



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE
DEI SISTEMI INDUSTRIALI**

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccatronica

Tesi di Laurea

**PROCEDURE DI VERIFICA DEL BALUN DI
UN'ANTENNA BI-LOG PER CONTROLLI
PERIODICI**

Relatore

Prof. Alessandro Sona

Correlatore

Claudio Pravato

Laureando

Andrea Regaù

Anno Accademico 2023/2024

Indice

| | |
|---|-----------|
| Introduzione | 3 |
| 1 Nozioni base su antenna e balun | 4 |
| 1.1 Antenna EMC in esame | 4 |
| 1.2 Prova di emissione irradiata | 6 |
| 1.3 Funzioni e caratteristiche del balun | 8 |
| 1.4 Problematiche | 10 |
| 1.4.1 Variabili esterne | 10 |
| 1.4.2 Variabili interne | 11 |
| 1.5 Strumentazione richiesta | 13 |
| 2 Verifica mediante misura del coefficiente di riflessione | 17 |
| 2.1 Strumentazione | 19 |
| 2.2 Procedura | 20 |
| 2.2.1 Calibrazione | 20 |
| 2.2.2 Misurazione | 22 |
| 2.3 Verifica dei risultati | 25 |
| 2.3.1 Calcolo dell'incertezza | 25 |
| 2.3.2 Rispetto delle condizioni | 27 |
| 3 Verifica mediante misurazione di emissioni irradiate | 29 |
| 3.1 Strumentazione | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2 | Procedura | 31 |
| 3.2.1 | Posizionamento | 32 |
| 3.2.2 | Prova in doppio | 33 |
| 3.3 | Elaborazione dati | 35 |
| 4 | Risultati sperimentali | 38 |
| 4.1 | Risultati misura VSWR | 38 |
| 4.2 | Risultati misure con CNE | 42 |
| 4.3 | Valutazione complessiva | 46 |
| | Conclusion | 47 |
| A | Test di stabilità del Noise Emitter | 48 |
| A.1 | Configurazione setup | 48 |
| A.2 | Analisi dei dati | 49 |
| A.3 | Risultati sperimentali | 50 |
| | Bibliografia | 51 |

Introduzione

Nell'ambito della Compatibilità Elettromagnetica, le interferenze irradiate dagli apparecchi elettrici sono misurate mediante antenne di vari tipi, alcuni dei quali necessitano di uno specifico componente, il balun, per operare correttamente. Esso presenta però molteplici problemi, e richiede quindi di essere tarato per assicurarsi periodicamente del suo funzionamento, il che comporta costi elevati da parte dell'utente.

Questa tesi è perciò finalizzata alla riduzione della frequenza di taratura del balun: secondo le indicazioni definite dalle apposite norme, ciò è possibile mediante l'attuazione anch'essa periodica di almeno uno di due metodi di verifica. I benefici sono principalmente di natura economica, in quanto riducono i costi legati allo strumento ed i tempi morti, ma comprendono anche una più veloce individuazione dei problemi.

L'elaborato inizia con una descrizione del contesto di utilizzo e delle problematiche del balun, a cui segue una spiegazione dei due procedimenti: mentre il primo è basato sulla misura diretta di grandezze legate al balun, il secondo valuta indirettamente la sua stabilità analizzando il suo output. Per ognuno, viene riportata la modalità di esecuzione e la successiva elaborazione dei dati, seguite dai risultati sperimentali e dagli esiti ottenuti.

Capitolo 1

Nozioni base su antenna e balun

1.1 Antenna EMC in esame

L'antenna oggetto di verifica è impiegata dal laboratorio di CAME, classificato come CTF (Customer Test Facility): questa condizione riconosce il rispetto dei criteri della norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025, e permette quindi l'esecuzione di misure e la valutazione dei loro risultati.

Il mantenimento dello stato di CTF richiede tuttavia accertamenti periodici da parte di un CBTL (Competent Body Test Laboratory), al fine di confermare il soddisfacimento di determinati criteri:

- Riferibilità metrologica dei risultati di misura, ovvero la possibilità di correlare questi ultimi ad un riferimento mediante un'incertezza di misura, ricavata dai certificati di taratura della strumentazione impiegata;
- Tracciabilità delle misure;
- Taratura di ogni componente delle catene di misura utilizzate, sia per ottenere riferibilità metrologica che per garantire l'idoneità degli strumenti e quindi l'affidabilità della catena.

In particolare, la taratura dell'antenna ha cadenza attualmente annuale, e provvede a tale scopo un ente esterno a cui è inviato lo strumento: essendo la durata del processo prolungata e la data di restituzione non completamente certa, ciò cosituisce un costo ingente sia in termini monetari che di tempo in cui l'antenna non è utilizzabile.

Il DT-08-DL Rev00, in cui è stabilito tale obbligo, propone un approccio alternativo, ovvero la possibilità di effettuare controlli semestrali per verificare il corretto funzionamento dell'antenna all'interno del CTF.

L'esecuzione di tali controlli consente di ridurre la frequenza della taratura da annuale a triennale, diminuendo quindi considerevolmente le spese ed aumentando al contempo la disponibilità. Inoltre, eventuali dubbi sulla presenza di difetti diventano risolvibili in breve tempo mediante una prova in laboratorio, senza bisogno di attendere la data d'invio prefissata.

Dopo un primo test per constatare la validità delle procedure, è necessario il loro salvataggio sotto forma di Istruzioni Operative, destinate sia alla consultazione per le ripetizioni periodiche della verifica che al controllo durante gli accertamenti del CBTL. In aggiunta, i risultati ottenuti e le operazioni effettuate su di essi sono conservati al fine della tracciabilità.

1.2 Prova di emissione irradiata

La prova di emissione irradiata è una misura effettuata allo scopo di verificare che le interferenze elettromagnetiche emesse da un determinato apparecchio rientrino in limiti prestabiliti. Le sue modalità sono definite nelle norme armonizzate e prevedono l'utilizzo di antenne come strumenti principali per la ricezione delle emissioni. La grandezza misurata è il campo elettrico, e secondo la suddivisione data dalla norma CEI EN 55016-1-1, il range di frequenze oggetto di verifica comprende le bande C e D, per un'estensione totale che va da 30 MHz a 1 GHz. (Tabella 1.1)

| Banda | f |
|-------|------------------|
| A | 9 kHz ÷ 150 kHz |
| B | 150Hz ÷ 30 MHz |
| C | 30 MHz ÷ 300 MHz |
| D | 300 MHz ÷ 1 GHz |
| E | 1 GHz ÷ 18 GHz |

Tabella 1.1: Suddivisione in bande di frequenza

Il motivo di scelta dell'intervallo è legato al fenomeno di risonanza di un'antenna, che può interessare anche i circuiti di molti apparecchi elettrici: le non-idealità in essi presenti possono infatti creare accumulo di cariche in determinate porzioni, assimilandole ad antenne a dipolo con una specifica frequenza di risonanza (Figura 1.1). La lunghezza d'onda λ del segnale in questo stato è legata alla frequenza f dalla formula $\lambda = c/f$, con $c = 300km/s$ velocità della luce nel vuoto, ed alla lunghezza L del dipolo da $L = \lambda/2$: a segnali di frequenza diversa risuonano quindi antenne di diversa lunghezza.

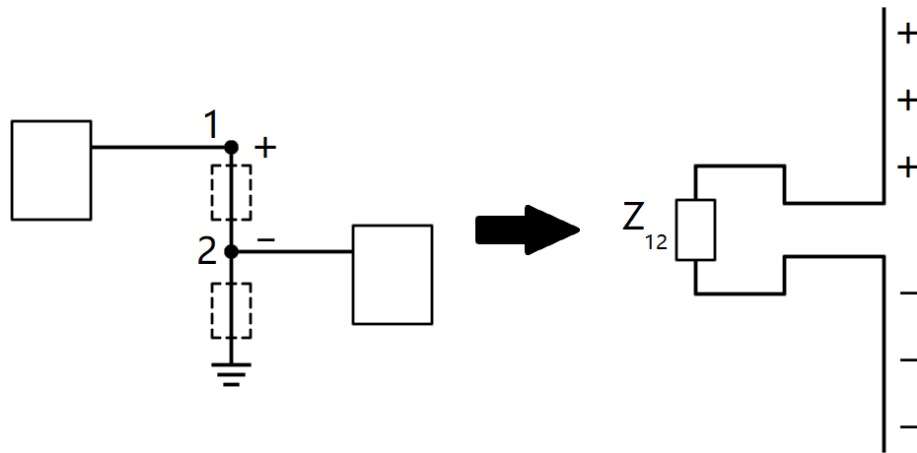


Figura 1.1: Le impedenze del cavo portano a potenziale diverso i rami 1 e 2 del circuito, creando un'antenna a dipolo equivalente

Frequenze al di sotto di 30 MHz fanno risuonare antenne a dipolo di oltre 5 m, lunghezza raramente impiegata nei conduttori della strumentazione elettronica, perciò le bande A e B non sono ritenute problematiche ed i disturbi misurati in esse sono prevalentemente di tipo condotto. Nelle bande C e D, la lunghezza di un'antenna a dipolo in risonanza varia tra 5 m e 15 cm, dimensione che comprende gran parte di sistemi e componenti elettrici di uso comune: diviene quindi particolarmente importante verificare la presenza di onde nel rispettivo intervallo di frequenze. La banda E, pur essendo soggetta a risonanza allo stesso modo, è considerata un'estensione facoltativa, ed analizzata solo nei casi in cui la frequenza di funzionamento massima del dispositivo sotto test (DUT) supera una precisa soglia.

Un fattore rilevante nella preparazione di queste prove è l'incompatibilità tra la tensione bilanciata, prodotta dalle antenne a dipolo, e quella sbilanciata solitamente presente in cavi e ricevitori: la soluzione è l'utilizzo di un balun.

