Compatibilità elettromagnetica

1 Prove di emissione

La direttiva europea sulla compatibilità elettromagnetica (direttiva EMC) definisce il complesso di regole che permettono alle apparecchiature di funzionare correttamente le une vicine alle altre, specificando i limiti delle interferenze elettromagnetiche che una apparecchiatura può emettere, e indicando il livello di immunità elettromagnetica che l'apparecchio stesso deve possedere (**fig. 1**).

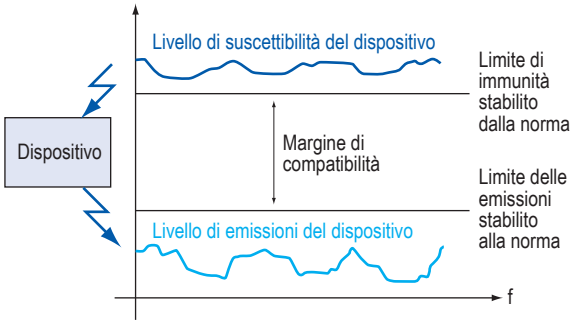


Fig. 1. *Margine di compatibilità elettromagnetica.*

Un apparecchio elettrico o elettronico, per poter essere immesso sul mercato europeo, deve soddisfare entrambi i requisiti di emissione e di immunità elettromagnetica (o suscettibilità), superando determinate prove stabilite per ottenere la certificazione EMC.

Le prove sono solitamente svolte in due fasi distinte: prove *pre-compliance* (di pre-qualificazione), effettuate in modo libero presso il laboratorio del costruttore per intervenire in tempo sui punti critici del prodotto, e prove *full-compliance*, le vere prove di qualificazione, più costose, da effettuare obbligatoriamente presso un ente certificatore riconosciuto, previa prenotazione, nel rispetto rigoroso delle norme. Per le produzioni di serie spesso le norme prevedono *prove di tipo*, ovvero la possibilità di sottoporre a prove solo un campione della serie.

La conformità di un prodotto al primo requisito della direttiva EMC, cioè al requisito di compatibilità, è verificata mediante prove di emissione condotte e radiate (**tab. 1**), rispettivamente per le apparecchiature destinate all'ambiente industriale (classe A) e per quelle destinate all'ambiente domestico/commerciale (classe B).

Tab. 1 – Alcune norme relative alle prove di emissione

Norma EN	Ambiente	Emissione
61000-3-2	Residenziale	Armoniche 50 Hz ÷ 2 kHz
61000-3-3	Residenziale	Fluttuazioni di tensione
55014	–	Potenza irradiata 30÷300 MHz
55011	Industriale	Disturbi condotti 150 kHz ÷ 30 MHz
		Disturbi irradiati 30 MHz ÷ 1 GHz
55022	Commerciale	Disturbi condotti 150 kHz ÷ 30 MHz
		Disturbi irradiati 30 MHz ÷ 1 GHz

Durante le prove, il dispositivo sotto test (EUT, *Equipment Under Test*) deve essere fatto funzionare nelle condizioni più gravose dal punto di vista delle emissioni, ricercando le situazioni peggiori su tutto l'intervallo di frequenze da analizzare.

I risultati delle prove sono confrontati con i limiti prescritti dalla norma di riferimento specifica per il tipo di apparato in esame e il dispositivo è considerato conforme solo se i livelli di emissione non superano i limiti indicati.

1.1 Emissioni condotte

I disturbi continui (non intermittenti) emessi nella banda 150 kHz÷30 MHz attraverso i cavi di collegamento (emissioni condotte) devono risultare inferiori ai limiti fissati rispettivamente dalle norme EN 55011 e 55022 (**fig. 2**).

