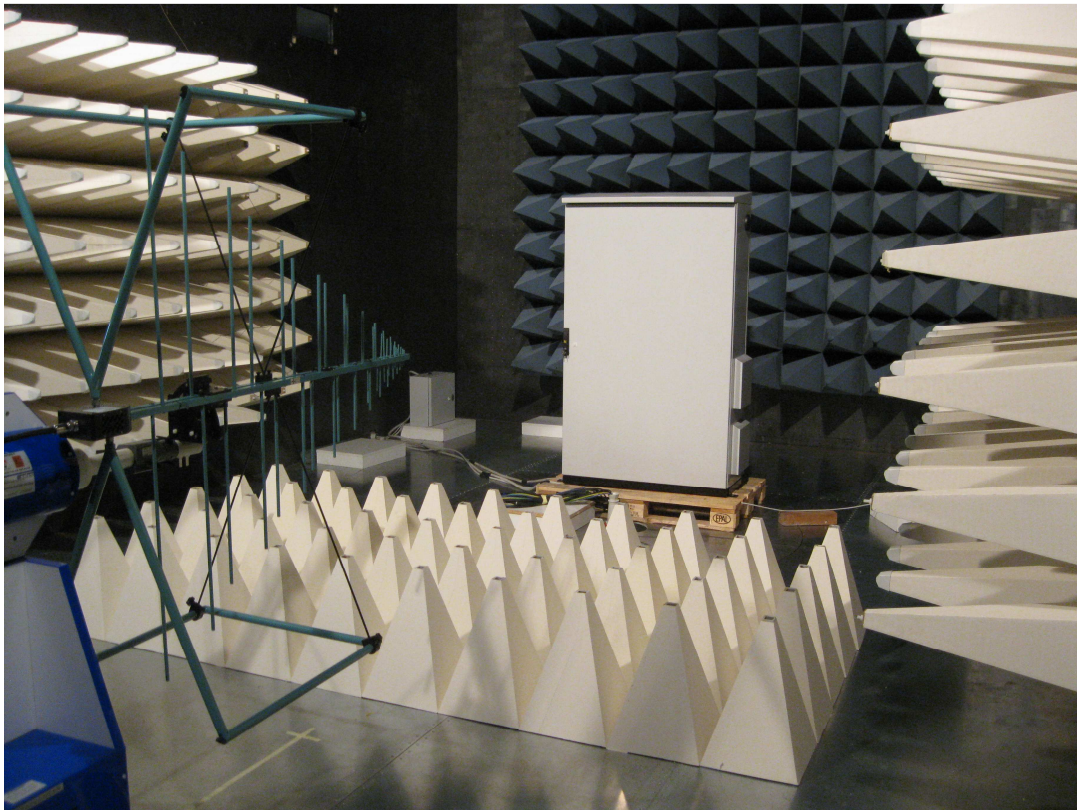
<b>Incerteza di misura</b>	80<f<100MHz: 2,7 dB 0,1<f<1GHz: 3,2 dB 1<f<2,7GHz: 3,8 dB
L'incerteza di misura dichiarata è espressa come due volte lo scarto tipo, corrispondente ad un livello di confidenza di circa il 95%	

<b>Luogo di prova</b>	Camera anecoica			
<b>CONDIZIONI AMBIENTALI /ENVIRONMENTAL CONDITIONS</b>				
Temperatura	25	°C	Umidità relative	43,1 %

### **Set up: prova di immunità**

Si adopera l'esatta posizione dell'antenna emittente, dei cavi e dei conii utilizzata per la taratura del campo(paragrafo 4.1), poiché anche spostamenti minimi possono influenzare il campo in modo significativo.

In figura 5.12 si vede il set up utilizzato per la prova di immunità ai campi irradiati a radiofrequenza.