1.3 Funzioni e caratteristiche del balun

Il balun (**balanced** - **unbalanced**) è una rete progettata allo scopo di convertire una tensione di tipo bilanciato in una single-ended e viceversa. È un dispositivo passivo a tre porte, e la sua configurazione tipica è costituita da un trasformatore collegato a terra lungo l'avvolgimento tra le due porte del lato bilanciato. (Figura 1.2)

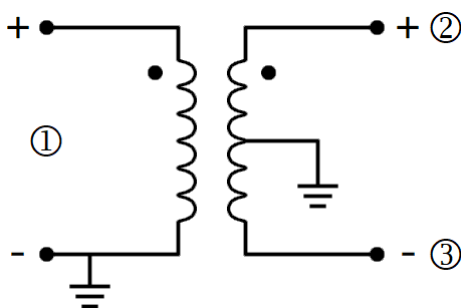


Figura 1.2: Schema di un balun

Il suo utilizzo principale è l'adattamento del segnale tra un'antenna filare e gli apparecchi ad essa collegati, per consentire il funzionamento della prima dal punto di vista sia della trasmissione che della ricezione: in assenza di interventi, i componenti dell'antenna agirebbero da monopoli invece che da dipoli, rendendo di fatto inutile metà della sua struttura. (Figura 1.3)

Ciascuna porta presenta un'impedenza del valore caratteristico di 50Ω , ritenuto il miglior compromesso tra massima potenza sopportabile e minima attenuazione di tensione nei cavi coassiali. Inoltre, i componenti del balun sono elettricamente schermati, in modo che le loro proprietà parassite non siano influenzate da interferenze esterne. Nell'applicazione qui discussa, il rapporto di adattamento del trasformatore è 1:1, essendo l'obiettivo del balun la sola modifica del tipo di tensione. (Figg. 1.4 - 1.5)

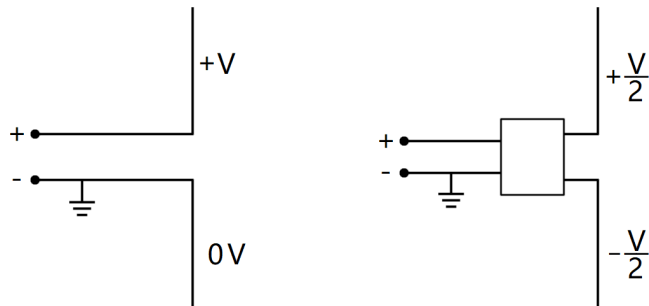


Figura 1.3: Il balun ripartisce una stessa tensione equamente tra le due metà dell'antenna a dipolo

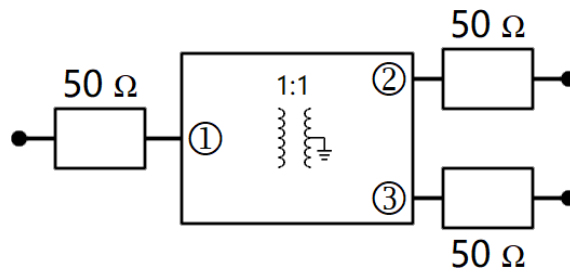


Figura 1.4: Impedenze interne al balun

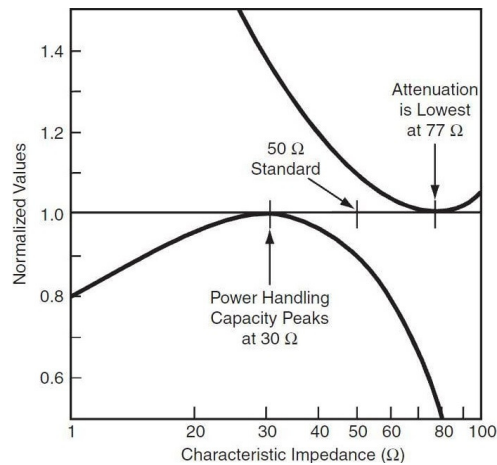


Figura 1.5: Trade-off dell'impedenza, tra massimo carico (a 30 Ω) e minima attenuazione (a 77 Ω)

Cortesia di [12]

1.4 Problematiche

In condizioni ideali il segnale è convertito perfettamente tra ingresso ed uscita, e le tensioni alle porte 2 e 3, chiamate rispettivamente V_2 e V_3 , risultano in opposizione di fase. Tuttavia, sono comunemente presenti vari fattori che tendono a compromettere il funzionamento di questa rete.

1.4.1 Variabili esterne

Nonostante la schermatura, il balun può essere raggiunto da disturbi per mezzo del cavo d'antenna: a seconda del suo posizionamento, alcune componenti del campo elettrico proveniente dagli emettitori possono risultare parallele ad esso, generando correnti indesiderate. L'effetto porta a modifiche della tensione V_1 del lato sbilanciato, creando errori in quantità variabile a seconda delle dimensioni e tipo della porzione di cavo interessata. (Figura 1.6)

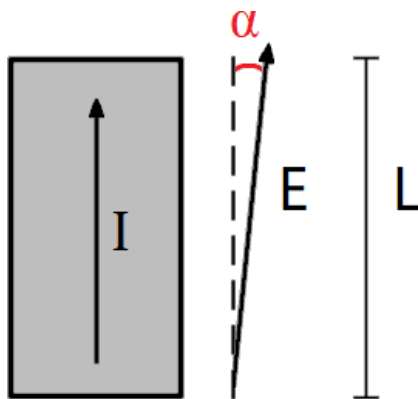


Figura 1.6: Corrente generata, nella sezione di cavo di lunghezza L , dal movimento di cariche dato dalle componenti parallele del campo E

$$I = \frac{eE}{R}, \quad \text{con} \quad e_E = k_r \cdot E \cdot L \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

Nelle formule in (1), k_r è la percentuale di campo elettrico che genera corrente nel conduttore, e R resistenza della porzione di cavo influenzata.

È possibile ridurre l'influenza di E disponendo il cavo in modo che si mantenga orizzontale fino ad una determinata distanza dall'emettitore, per poi curvare nella direzione voluta in una zona di minore intensità del campo, oppure eliminarla utilizzando cavi in fibra ottica, immuni a questo tipo di interferenza. Tuttavia, tali provvedimenti non coinvolgono direttamente il balun, perciò le non-idealità di quest'ultimo continuano ad alterare i segnali in maniera non trascurabile.

1.4.2 Variabili interne

La matrice di conversione del balun è costituita da 9 parametri di scattering S_{ij} , ciascuno dei quali rappresenta la percentuale di segnale che esce dalla porta j dopo l'entrata dalla porta i : il loro valore è ricavato inviando un segnale di intensità nota in ingresso alla seconda, e misurando in contemporanea quello in uscita dalla prima. Se $i = j$, il parametro indica la percentuale che non supera la rispettiva porta e viene invece riflessa.

Nella situazione ideale, la tensione entrante al lato bilanciato comunica solo con la porta 1, a cui viene trasferita completamente, mentre non si verificano interazioni tra le porte 2 e 3. Pertanto, la matrice diventa:

$$\mathcal{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

In caso di non completa uguaglianza tra le impedenze ai capi delle porte, l'opposizione di fase tra V_2 e V_3 risulta però imperfetta.

Tale discrepanza porta all'uscita di correnti di modo comune dalla porta 1, le quali generano a loro volta campi elettromagnetici indesiderati che possono essere rilevati dall'antenna, creando ulteriori disturbi e di conseguenza incertezze sulla misura. (Figura 1.7)

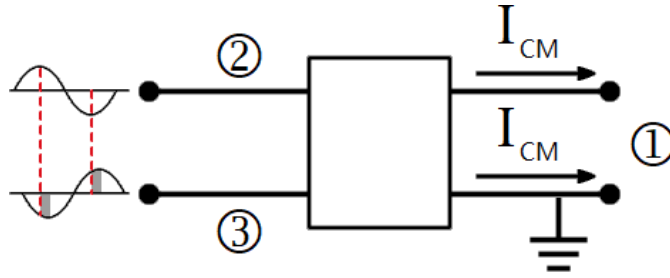


Figura 1.7: Correnti di modo comune causate da sfasamento delle tensioni

Benché tale effetto coinvolga solo le tensioni del lato bilanciato, ogni impedenza presente nel balun lo influenza. Il vettore che lega le tensioni V_2 e V_3 è infatti espresso mediante il rapporto dei trasferimenti tra porte 1-2 ed 1-3:

$$\frac{S_{12}}{S_{13}} = \frac{S_{21}}{S_{31}} = r_b e^{j\phi_b} \quad (3)$$

Idealmente, $r_b = 1$ e $\phi_b = \pi$, ma nel caso reale il modulo viene amplificato di un valore ΔA_b espresso in decibel, e lo sfasamento subisce una variazione pari a $\Delta\phi_b$.

$$\Delta A_b = 20 \cdot \log_{10}(r_b), \quad \Delta\phi_b = \pi - \angle V_3 - \angle V_2 \quad (4)$$

Inoltre, il valore di un'impedenza dipende anche dalla frequenza del segnale da cui è attraversata: la funzione che unisce queste due grandezze è legata a diversi fattori, tra cui la struttura del pezzo ed eventuali elementi parassiti fra esso ed i componenti circostanti.

Alle impedenze trattate nei punti precedenti si aggiunge quindi un ulteriore termine di discrepanza: una catena di misura che risulta ben bilanciata ad una determinata frequenza può non esserlo ad un'altra.

L'impiego di componenti aggiuntivi come anelli di ferrite ed attenuatori contribuisce a ridurre l'azione delle correnti di modo comune, ma non è sempre possibile utilizzarli per via dei loro effetti collaterali. La loro presenza equivale inoltre ad incognite aggiuntive, e quindi incertezze aggiuntive, sull'effetto del circuito collegato al balun.

Date le molteplici non-idealità presenti, è opportuno verificare il funzionamento del balun per garantire l'assenza di problemi eccessivi: ciò si traduce in una verifica dell'antenna stessa, in quanto il balun è considerato una sua parte integrante.

1.5 Strumentazione richiesta

L'antenna a cui il balun in esame è collegato è di tipo bi-log. La sezione biconica è costituita da due elementi triangolari di lunghezza 680 mm e larghezza 500 mm, mentre quella log-periodica è composta da 15 dipoli, il più grande dei quali misura 650 mm, distribuiti su una lunghezza complessiva di 535 mm. (Figg. 1.8 - 1.9)

Il suo comportamento varia a seconda della frequenza del segnale: fra 30 MHz e 100 MHz agisce la sezione biconica, con elevata S_{11} e quindi riflessione delle onde in ingresso, mentre fra 200 MHz e 1 GHz prevale quella log-periodica, con elevato fattore d'antenna. La zona tra 100 MHz e 200 MHz costituisce un intervallo di transizione, in cui S_{11} diminuisce fino a stabilizzarsi mentre aumentano il fattore d'antenna e la selettività.

Questo tipo di antenna presenta un balun particolarmente instabile a causa della necessità di coprire più bande di frequenze contemporaneamente, e richiede perciò una maggiore attenzione rispetto ad una di un singolo tipo.