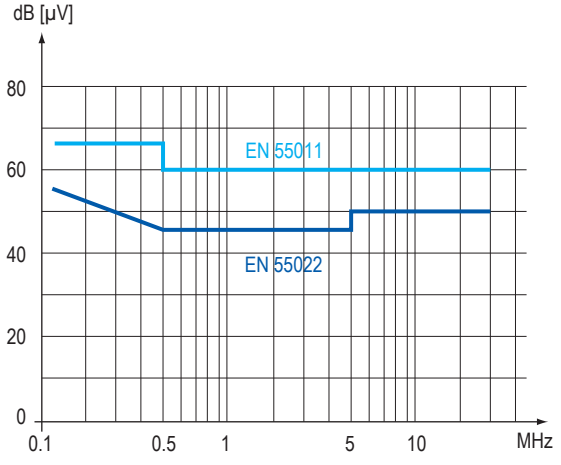


Fig. 2. *Limiti delle emissioni condotte per ambienti industriali (EN 55011) e commerciali (EN 55022).*

© E. Ferrari, L. Rinaldi, *Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni 3*, Editrice SAN MARCO

I limiti riguardano sia i disturbi presenti tra la fase e il conduttore PE (*Protection Earth*), di colore giallo-verde, sia i disturbi tra il neutro e il PE.
Il banco di prova prevede un trasformatore di isolamento che eviti l'intervento eventuale durante la prova stessa del dispositivo di protezione differenziale presente nel quadro elettrico del laboratorio, la linea artificiale (LISN, *Line ImpedanceStabilization Network*, **fig. 3**) con caratteristiche di stabilità e distorsione armonica conformi alla norma di riferimento, che protegge il dispositivo da eventuali rumori provenienti dalla rete pubblica, e un analizzatore di spettro verso il quale la LISN devia i disturbi condotti emessi dal dispositivo in esame.

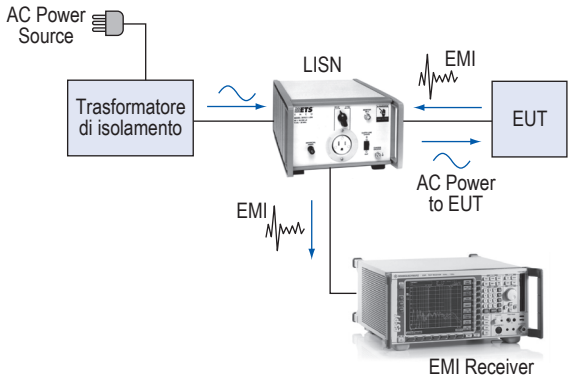


Fig. 3. *Banco di prova per le emissioni condotte.*

La norma specifica anche la disposizione e le distanze reciproche e verso il piano di massa di tutti i dispositivi coinvolti e dei cavi di collegamento (**fig. 4**).

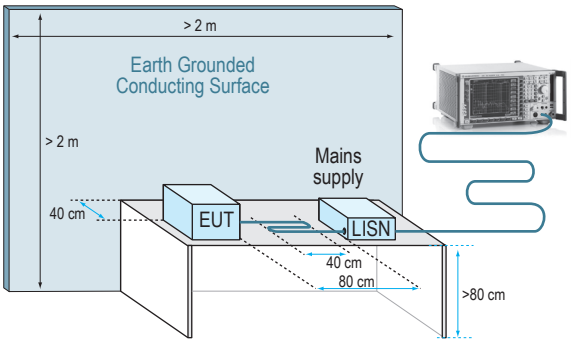


Fig. 4. *Esempio di posizionamento dei dispositivi sul banco di prova.*

1.2 Emissioni irradiate

Le emissioni irradiate sono disturbi continui (non intermittenti) che l'apparecchio emette sotto forma di campo elettromagnetico nella banda di frequenze 30 MHz ÷ 1 GHz (se la frequenza massima interna è minore di 108 MHz) o fino a 2 GHz (per frequenze interne fino a 500 MHz).

L'ambiente di prova è una camera semi-anecoica (**fig. 5**): un locale chiuso, protetto dalle interferenze elettromagnetiche esterne mediante piastrelle di ferrite e rivestita all'interno con piramidi assorbenti, per la riduzione dell'eco. All'interno della camera è posizionato un tavolo di legno girevole, su cui posizionare l'EUT, e un'antenna ricevente posta a 3 m, in grado di ruotare attorno al suo asse nelle due posizioni orizzontale e verticale, e di traslare in verticale da 1 a 4 m.