*Fig. 5.12 – Set up per la prova di immunità*

### **Criteria di prestazione per la prova di immunità**

- A. L'apparecchiatura deve continuare a funzionare come previsto durante e dopo la prova. Non è permessa alcuna degradazione di prestazione o perdita di funzione al di sotto di un livello di prestazione specificato dal costruttore, quando l'apparecchiatura viene utilizzata come previsto. Il livello di prestazione può essere sostituito da un'accettabile perdita di prestazione. Se il livello minimo di prestazione o l'accettabile perdita di prestazione non è specificata dal costruttore, ognuno di questi due elementi può essere dedotto dalla descrizione e dalla documentazione del prodotto, e da quanto l'utilizzatore può ragionevolmente aspettarsi dall'apparecchiatura, se questa viene utilizzata come previsto.
- B. L'apparecchiatura deve continuare a funzionare come previsto dopo la prova. Non è permessa alcuna degradazione di prestazione o perdita di funzione al di sotto di un livello di prestazione specificato dal costruttore, quando l'apparecchiatura viene utilizzata come previsto. Il livello di prestazione può essere sostituito da un'accettabile perdita di prestazione. Durante la prova, tuttavia, è permessa una degradazione della prestazione. Non è permessa alcuna modifica dello stato di funzionamento in atto o dei dati immagazzinati. Se il livello minimo di prestazione o l'accettabile perdita di prestazione non è specificata dal costruttore, ognuno di questi due elementi può essere dedotto dalla descrizione e dalla documentazione del prodotto e da quanto l'utilizzatore può ragionevolmente aspettarsi dall'apparecchiatura, se questa viene utilizzata come previsto.
- C. È permessa una temporanea perdita di funzione, purché la funzione sia ripristinabile autonomamente o tramite l'azionamento dei dispositivi di comando.

## Risultati – Campi irradiati a radiofrequenza

Il livello di prova specificato è il valore efficace della portante non modulata.

Da 80MHz a 2700MHz la portante è modulata in ampiezza all'80% con un'onda sinusoidale a 1kHz.

80MHz ÷ 1GHz

Intensità di campo <sup>1</sup>	Tempo di permanenza	Polarizzazione antenna	Lato EUT	Prestazioni rilevate	Criterio imposto dalla norma
3 V/m	1s	Orizzontale	Fronte	A	A
3 V/m	1s	Orizzontale	Sinistro	A	A
3 V/m	1s	Orizzontale	Destro	A	A
3 V/m	1s	Orizzontale	Retro	A	A
3 V/m	1s	Verticale	Fronte	A	A
3 V/m	1s	Verticale	Sinistro	A	A
3 V/m	1s	Verticale	Destro	A	A
3 V/m	1s	Verticale	Retro	A	A

1 - Ad eccezione delle bande di frequenza di radiodiffusione ITU da 87MHz a 108MHz, da 174MHz a 230MHz e da 470MHz a 790MHz, in cui il livello deve essere 3V/m.

1,4GHz ÷ 2GHz

Intensità di campo	Tempo di permanenza	Polarizzazione antenna	Lato EUT	Prestazioni rilevate	Criterio imposto dalla norma
3 V/m	1 s	Orizzontale	Fronte	A	A
3 V/m	1 s	Orizzontale	Sinistro	A	A
3 V/m	1 s	Orizzontale	Destro	A	A
3 V/m	1 s	Orizzontale	Retro	A	A
3 V/m	1 s	Verticale	Fronte	A	A
3 V/m	1 s	Verticale	Sinistro	A	A
3 V/m	1 s	Verticale	Destro	A	A
3 V/m	1 s	Verticale	Retro	A	A

2GHz ÷ 2,7GHz

Intensità di campo	Tempo di permanenza	Polarizzazione antenna	Lato EUT	Prestazioni rilevate	Criterio imposto dalla norma
1 V/m	1 s	Orizzontale	Fronte	A	A
1 V/m	1 s	Orizzontale	Sinistro	A	A
1 V/m	1 s	Orizzontale	Destro	A	A
1 V/m	1 s	Orizzontale	Retro	A	A
1 V/m	1 s	Verticale	Fronte	A	A
1 V/m	1 s	Verticale	Sinistro	A	A
1 V/m	1 s	Verticale	Destro	A	A
1 V/m	1 s	Verticale	Retro	A	A

**Esito finale della prova**

**SUPERATA**

Il dispositivo ha continuato a funzionare e non ha presentato nessuna perdita di funzione in tutti i test eseguiti. Pertanto la prova di immunità risulta superata.