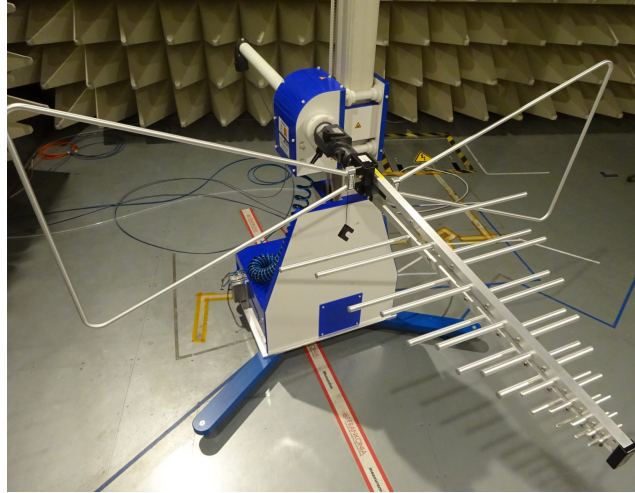


Figura 1.8: Antenna bi-log da verificare
Cortesia di [13]

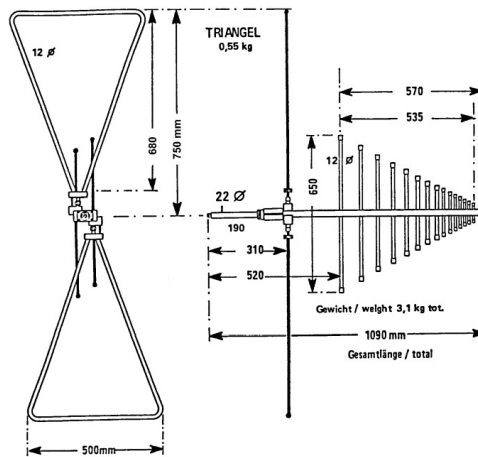


Figura 1.9: Schema dell'antenna con dimensioni
Cortesia di [14]

È preferibile svolgere la verifica in un sito aperto (OATS - Open Area Test Site), in modo che le onde emesse dai dispositivi impiegati vengano rilevate direttamente dall'antenna una sola volta, senza essere riflesse da eventuali pareti. Tuttavia, a causa dell'utilizzo ormai diffuso di apparecchi elettrici e dell'elevata distanza percorsa dai campi elettromagnetici da essi generati, è raro trovare uno spazio aperto libero da interferenze esterne. Per questo motivo è proposta una soluzione alternativa, la Camera Semi-Anecoica (SAC), il cui rivestimento è metallico in modo da schermare da disturbi provenienti dall'esterno, mentre l'interno è rivestito da elementi assorbenti per ridurre la riflessione dei segnali da parte delle pareti. L'unica eccezione è costituita dal pavimento, ricoperto da un piano di massa con lo scopo di uniformarne le proprietà conduttive rendendole indipendenti dal suolo sottostante. (Figura 1.10)



Figura 1.10: Esempio di Camera Semi-Anecoica
Cortesia di [15]

Parametro fondamentale di una Camera Semi-Anecoica è l'NSA (Normalized Site Attenuation), ovvero lo smorzamento complessivo della potenza in ingresso all'emettitore durante l'uscita da quest'ultimo ed il passaggio attraverso la camera e l'antenna ricevente. Al fine di garantire l'affidabilità dei risultati di misura rispetto ad un sito aperto, la variazione di questa grandezza non deve superare i ± 4 dB, come stabilito dalla norma CEI EN 55016-1-4.

Nel caso specifico delle verifiche trattate nei capitoli successivi, la SAC utilizzata ha lunghezza 9680 mm, larghezza 6530 mm ed altezza 5550 mm. In base ad una precedente taratura, il suo Δ NSA raggiunge un valore assoluto massimo di 1.38 dB per antenna polarizzata orizzontalmente e 2.75 dB verticalmente, ed è ritenuto perciò adatto all'attuazione dei test.

Questi ultimi, riportati di seguito e definiti dal DT-08, seguono due modalità: la misura del modulo del coefficiente di riflessione e quella dell'emissione prodotta da un generatore di riferimenti.

Capitolo 2

Verifica mediante misura del coefficiente di riflessione

Il coefficiente di riflessione, denotato con Γ , corrisponde al parametro $S_{11} = b_1/a_1$, ovvero al rapporto tra il segnale entrante nel lato sbilanciato e quello riflesso verso il cavo d'antenna. (Figura 2.1)

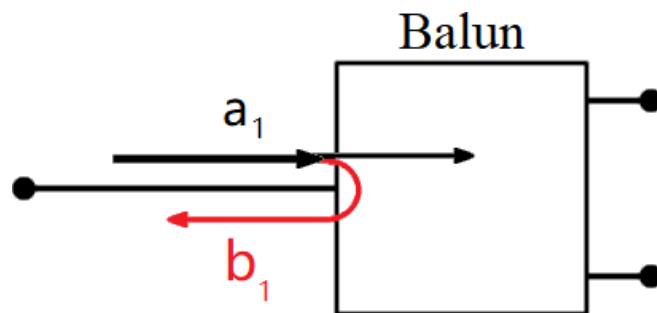


Figura 2.1: Una percentuale b_1 del segnale d'ingresso a_1 non supera la porta sbilanciata, e percorre il cavo in direzione opposta

La grandezza utilizzata nella maggior parte delle normative per fissare limiti sulla riflessione è tuttavia un'altra, il VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) o ROS (Riflessione Onda Stazionaria).

Questo parametro rappresenta il rapporto tra le tensioni massima e minima lungo la linea di trasmissione analizzata, in assenza di perdite.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (5)$$

Nel caso di riflessione nulla, $\Gamma = 0$ e $VSWR = 1$, e la tensione è perfettamente trasmessa lungo la linea senza la generazione di onde riflesse. Nel caso invece di riflessione totale, $\Gamma = 0$ e $VSWR \rightarrow \infty$, e la totalità della tensione è convertita in onda stazionaria senza arrivare al carico.

Considerando un'antenna a dipolo, Γ è inoltre impiegato nel calcolo dell'impedenza complessiva Z_{23} che lega le due porte del lato bilanciato (Figura 2.2), la cui formula è normalmente espressa come:

$$Z_{23} = \frac{1 - S_{22}S_{33} + S_{23}S_{32} - S_{33} + S_{22}}{(1 - S_{22})(1 - S_{33}) - S_{23}S_{32}} \cdot 100 = R_{23} + jX_{23} \quad (6)$$

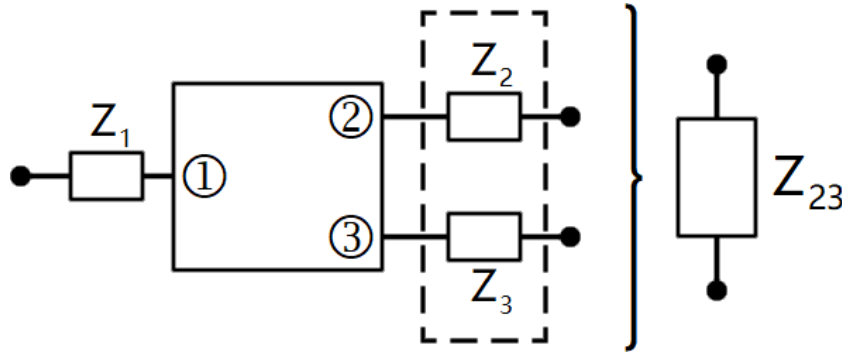


Figura 2.2: Impedenza del lato bilanciato, equivalente alla somma di Z_2 e Z_3

La conoscenza del coefficiente di riflessione consente di ricavare Z_{23} in modo più semplice, tramite la formula alternativa:

$$\Gamma = \frac{Z_{23} - 100}{Z_{23} + 100}, \quad \text{da cui } Z_{23} = 100 \cdot \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (7)$$

È perciò possibile analizzare il comportamento ad entrambi i lati del balun tramite il coefficiente di riflessione od il VSWR, ricavando da (7) il valore di Z_{23} che risulta pari a 100Ω nella situazione ideale.

2.1 Strumentazione

La misura viene effettuata mediante un Vector Network Analyzer (VNA), uno strumento in grado di misurare i parametri di scattering di un apparecchio connesso alle sue due porte frontali. (Figura 2.3)



Figura 2.3: Vector Network Analyzer
Cortesia di [13]

Ciascuna porta presenta un generatore di segnali ed un ricevitore, utilizzati in combinazioni diverse a seconda della S_{ij} che si desidera ricavare.

Prima dell'inizio di ogni prova, è prevista inoltre la calibrazione del VNA per mezzo di un Cal Kit, contenente impedenze con diversi valori di riferimento da connettere alla strumentazione. Nel caso qui discusso, sono impiegate tre terminazioni: **Open** a simulare l'impedenza di un circuito aperto, **Short** di un cortocircuito, e **Match** dal valore caratteristico 50Ω . (Figura 2.4)

L'antenna sotto test (AUT) è connessa ad una delle porte del VNA mediante un cavo coassiale.



Figura 2.4: Impedenze Open, Short, Match del Cal Kit
Cortesia di [13]

2.2 Procedura

Il VNA è acceso con un anticipo di almeno 30 minuti prima di ogni utilizzo, il che consente di stabilizzare la sua temperatura e migliorare quindi l'affidabilità dei risultati. L'intera procedura, compresa la calibrazione, è eseguita all'interno della SAC, in quanto può essere compromessa da disturbi esterni pur non comprendendo misure di emissioni irradiate.

2.2.1 Calibrazione

Lo scopo della calibrazione è rimuovere dal processo l'errore sistematico introdotto dal VNA ed il contributo del cavo d'antenna sul segnale uscente dal balun, trasformando in tal modo l'ingresso dell'antenna nel punto di partenza della misura.

È necessario eseguire questo processo a VNA già impostato nelle condizioni della futura prova, regolabili dal menu del dispositivo.

- Frequenza iniziale 30 MHz, frequenza finale 1 GHz;
- Numero di punti di campionamento: 971, corrispondenti ad un punto per ogni MHz nell'intervallo;
- Parametro da misurare: S_{11} .

Al fine di non danneggiare il VNA con scariche elettrostatiche accumulate dall'operatore, è obbligatorio l'uso di un bracciale antistatico collegato a massa nelle operazioni che richiedano contatto con le sue porte. (Figura 2.5)

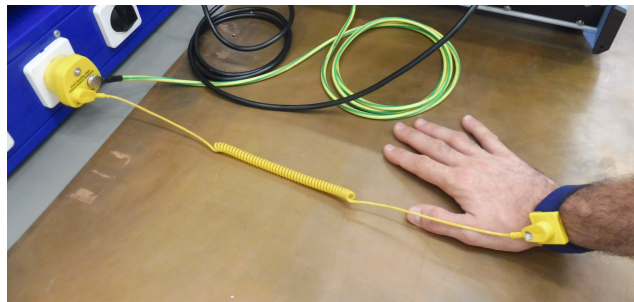


Figura 2.5: Bracciale antistatico per dispersione di cariche
Cortesia di [13]

Un'estremità del cavo viene collegata ad una delle due porte del VNA, avendo cura se possibile di avvitarne correttamente il connettore tramite una chiave dinamometrica. In seguito, la calibrazione è avviata selezionando la modalità OSM sulla sola porta interessata, ed una terminazione viene connessa all'estremità libera del cavo (Figura 2.6). Una volta fissata, il processo è avviato tramite VNA alla voce corrispondente ed il nuovo riferimento è ottenuto in breve tempo, quindi l'impedenza corrente è rimossa per passare alla successiva.