## Allegato A

### Scheda di studio incertezza di misura:

Strumento:	Ricevitore EMI
Costruttore:	ROHDE & SCHWARZ
Modello:	ESU8
Serial number:	100028
Tipo di taratura:	esterna Rohde&Schwarz
Attività:	La presente scheda viene redatta per fornire una stima dell'incertezza estesa dello strumento, quando utilizzato eseguendo una misura singola
Grandezza in esame:	segnali sinusoidali La presente stima si applica quando il segnale viene generato dal Tracking dello strumento, o da generatore di segnale con prestazioni analoghe, e solo per segnali sinusoidali.
Stima:	La stima viene effettuata tramite misura singola.
Correlazioni:	Le grandezze di input si possono ritenere non correlate

### Misura di differenza con tracking

<b>Frequenze:</b>	intero		<b>Unità di misura:</b>	dB		
Grandezze di input	Incertezza tipo [u(xi)]	Distribuzione di probabilità /fattore di copertura		Coefficiente di sensibilità	Contributo d'incertezza [u(yi)]	Varianza
Incertezza trk	0,07	normale	2	1	0,035	0,001225
Incertezza ch	0,07	normale	2	2	0,07	0,0049
incertezza composta						0,0782624
	<b>Incertezza estesa K=</b>		2			<b>0,15652</b>

### Misura di frequenza

<b>Frequenze:</b>	intero		<b>Unità di misura:</b>	Hz		
Grandezze di input	Incertezza tipo [u(xi)]	Distribuzione di probabilità /fattore di copertura		Coefficiente di sensibilità	Contributo d'incertezza [u(yi)]	Varianza
Incertezza estesa	0,01	K=2	2	2	0,01	0,0001
Criterio accettazione	1	rettangolare	1,73	1	0,5780347	0,3341241
incertezza composta						0,5781212
	<b>Incertezza estesa K=</b>		2			<b>1,1562</b>



**Segnali sinusoidali****Frequenze:** 0,15-30MHz**Unità di misura:** dB

Grandezze di input	Incertezza tipo [u(xi)]	Distribuzione di probabilità /fattore di copertura		Coefficiente di sensibilità	Contributo d'incertezza [u(yi)]	Varianza
Incertezza level	0,07	normale	2	1	0,035	0,001225
incertezza freq	0,06	normale	2	1	0,03	0,0009
crit acc level	0,5	rettangolare	1,73	1	0,2890173	0,083531
crit acc freq	0,6	rettangolare	1,73	1	0,3468208	0,1202847
incertezza composta						0,4538069
<b>Valutazione distr. prob. u(y) [normale/rettangolare] :</b>					0,1211	rettangolare
<b>Incertezza estesa K=</b>		1,65				<b>0,74878</b>

**Frequenze:** 30-1000MHz**Unità di misura:** dB

Grandezze di input	Incertezza tipo [u(xi)]	Distribuzione di probabilità /fattore di copertura		Coefficiente di sensibilità	Contributo d'incertezza [u(yi)]	Varianza
Incertezza level	0,07	normale	2	1	0,035	0,001225
incertezza freq	0,06	normale	2	1	0,03	0,0009
crit acc level	0,3	rettangolare	1,73	1	0,1734104	0,0300712
crit acc freq	0,6	rettangolare	1,73	1	0,3468208	0,1202847
incertezza composta						0,390488
<b>Valutazione distr. prob. u(y) [normale/rettangolare] :</b>					0,2018333	rettangolare
<b>Incertezza estesa K=</b>		1,65				<b>0,64431</b>

**Risposta del rilevatore di quasi picco al segnale impulsivo****Frequenze:** all range**Unità di misura:** dB

Grandezze di input	Incertezza tipo [u(xi)]	Distribuzione di probabilità /fattore di copertura		Coefficiente di sensibilità	Contributo d'incertezza [u(yi)]	Varianza
Incertezza estesa	0,15	K=2	2	1	0,075	0,005625
deviazione di taratura	1	rettangolare	1,73	1	0,5780347	0,3341241
incertezza composta						0,58288
<b>Valutazione distr. prob. u(y) [normale/rettangolare] :</b>					0,12975	rettangolare
<b>Incertezza estesa K=</b>		1,65				<b>0,96175</b>

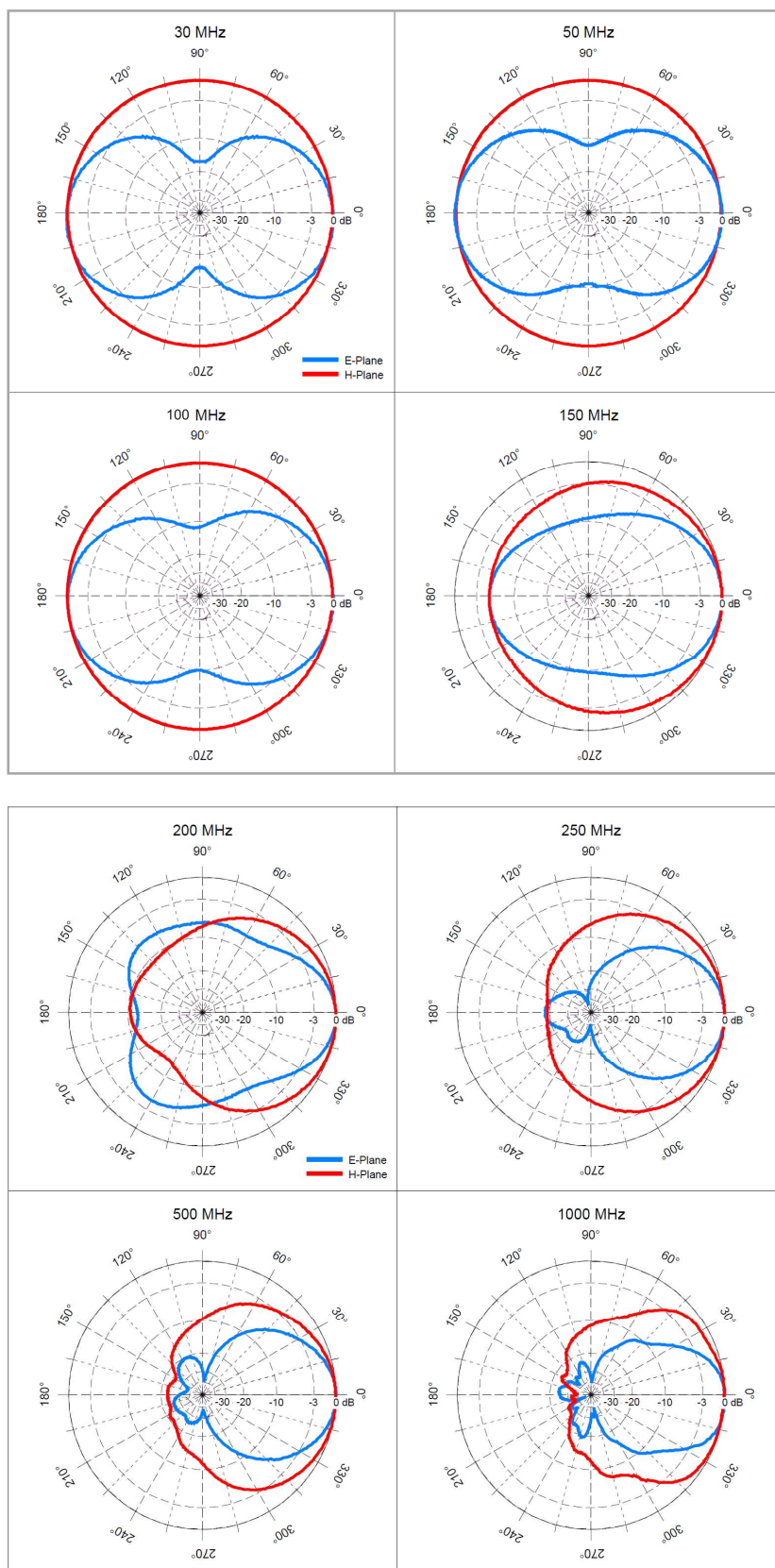
**Risposta del rilevatore di quasi picco in funzione della ripetizione degli impulsi****Frequenze:** all range**Unità di misura:** dB

Grandezze di input	Incertezza tipo [u(xi)]	Distribuzione di probabilità /fattore di copertura		Coefficiente di sensibilità	Contributo d'incertezza [u(yi)]	Varianza
Incertezza estesa	0,15	K=2	2	1	0,075	0,005625
deviazione di taratura	1	rettangolare	1,73	1	0,5780347	0,3341241
incertezza composta						0,58288
<b>Valutazione distr. prob. u(y) [normale/rettangolare] :</b>					0,12975	rettangolare
<b>Incertezza estesa K=</b>		1,65				<b>0,96175</b>

Si noti che l'incertezza estesa va riportata nell'unità di misura della grandezza misurata, con 2 cifre decimali.

## Allegato B

### Diagrammi di radiazione dell'antenna trasmittente





# Bibliografia

LAB 34 Edition 1: The Expression of Uncertainty in EMC Testing - UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE (UKAS) (2002).

R.P. Clayton, *Compatibilità elettromagnetica*, Hoepli, Milano (2008).

H.H. Hemming, *Electromagnetic Anechoic Chambers. A fundamental Design and Specification Guide*, John Wiley, UK (2002).