Figura 2.6: Terminazione connessa al cavo d'antenna
Cortesia di [13]

Si ripete il procedimento per ciascuna delle tre impedenze, dopodiché lo stato attuale del VNA è salvato per consentire di effettuare misure di VSWR future senza necessità di una nuova calibrazione. Il cavo è poi collegato all'antenna, e si procede con la misura.

2.2.2 Misurazione

L'antenna viene polarizzata orizzontalmente ed alzata a quota 2 metri dal piano di massa, come stabilito dalla norma CEI EN 55016-1-6; analogamente, il cavo è disposto in modo da mantenere un'adeguata distanza dal piano lungo tutto il percorso.

In assenza di una tale precauzione, l'influenza sui due strumenti è paragonabile alla presenza di una corrente fittizia opposta a quella al loro interno (Figura 2.7).

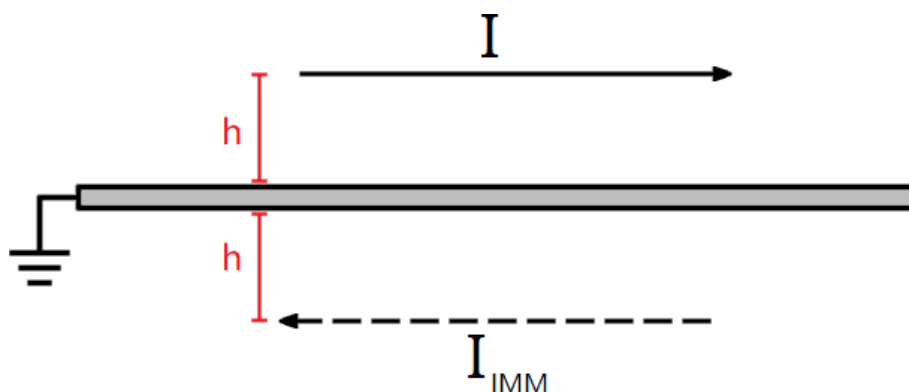


Figura 2.7: Una corrente I nel cavo a quota h risente del piano come di una corrente I_{IMM} , di modulo uguale ma verso opposto, a distanza $2h$

Sebbene l'effetto complessivo di I ed I_{IMM} sia quello delle correnti di modo comune, ciò costituisce comunque una fonte di disturbo per la misura in quanto:

- Modifica le impedenze Z_A e Z_B degli elementi irradianti collegati alle porte 2 e 3 del balun, causando sbilanciamento rispetto a Z_2 e Z_3 (Figura 2.8);

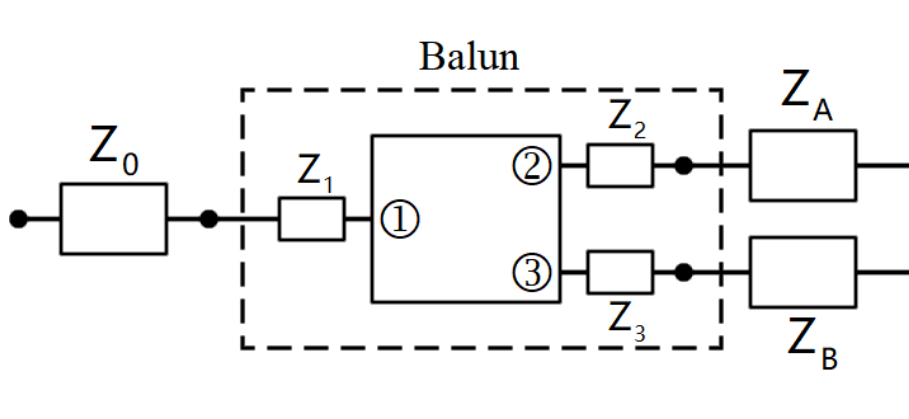


Figura 2.8: Impedenze di antenna e strumentazione connessa al balun

- Altera i segnali trasmessi e ricevuti dal VNA, passanti per il cavo. Nonostante l'impedenza Z_0 di questi strumenti sia stata eliminata tramite la calibrazione, la perturbazione data dalla corrente immagine può ancora influire negativamente sulla misura di Γ .

Vengono inoltre seguite ulteriori modalità di posizionamento, al fine di evitare interferenze date dalla vicinanza di oggetti o persone: l'antenna è centrata rispetto alla larghezza della SAC, lontano dalle sue pareti, e l'operatore si posiziona a debita distanza dalla catena di misura in quanto costituisce un ulteriore ostacolo. (Figura 2.9)

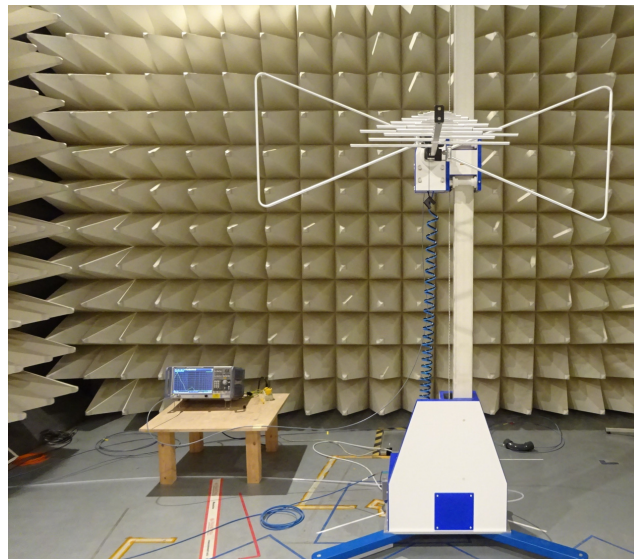


Figura 2.9: Disposizione della catena di misura VNA - Cavo - Antenna nella Camera Semi-anechoica

Cortesìa di [13]

A seconda della configurazione, S_{11} può essere visualizzato direttamente come grafico del VSWR, ed essere acquisito continuamente o per un tempo e numero limitato di volte: se la traccia ottenuta è considerata accettabile, si procede al suo salvataggio. (Figura 2.10)

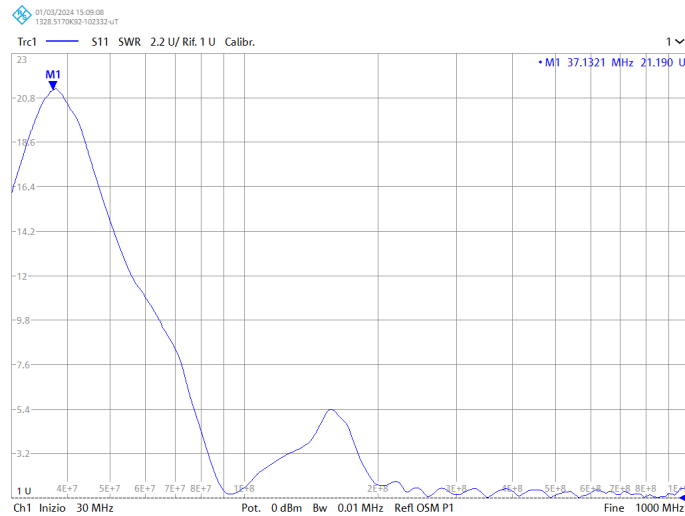


Figura 2.10: Esempio di traccia ricavata: è visibile la zona ad alto VSWR della parte biconica, la zona di transizione fino a 200 MHz e la zona a basso VSWR della parte log-periodica

Cortesia di [13]

2.3 Verifica dei risultati

2.3.1 Calcolo dell'incertezza

I requisiti per la verifica autonoma in CTF prevedono anche il calcolo dell'incertezza sul misurando: a tale scopo sono richiesti i certificati di taratura della strumentazione utilizzata, sia per assicurarne la validità che per ricavarne i contributi di incertezza da utilizzare nel calcolo stesso.

Si ha a disposizione la documentazione relativa alla taratura dei seguenti strumenti: antenna, VNA, Cal Kit e SAC. La prima costituisce il riferimento con cui confrontare il grafico del VSWR appena ottenuto: se i due risultano simili, si ritiene la traccia affidabile e si procede al calcolo della sua incertezza.

- Il termine introdotto dal VNA è determinato dall'incertezza nella misura delle potenze del segnale emesso da Ref RX e di quello rilevato da Meas RX della porta utilizzata: le ampiezze h_U dell'intervallo nei due segni vengono confrontate con quella della singola suddivisione h_S , e calcolate tramite una proporzione con il valore di quest'ultima di 0.5 dB. Per entrambe h_U e h_S (Figura 2.11)

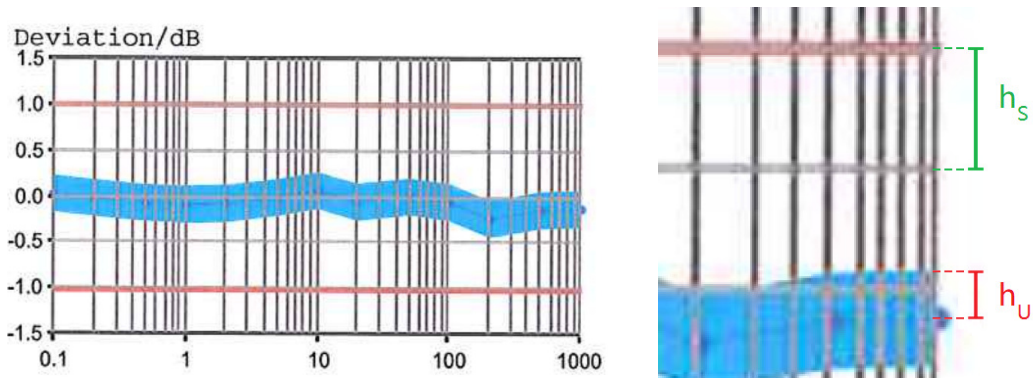


Figura 2.11: Grafico potenza analizzata, con incertezza estesa in azzurro ed h_U sua ampiezza in un solo segno, h_S ampiezza di riferimento per 0.5 dB

Cortesia di [16]

$$U = \frac{h_U}{h_S} \cdot 0.5 \text{ dB} \quad (8)$$

Dalla formula (8) sono ricavati i quattro valori, di cui due per l'input e due per l'output, che vengono poi sommati a coppie per i rispettivi segni. La media tra questi ultimi è il limite dell'intervallo.

$$U_1 = \frac{U_- + U_+}{2}, \quad \text{in cui } U_- = U_{in-} + U_{out-}, \quad U_+ = U_{in+} + U_{out+} \quad (9)$$

- Nonostante la calibrazione, rimane un errore residuo dato dall'incertezza nella taratura del Cal Kit stesso, corrispondente alla somma delle massime incertezze sul modulo di Γ per le tre terminazioni nei generi impiegati.

Essendo riportati nel certificato solo i valori positivi, quelli negativi si assumono opposti.

$$U_2 = [-U_{Cal} ; U_{Cal}], \quad \text{in cui } U_{Cal} = U_{|\Gamma|,O} + U_{|\Gamma|,S} + U_{|\Gamma|,M} \quad (10)$$

Nel calcolo del VSWR dalla formula (5), il coefficiente di riflessione è considerato sotto forma di modulo, quindi la fase e l'incertezza su quest'ultima vengono trascurate.

- L'incertezza derivante dalla Camera Semi-Anecoica è la media tra il suo massimo e minimo NSA nella polarizzazione orizzontale.

$$U_3 = \frac{|NSA_{H-}| + NSA_{H+}}{2} \quad (11)$$

Dopo aver ricavato ciascun U_i , l'incertezza complessiva u_C si ottiene in base alle indicazioni riportate dalla norma CEI EN 55016-4-2:

$$u_C = \sqrt{c_i^2 u_i^2} \quad (12)$$

In cui ogni $c_i = 1$, ed ogni u_i si ottiene dividendo la relativa U_i per un fattore k diverso a seconda della sua distribuzione di probabilità: per VNA e calibrazione, essa è specificata nel rispettivo certificato, mentre per NSA è considerata di tipo triangolare, con $k = 2$.

u_C è poi moltiplicata per 2, producendo l'incertezza estesa U_{lab} .

2.3.2 Rispetto delle condizioni

L'incertezza estesa viene in primo luogo confrontata con il valore limite U_{cisprr} stabilito dalla norma, al di sotto del quale i valori misurati nella prova possono essere paragonabili a quelli reali: per le prove di emissioni irradiate nel luogo e campo di frequenze qui utilizzati, $U_{cisprr} = 6.3 \text{ dB}$.

Se $U_{lab} < U_{cispr}$, si procede a verificare l'idoneità dell'antenna secondo le istruzioni del DT-08:

Indicando con v_{M1} il VSWR ottenuto dalla misura e $U_1 = U_{lab}$ la relativa incertezza, ed analogamente v_{M2} il VSWR riportato nel certificato di taratura con rispettiva incertezza U_2 , il criterio considerato è:

$$|v_{M1} - v_{M2}| < \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (13)$$

Al fine di semplificare l'interpretazione visiva, la disuguaglianza (13) si può trasformare in:

$$(v_{M2} - \sqrt{U_1^2 + U_2^2}) < v_{M1} < (v_{M2} + \sqrt{U_1^2 + U_2^2}) \quad (14)$$

Nella nuova condizione, l'incertezza viene raccolta interamente su v_{M2} , e costituisce i limiti entro cui il grafico di v_{M1} deve rientrare: il loro rispetto indica l'accettabilità dei risultati, e quindi la possibilità di impiego dell'antenna per prove di emissioni irradiate.

Capitolo 3

Verifica mediante misurazione di emissioni irradiate

Il coefficiente di riflessione influenza la percentuale di segnale che supera il balun ed è irradiata dall'antenna rispetto a quella totale in ingresso: ciò si ripercuote sulle rispettive potenze, P_R e P_O , il cui legame ha effetto sul guadagno dell'antenna.

$$G = D \cdot \eta, \quad \text{in cui } \eta = \frac{P_R}{P_O} \quad (15)$$

D rappresenta la direttività dell'antenna, che si può considerare costante nel caso in esame in quanto dipendente dalla struttura fisica.

Il guadagno è inoltre inversamente proporzionale al fattore d'antenna AF , ovvero il rapporto tra il campo elettrico da essa rilevato e la tensione prodotta in uscita.

$$AF = \frac{E}{V} = \frac{9.73}{\lambda\sqrt{G}} \quad (16)$$

Ne consegue che la stabilità del balun può essere valutata anche analizzando la tensione misurata dall'antenna rispetto ad una sorgente di disturbi noti.

3.1 Strumentazione

La sorgente impiegata è un Comparison Noise Emitter (CNE), apparecchio finalizzato ad irradiare un campo elettrico il cui spettro è paragonabile ad un rumore (Figura 3.1). Pur essendo diverso da quello di pettine elencato nel DT-08, il segnale generato è comunque noto, e quindi ritenuto adatto a verificare le prestazioni del balun. La banda di frequenze è regolabile collegando al dispositivo diverse antenne.

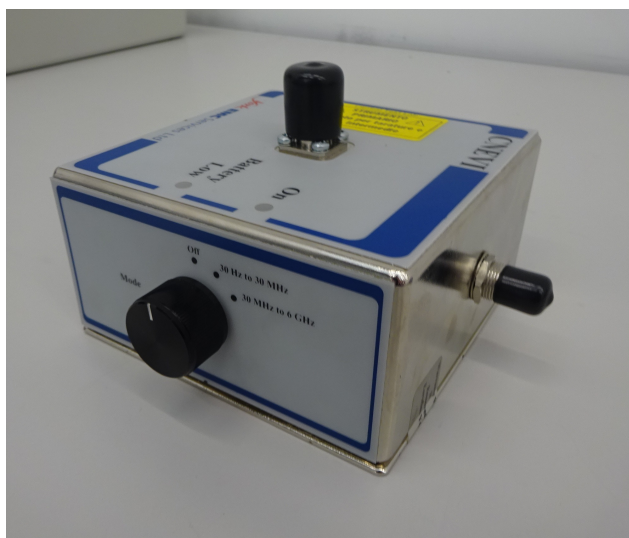


Figura 3.1: Comparison Noise Emitter
Cortesia di [13]

La tensione in uscita dall'AUT è inviata al di fuori della Camera tramite un cavo passante per un foro appositamente schermato in modo da impedire l'uscita del segnale irradiato. Pur costituendo una potenziale fonte di alterazione della tensione, il cavo è considerato già adattato per l'esecuzione della prova, e non richiede calibrazione. L'estremità opposta del cavo è connessa all'apparecchio di ricezione EMI, nel caso specifico un Analizzatore di Spettro Analogico. (Figura 3.2)



Figura 3.2: Ricevitore EMI
Cortesia di [13]

Si ricorre inoltre all'ausilio di un supporto la cui quota e polarizzazione sono regolabili tramite motori, semplificando di molto la preparazione.

L'intera catena di misura è controllata mediante software, in modo da poter modificare il posizionamento dell'AUT ed avviare le misure con maggiore rapidità e precisione.

3.2 Procedura

Il parametro oggetto di verifica è la ripetibilità delle misure, ovvero la loro precisione in condizioni in cui i risultati di più prove indipendenti vengono ottenuti in un tempo breve con gli stessi metodi ed apparecchiature, dallo stesso operatore, nello stesso laboratorio e sullo stesso materiale. È prevista a tale scopo una prova in doppio, le cui modalità prevedono due serie di misure separate: dalla prima è ricavato un limite di ripetibilità da soddisfare, e dalla seconda un risultato da confrontare con il suddetto limite.

3.2.1 Posizionamento

Si connette al CNE l'antenna relativa al campo di frequenze 200 MHz ÷ 1 GHz, ritenuta adatta anche alle misure nella banda 30 MHz ÷ 200 MHz.

In seguito, il dispositivo è posto all'interno della Camera, su un tavolo di materiale isolante che non costituisca fonte di alterazione per il campo elettrico emesso. L'AUT è montata al supporto ed allineata con il centro di fase a 3 m dal CNE, distanza consona alla misura secondo la norma CEI EN 55011, con l'aiuto di un metro a laser al fine di consentire migliore accuratezza. (Figura 3.3)

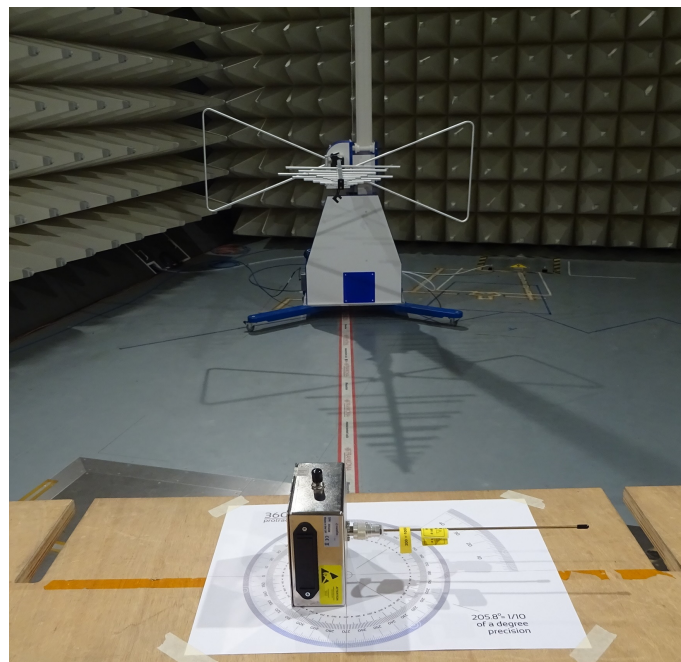


Figura 3.3: Setup del CNE, con antenna relativa al range impiegato polarizzata allo stesso modo dell'AUC, in questo caso orizzontale
Cortesia di [13]

3.2.2 Prova in doppio

Dopo aver completato il setup, il CNE è impostato nel range di frequenze interessato e posizionato in modo da far coincidere la polarizzazione della sua antenna con quella dell'AUT. Al di fuori della Camera, il software di misura è connesso al supporto ed al ricevitore EMI, e viene avviata una singola misura nella polarizzazione attuale.

Si rileva in primo luogo il valore di picco del segnale lungo la banda completa, in modo da valutare l'andamento complessivo della tensione, dopodiché viene misurato il valore di quasi-picco in un numero limitato di punti a frequenze specifiche scelti dall'operatore. (Figura 3.4)

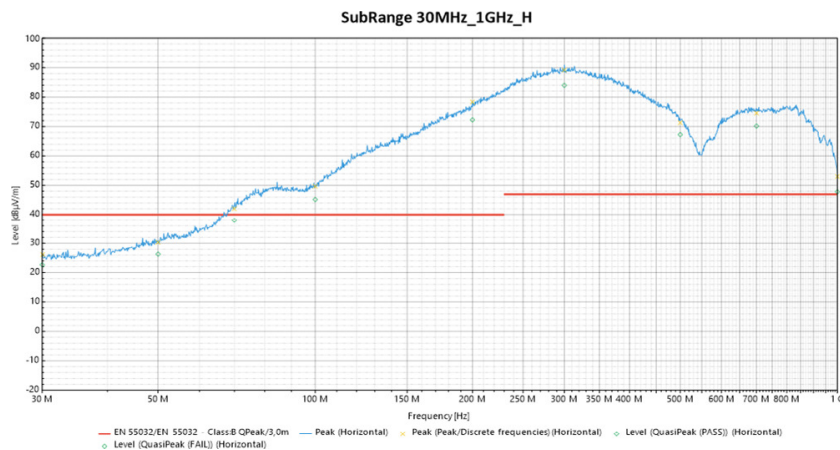


Figura 3.4: Esempio di grafico di emissioni irradiate: in blu la misura di picco, sotto in verde i punti di quasi-picco

Cortesia di [13]

Il motivo per cui le misure di picco sono effettuate nell'intero intervallo al contrario di quelle di QP è legato all'obiettivo delle misure stesse: mentre le prime hanno il solo scopo di registrare il valore massimo di un segnale al variare della frequenza, indipendentemente dalla sua natura, le seconde tengono conto anche della periodicità e durata degli ingressi.