R. Morrison, *Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation*, John Wiley, New York (1976).

Publication Reference EA-4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration – European co-operation for Accreditation (EA).

SINAL DT-0002/6 : Guida al calcolo della ripetibilità di un metodo di prova ed alla sua verifica nel tempo.

Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML.

ENGINEERING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY: Principles, Measurement, Technologies, and Computer Models – V. Prasad Kodali – IEEE PRESS.

Electromagnetic Waves & Antennas – S. J. Orfanidis.

COMPATIBILITÀ ELETTRROMAGNETICA – Clayton R. Paul – HOEPLI.

CISPR 16-1-1/ Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus (2006-03).

CISPR 16-1-4/ Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Ancillary equipment – Radiated disturbances (2007-02).

CISPR 16-1-5/ Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antenna calibration.

CEI EN 55022/ Information technology equipment - Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement (2009-01).

CEI EN 61000-4-3/ Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test (2007-04).



# Conclusioni

Buona parte dell'apprendimento è stato dedicato allo studio delle norme che descrivono l'esecuzione della taratura e dei test (IEC CISPR 16, CEI EN 61000 e CEI EN 55022 ).

Questo lavoro di tesi ha avuto come obiettivo principale l'acquisizione delle conoscenze necessarie per l'anechoizzazione e la taratura della camera semianecoica.

La conoscenza preliminare delle caratteristiche principali delle antenne, delle proprietà del materiale anecoico e dei principi base delle onde elettromagnetiche è stato fondamentale per la realizzazione di un modello che considerasse tutte le riflessioni principali all'interno di una camera semianecoica.

Gli sforzi maggiori sono stati rivolti allo studio del comportamento della camera nel range 1-6 GHz. Comportamento dettato dalla stima del VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), parametro fondamentale che assicura l'adeguatezza della camera semianecoica in considerazione dell'attenuazione e dell'uniformità delle riflessioni. È stato molto interessante e stimolante svolgere questa indagine sperimentale che ha permesso di analizzare a fondo per la prima volta questo parametro là dove non c'erano trattazioni teoriche approfondite che lo descrivessero.

Buona parte del lavoro si è anche dedicata alla valutazione dell'NSA (*Normalized Site Attenuation*) che descrive il comportamento del sito nel range 30-1000 MHz..

L'esperienza nel Laboratorio di compatibilità ha permesso di effettuare molte tarature e test visti precedentemente solo in linea teorica con il risultato di aver ottenuto maggior padronanza degli strumenti di misura utilizzati in un laboratorio EMC. Una competenza dettata anche dalla conoscenza dell'incertezza di misura di ogni singolo strumento e/o di strumenti connessi.

Lo studio da un punto di vista teorico e pratico degli aspetti che interessano la trasmissione e la ricezione di campi elettromagnetici ha permesso di avere una visione completa delle problematiche legate a questo tipo di misure. L'esperienza in azienda è stata inoltre di grande interesse per un primo approccio nei confronti di una realtà lavorativa dove giocano un ruolo importante la professionalità, l'impegno nel

raggiungimento degli obiettivi nei tempi prefissati e la capacità organizzativa e di gestione dei costi.

# Ringraziamenti

Il percorso universitario è l'ultimo tratto di un importante viaggio iniziato tanti anni fa tra i banchi della scuola elementare. Ma oltre al mio impegno come studente molteplici sono i fattori e soprattutto tante sono le persone che, in circostanze diverse, hanno contribuito al raggiungimento di questa meta, ed è a tutte loro che rivolgo un sentito grazie.

Ringrazio innanzitutto il mio relatore, prof. Alessandro Sona, per la sua disponibilità a seguirmi in questa ultima fatica.

Un sentito grazie va ai responsabili del laboratorio EuroTest di Brugine, in particolare agli ingegneri Filippo Roveggio, Stefano Brasola e Luca Scanferla che mi hanno insegnato molto e assistito nella mia esperienza di laboratorio permettendomi di svolgere questa tesi. La mia particolare riconoscenza anche agli ingegneri Pierpaolo e Andrea per il loro prezioso aiuto nella fase conclusiva del mio lavoro.

Un forte ringraziamento va ai miei genitori per avermi sempre sostenuto.

Sicuramente ringrazio anche tutti gli amici che mi hanno "aspettato" e accompagnato con la loro simpatia e amicizia durante tutti questi anni di studio.

Rivolgo infine un caro pensiero alla zia Paola che non potrà gioire con me di questo traguardo.