Per questo motivo, sono richiesti componenti differenti: nonostante il meccanismo di misura sia costituito in entrambi i casi da un semplice circuito RC, il condensatore impiegato nel quasi-picco possiede una costante di tempo molto maggiore e di conseguenza un elevato tempo di scarica T_D nelle bande C e D oggetto della prova. (Figura 3.5)

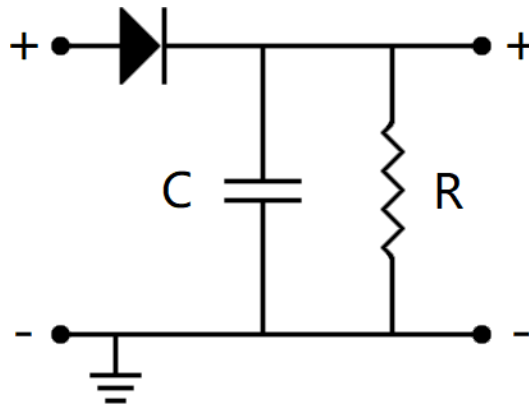


Figura 3.5: Circuito RC del rilevatore di picco, preceduto da diodo per misurarne solo la parte positiva

In aggiunta la banda passante B_6 dei filtri presenti, e di conseguenza il campo di frequenze analizzate, aumenta procedendo nell'ordine dei range dati dalla norma, risultando in un tempo di scan T_S crescente. Infine, la richiesta di una quantità di disturbi sufficiente allo scopo incrementa la durata di un singolo sweep.

Tali fattori si traducono in una durata della misura progressivamente maggiore, i cui dettagli sono riportati nelle norme CEI EN 55016-1-1 e 55016-2-3, ma non costituiscono un problema nelle misure di picco, il cui T_S decresce. (Tabella 3.1)

| | Banda A | Banda B | Bande C e D |
|-----------------------|---------------|-------------------|--------------------|
| $B_6[kHz]$ | 0,2 | 9 | 120 |
| T_D [ms] | 500 | 160 | 550 |
| T_S quasi-picco [s] | 2820 = 47 min | 5970 = 1 h 39 min | 19400 = 5 h 23 min |
| T_S picco [s] | 14,1 | 2,985 | 0,97 |

Tabella 3.1: Caratteristiche al variare della banda

Le frequenze di misura di QP sono selezionate secondo un ordine prestabilito, ma è possibile modificarle, eliminarle od aggiungerne di nuove in base al grafico delle emissioni ottenuto, in modo da ricavare più dati sulle zone di interesse. È tuttavia consigliato mantenere lo stesso insieme per ogni ripetizione durante una stessa sessione, cambiandole eventualmente in seguito all'analisi dei risultati.

Dopo l'ottenimento dei risultati in una specifica polarizzazione, il procedimento è eseguito analogamente per l'altra ruotando antenna e CNE di 90 gradi.

Entrambe le sequenze previste dalla prova in doppio seguono le modalità appena descritte, ma in quantità differenti. Il limite di ripetibilità da soddisfare è ricavato da molteplici campioni, variando leggermente la posizione dei dispositivi tra un'iterazione e l'altra in modo da introdurre un termine di incertezza dovuto ad errore umano, mentre il valore di cui verificare l'idoneità è ottenuto mediante una singola coppia di misure.

3.3 Elaborazione dati

I risultati della prova sono suddivisi in base alla polarizzazione delle antenne, ed i valori delle misure di QP vengono a loro volta raggruppati a seconda della frequenza esaminata.

Per ciascun gruppo, sono quindi eseguite le seguenti operazioni:

1. Nel caso in cui uno o più valori si differenzino eccessivamente dal resto, viene effettuato un egual numero di nuove coppie di misure, i cui risultati sono poi sostituiti a quelli ritenuti inaccettabili.
2. Calcolo dell'ampiezza A_{rep} dell'intervallo di ripetibilità dalla prima sequenza di misure. È richiesto nella formula lo scarto tipo s_r , ovvero la stima della deviazione standard σ_r degli n campioni, e di conseguenza la media aritmetica v_{AVG} degli stessi.

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{AVG})^2}{n - 1}}, \quad A_{rep} = \sqrt{2} \cdot s_r \cdot t_p \quad (17)$$

Nella formula di A_{rep} , t_p rappresenta la variabile di Student, dipendente da n , dal livello di probabilità p utilizzato e dalla percentuale di copertura α considerata per quest'ultimo.

3. Confronto dello scostamento tra le due sequenze di misure con la ripetibilità, per verificare il rispetto del limite:

$$|x_1 - x_2| \leq A_{rep} \quad (18)$$

Nella situazione qui esaminata, $x_1 = v_{AVG}$, mentre x_2 è il risultato della singola misura della seconda sequenza.

Sebbene la presenza di un errore di posizionamento consenta una maggiore tolleranza in questa fase, è comunque presente un limite su A_{rep} al di fuori del quale la misura non viene più considerata affidabile; pertanto, per consentire un maggiore controllo, viene fissata sul tavolo la stampa di un goniometro, sulla quale il CNE è poi regolato. (Figura 3.6)

Nell'eventualità che, anche servendosi della stampa per il corretto piazzamento, i valori misurati continuino a differire troppo, è opportuno accertare le condizioni del CNE mediante un test di stabilità, descritto nell'Appendice A.

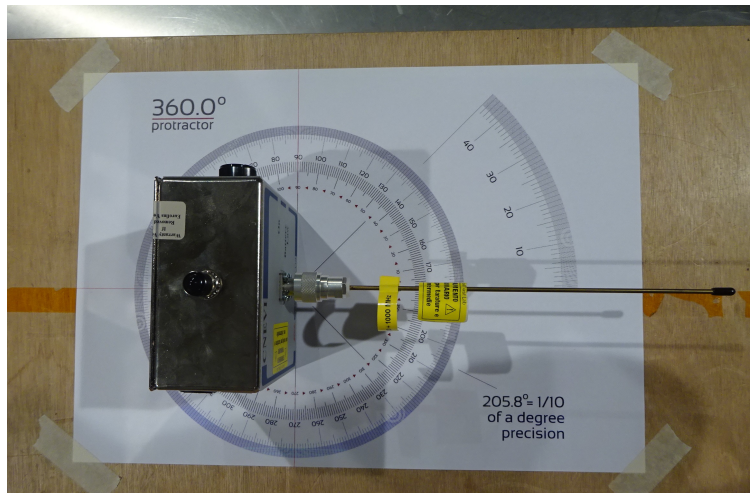


Figura 3.6: Posizionamento su goniometro stampato
Cortesia di [13]

Capitolo 4

Risultati sperimentali

Le due procedure sono testate sull'AUT ad intervalli periodici, inizialmente inferiori ai sei mesi stabiliti dal DT-08, per verificare la loro efficacia.

4.1 Risultati misura VSWR

La verifica per misura del VSWR viene ripetuta due volte, denotate per semplicità come M1 ed M2, a distanza di un mese e mezzo l'una dall'altra.

1. La misura M1 produce un risultato molto simile al riferimento presente nel certificato di taratura dell'antenna, con una lieve differenza nella posizione del massimo. (Figura 4.1)

L'incertezza totale sulla misura, ricavata secondo i calcoli presenti nel Capitolo 2, è 1,24 dB, valore accettabile in quanto minore del limite 6,3 dB posto dalla norma. Considerando poi tale valore come U_1 e combinandolo con quello nel certificato di taratura, la condizione di idoneità è soddisfatta. (Figura 4.2)

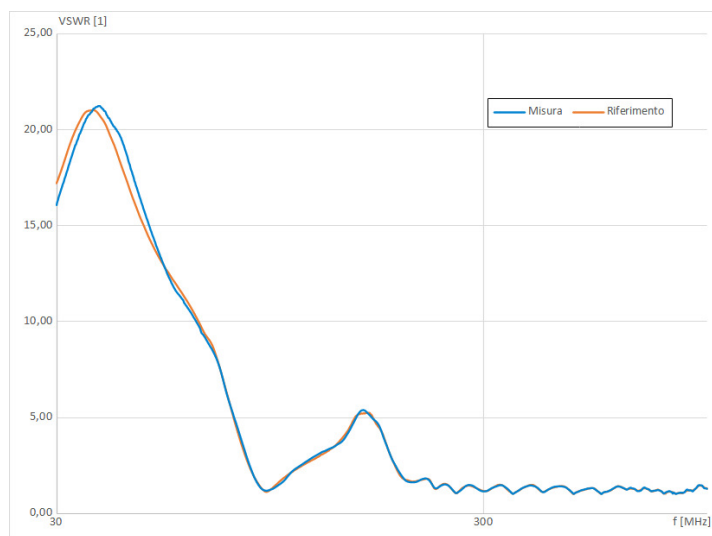


Figura 4.1: Confronto grafici VSWR per M1: in blu misura in laboratorio,
in arancione grafico taratura

Cortesia di [13]

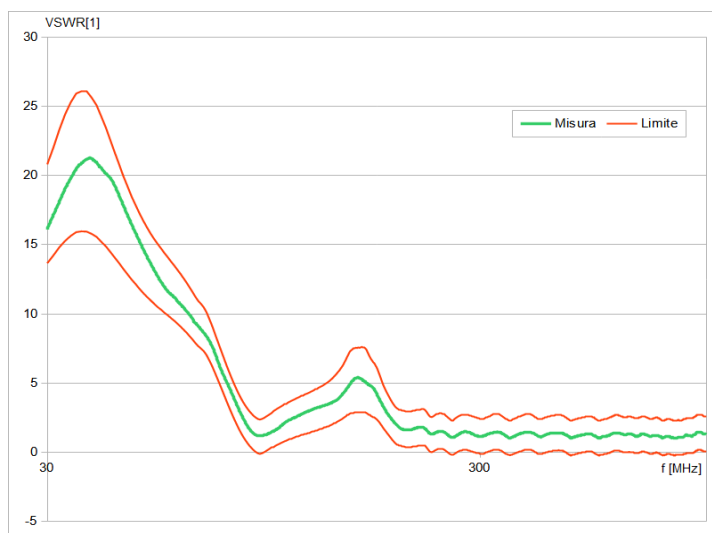


Figura 4.2: Verifica idoneità VSWR per M1: in verde misura in laboratorio,
in rosso limiti da rispettare

Cortesia di [13]

2. Il grafico della misura M2 risulta più distante dal riferimento rispetto a M1, con un picco dall'andamento più stabile, ma valore maggiore. (Figura 4.3)

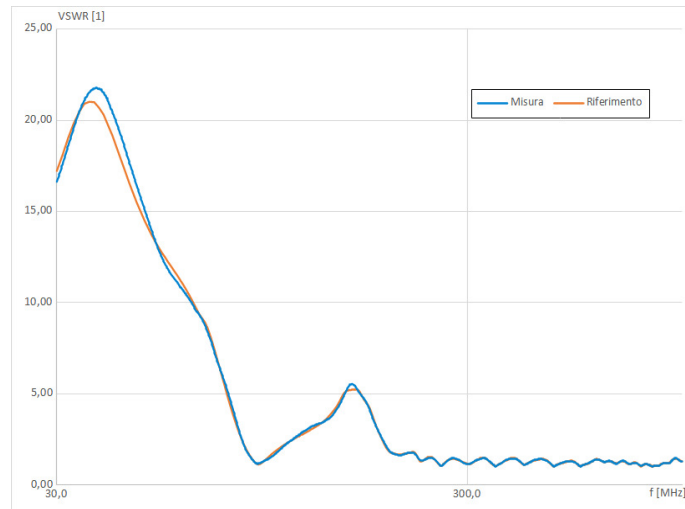


Figura 4.3: Confronto grafici VSWR per M2: in blu misura in laboratorio, in arancione grafico taratura

Cortesia di [13]

Notando tali differenze, si ripete la misura ruotando l'indicatore del centro di fase dell'antenna in modo da orientarlo verso il basso. Il VSWR ricavato è più simile a quello di M1 in quanto presenta una lieve oscillazione ed un valore minore nella zona di picco: si deduce che M1 è stata effettuata con l'indicatore rivolto in basso (Figura 4.4).

Data la maggiore instabilità, il risultato di questa seconda misura viene scartato, e l'idoneità dell'antenna è verificata impiegando il primo.

A fronte della discrepanza scoperta, si decide di effettuare ogni successiva verifica nelle stesse modalità della prima misura, con l'indicatore rivolto in alto, e di modificare opportunamente l'Istruzione Operativa.

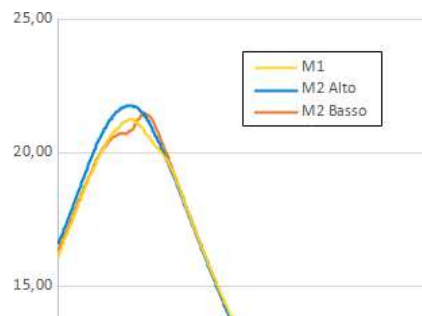


Figura 4.4: Zone di picco delle misure effettuate
Cortesia di [13]

La taratura del Cal Kit è stata aggiornata nell'intervallo tra le due misure, e con essa le rispettive incertezze, ma l'influenza di queste ultime è minore, perciò il valore di U_{lab} rientra ancora nel limite U_{cisp} e la condizione di idoneità è ancora soddisfatta. (Figura 4.5)

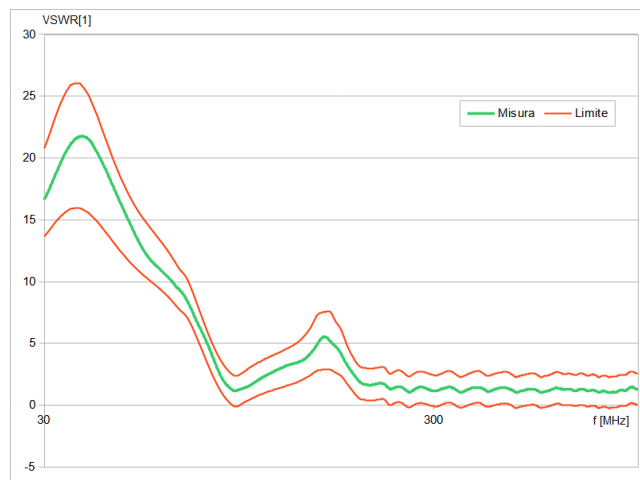


Figura 4.5: Verifica idoneità VSWR per M2: in verde misura in laboratorio,
in rosso limiti da rispettare
Cortesia di [13]

4.2 Risultati misure con CNE

La verifica per misura delle emissioni irradiate viene ripetuta per tre volte, denotate per semplicità come P1, P2 e P3, a distanza rispettivamente di due settimane dopo P1 e tre settimane dopo P2.

1. La prova P1 è effettuata spostando il CNE senza l'ausilio del goniometro, ed alcune delle misure sono ripetute e sostituite in quanto troppo diverse dal resto del gruppo. A seguito delle correzioni, sono eseguiti i calcoli descritti nel Capitolo 3, ed i limiti di ripetibilità sono soddisfatti per ogni frequenza. (Figura 4.6)

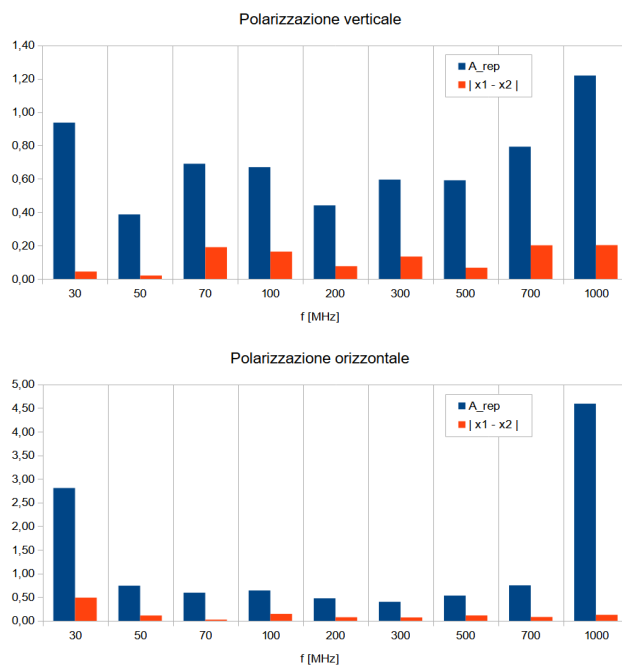


Figura 4.6: Verifiche ripetibilità in doppio per P1: in blu limite da rispettare, in arancione scostamento tra i due gruppi

Cortesia di [13]

L'ampiezza dell'intervallo risulta maggiore agli estremi della banda di frequenze considerata: in prossimità di 30 MHz, l'elevato VSWR della parte biconica genera una maggiore instabilità nella ricezione, mentre avvicinandosi a 1 GHz la minore lunghezza d'onda del segnale fa sì che un uguale spostamento del CNE produca una variazione significativa nel campo elettrico misurato.

2. Dopo l'aggiunta del goniometro, viene effettuata la prova P2 al fine di verificarne l'utilità: il CNE è allineato perfettamente seguendo le indicazioni sulla stampa, il che si traduce in una ripetibilità drasticamente inferiore. L'effetto dello spostamento del CNE sulle misure viene rimosso, con ripercussioni evidenti soprattutto alle frequenze più alte, in cui esso era più evidente. Inoltre, data la presenza di una cuspidè nel grafico delle misure di P1, sono aggiunti nuovi punti di misura di quasi-picco nella regione interessata, e quelli già esistenti sono spostati leggermente. (Figura 4.7)

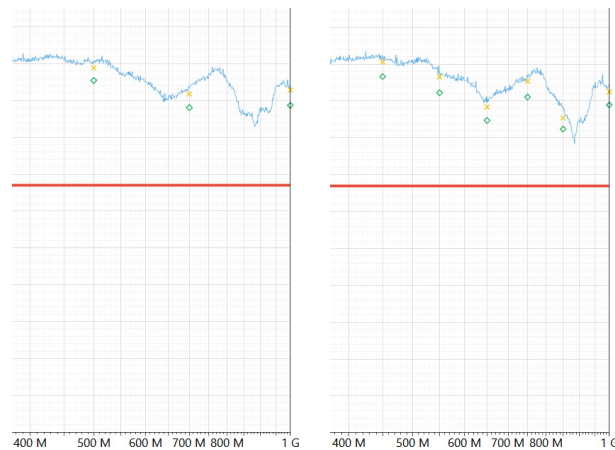


Figura 4.7: Punti di misura QP lungo la cuspidè prima (a sinistra) e dopo (a destra)

Cortesìa di [13]

Come conseguenza dell'allineamento, i limiti sono superati nella maggior parte dei gruppi, ed i rari casi in cui sono rispettati si trovano a frequenze inferiori, di nuovo a causa dell'elevato VSWR dell'AUT. (Figura 4.8)

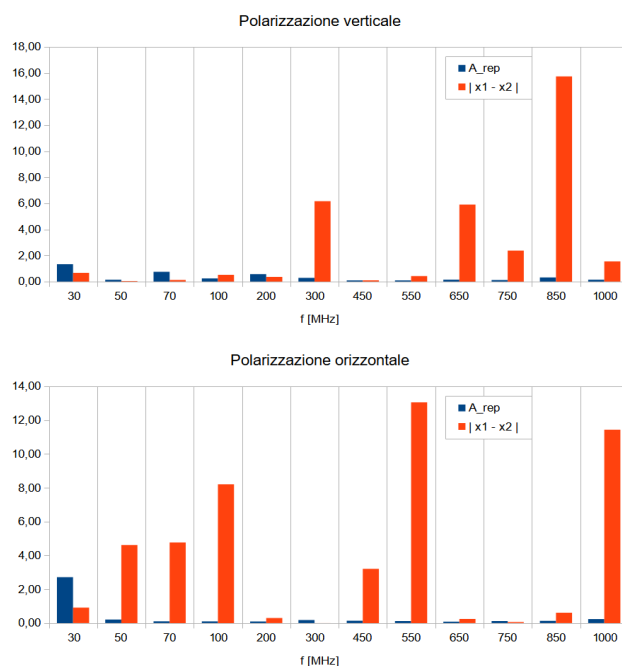


Figura 4.8: Verifiche ripetibilità in doppio per P2: si nota un limite estremamente basso, ed uno scostamento al contrario elevato
Cortesia di [13]

Tra P2 e P3, viene effettuato il test di stabilità del CNE accennato nel Capitolo 3 a seguito di dubbi sul livello del suo segnale: l'esito è positivo, e l'apparecchio viene ritenuto utilizzabile senza variazioni eccessive dell'emissione.

3. La prova P3 fa uso del goniometro, ma unicamente per evitare spostamenti eccessivi del CNE. Gli allineamenti sono resi imperfetti come in P1, risultando in una maggiore ripetibilità senza bisogno di ripetizioni delle singole misure, e di conseguenza tutti i risultati ottenuti rientrano nel valore di A_{rep} . (Figura 4.9)

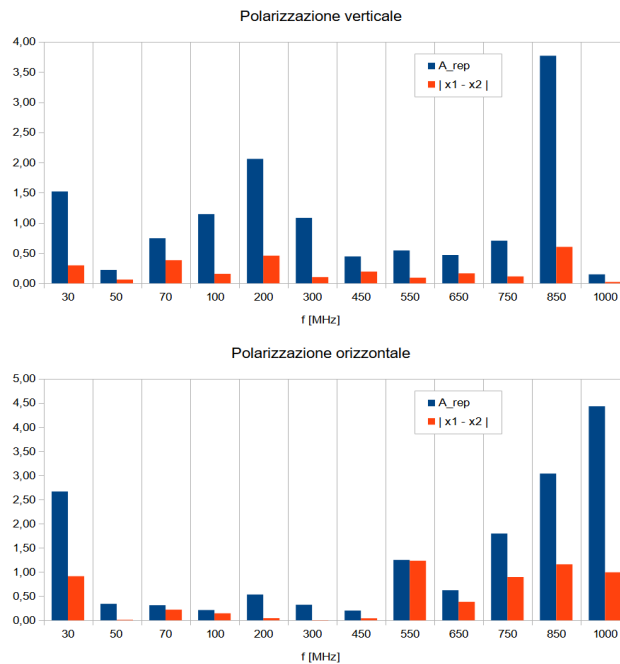


Figura 4.9: Verifiche ripetibilità in doppio per P3: il limite è di nuovo soddisfatto e lo scostamento è nella norma

Cortesìa di [13]

4.3 Valutazione complessiva

A seguito dei calcoli, la maggior parte delle verifiche ha dato esito positivo.

Il metodo di misura del VSWR è risultato efficace, anche nella condizione di minore stabilità della misura; la prova di ripetibilità è al contrario fallita in un caso, ma a causa di una scelta volontaria che è stata in seguito corretta, piuttosto che ad un errore nell'esecuzione.

Dopo aver constatato la validità delle procedure tramite questi primi test, esse vengono riportate nelle rispettive Istruzioni Operative per ripetizioni future.

Conclusione

In questo elaborato, sono state presentate due soluzioni per l'accertamento dell'idoneità del balun. I metodi sono risultati di semplice esecuzione ma al contempo efficaci, in quanto le grandezze da essi misurate, e le successive analisi di queste, hanno fornito indicazioni chiare sullo stato dell'antenna:

- La misurazione del VSWR, essendo confrontata con quella del certificato di taratura, valuta l'accuratezza del balun rispetto alla caratteristica di riferimento, verificando quindi se le prove effettuate con l'antenna continuano a fornire risultati simili ai valori reali;
- La prova in doppio, consistendo in più ripetizioni della stessa misurazione, valuta invece la precisione dell'antenna, e consente perciò di accertarsi che essa rimanga stabile durante prove di durata prolungata.

Nonostante i requisiti del DT-08 specificchino la sufficienza di un'opzione, la scelta di testarle entrambe garantisce la presenza di un'alternativa in caso di mancanza delle apparecchiature richieste per l'altra, ed offre una maggiore scelta a seconda della situazione.

Grazie alle Istruzioni Operative compilate con tali metodi, il laboratorio sarà in grado di tenere sotto controllo l'antenna in modo migliore, e di conseguenza gestire il suo impiego con maggiore efficienza, riducendo al contempo i costi legati ad essa.

Appendice A

Test di stabilità del Noise Emitter

A.1 Configurazione setup

Il test viene effettuato tra le prove P2 e P3 della verifica del balun, per accertarsi del corretto livello di output del Noise Emitter.

Per questo processo, il CNE è connesso direttamente all'Analizzatore di Spettro. Trattandosi di una valutazione della stabilità del segnale in modo generale, le emissioni analizzate sono quelle condotte, di più semplice rilevazione: per questo motivo, il cavo di tra i due dispositivi è collegato al CNE tramite lo stesso connettore utilizzato dall'antenna per le emissioni irradiate. In caso di eccessiva potenza del segnale emesso, è consentito l'utilizzo di attenuatori tra CNE e cavo in modo da non danneggiare il ricevitore.

L'emettitore è impostato nello stesso range di frequenze $30 \text{ MHz} \div 1 \text{ GHz}$, e dal software viene avviato il processo di misura condotta. Quest'ultimo segue la modalità di funzionamento della misura irradiata, con misure di picco nell'intera banda e di quasi-picco a specifiche frequenze, ma è ripetuto una sola volta per ogni campione, non dovendo considerare due polarizzazioni diverse. (Figura A.1)

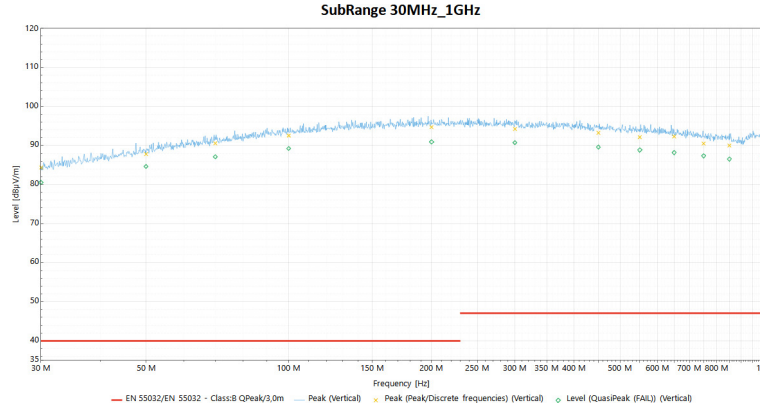


Figura A.1: Andamento di una misura condotta, che risulta più uniforme di quella irradiata
Cortesia di [13]

L'esecuzione del test prevede che il CNE rimanga acceso per un tempo prolungato, e che siano effettuate misure ad intervalli regolari. Dopo un numero sufficiente di ripetizioni, il dispositivo viene spento e scollegato.

A.2 Analisi dei dati

Analogamente alla verifica del balun, i valori ottenuti sono raggruppati in base alla frequenza, e per ogni gruppo si eseguono le seguenti operazioni:

- Conversione dei risultati r_i da $\text{dB}/\mu\text{V}$ a V, mediante la formula:

$$r_i[\text{V}] = 10^A, \quad \text{in cui} \quad A = \frac{r_i[\text{dB}\mu]}{20} - 6 \quad (19)$$

- Calcolo della media aritmetica r_{AVG} tra i vari r_i ;
- Calcolo del distacco di ciascun r_i dalla media, in dB:

$$d_i = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{r_i}{r_{AVG}}\right) \quad (20)$$

- Ottenimento del distacco massimo all'interno del gruppo, in modulo:

$$d_{MAX} = \max\{|d_i|\} \quad (21)$$

Avendo a disposizione il catalogo del CNE utilizzato con i margini di stabilità in temperatura del segnale, la prova risulta superata se il valore di d_{MAX} in ogni gruppo rientra in tali margini.

È possibile evitare le due conversioni di unità di misura, calcolando r_i ed r_{AVG} in dB/ μ V, ma i valori ottenuti in tal modo presentano un numero minore di cifre decimali e quindi una minore accuratezza.

A.3 Risultati sperimentali

Per il test in laboratorio, il CNE è lasciato acceso per 3 ore e 10 minuti, durante cui vengono effettuate 8 misurazioni ad intervalli di 30 minuti. In seguito all'analisi, il distacco rientra nel limite di ± 1 dB riportato a catalogo per ogni frequenza analizzata, ed il test si dichiara superato. (Figura A.2)

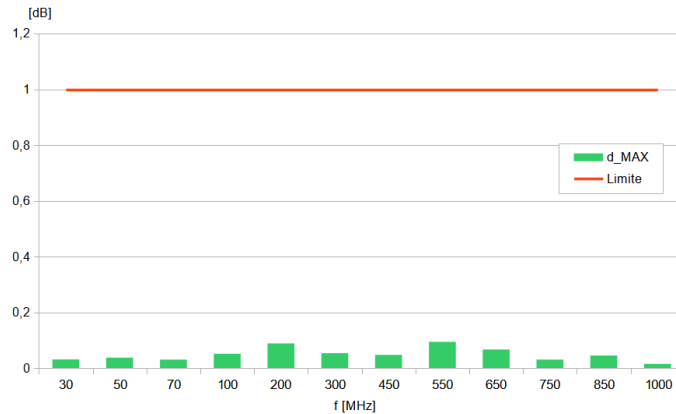


Figura A.2: Risultati della prova di stabilità CNE: ciascun valore si mantiene molto al di sotto della soglia

Cortesia di [13]

Bibliografia

- [1] Accredia, *CEI EN 55016-1-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus*, 2011.
- [2] Accredia, *CEI EN 55016-1-4: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antennas and test sites for radiated disturbance measurements*, 2012.
- [3] Accredia, *CEI EN 55016-1-5: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-5: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Antenna calibration sites and reference test sites for 5 MHz to 18 GHz*, 2015.
- [4] Accredia, *CEI EN 55016-1-6: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - EMC antenna calibration*, 2015.
- [5] Accredia, *CEI EN 55016-2-3: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 2-3: Methods of measurement of disturbance and immunity - Radiated disturbance measurements*, 2017.

- [6] Accredia, *CEI EN 55016-4-2: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling - Measurement instrumentation uncertainty*, 2012.
- [7] Accredia, *CEI EN 55016-4-2/A2: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling - Measurement instrumentation uncertainty*, 2019.
- [8] Accredia, *UNI CEI EN ISO/IEC 17025: Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura*, 2018.
- [9] Accredia, *DT-08-DL - Revisione 00: Guida per la taratura di strumenti nel settore della compatibilità elettromagnetica*, 2017.
- [10] SINAL, *DT-0002 - Revisione 0: Guida al calcolo della ripetibilità di un metodo di prova ed alla sua verifica nel tempo*, 2007.
- [11] Sona A., *Interferenze Elettromagnetiche - Effetti indesiderati e soluzioni in ambito EMC*. Lulu, 2018.
- [12] "Coaxicom - Coaxial Cable Connectors, Adapters, Attenuators, Cable Assemblies and RF Components", Online available <https://coaxicom.com>
- [13] "Came S.p.A.", Online available www.came.com
- [14] "Schwarzbeck - Mess-Elektronik", Online available <https://www.schwarzbeck.de/en/>
- [15] "Frankonia Group - EMC & Antenna Anechoic Chambers & Test Systems", Online available <https://frankonia-solutions.com/>

- [16] "Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG", Online available <https://www.rohde-schwarz.com/>
- [17] "Servizio di taratura strumenti in italia - Metrologie Srl", Online available <https://www.metrologie.it/>