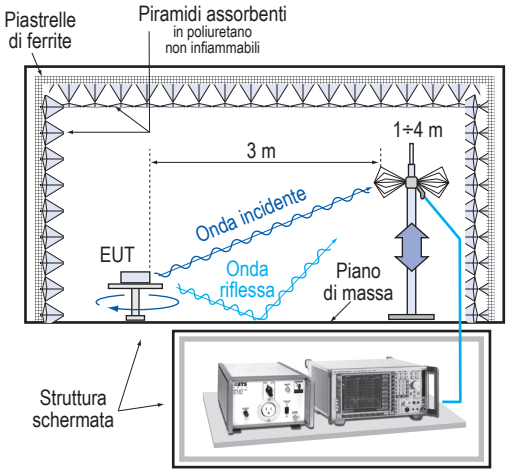


Fig. 5. *Camera semi-anecoica.*

Esternamente alla camera, un analizzatore di spettro visualizza le radiazioni captate dall'antenna e un elaboratore grafico confronta i valori con i limiti di riferimento (**fig. 6**).

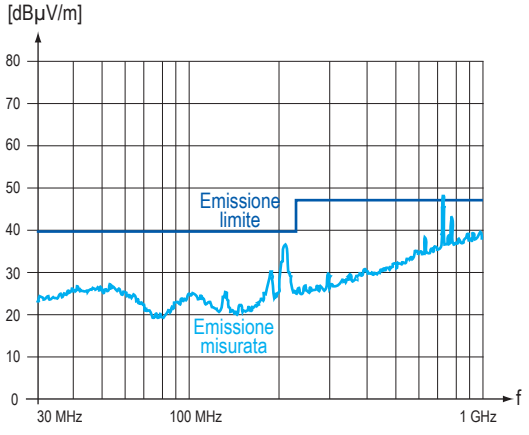


Fig. 6. *Esempio di prova di emissione non conforme.*

1.3 Emissioni dai cavi

Per tutti gli apparecchi che possono essere collegati alla rete, inoltre, l'energia di disturbo irradiata dal cavo di alimentazione e dagli altri cavi dell'apparecchio, misurata da 30 a 300 MHz deve risultare inferiore ai limiti imposti dalla norma EN 55014.

© E. Ferrari, L. Rinaldi, *Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni 3*, Editrice SAN MARCO

La misura è effettuata utilizzando una pinza assorbente (**fig. 7**), costituita da una scatola foderata con anelli ferromagnetici, attraverso la quale viene fatto passare il cavo sotto test, collegata a un analizzatore di spettro.

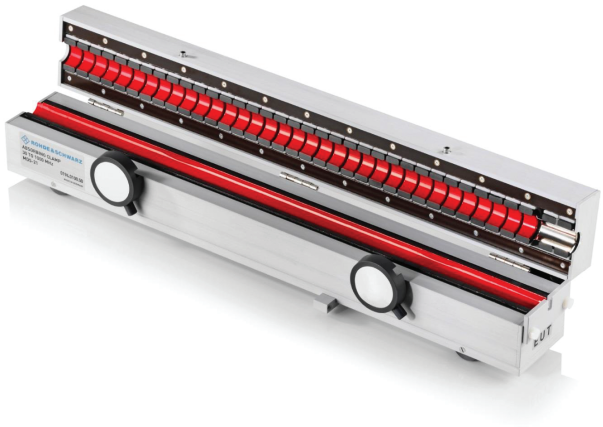


Fig. 7. *Pinza assorbente (MDS-21 Rhode & Schwarz).*

ESEMPIO 1

Durante la prova EMC di un dispositivo, relativa alle emissioni irradiate, si è ottenuto il diagramma di **fig. 6**, dal quale risulta che l'emissione eccede i limiti prescritti dalla norma in corrispondenza di 750 MHz. Poiché l'apparecchio in prova è da ritenersi non conforme, indicare una possibile origine del disturbo.

SOLUZIONE

Poiché l'energia elettromagnetica passa senza alcuna attenuazione attraverso una fessura in un piano metallico se possiede una frequenza:

$$f = \frac{c}{2\,h}$$

dove h è una delle dimensioni della finestra, si tratta di ricercare se esiste una fessura nel telaio dell'apparecchio di dimensioni:

$$h = \frac{c}{2 \cdot f} = \frac{3 \cdot 10^8\ m}{2 \cdot 750\ MHz} = 20\ cm$$

In tal caso si può ricorrere a vernici conduttive sulle guarnizioni, se si tratta di una portella, o a schermature interne di secondo livello se si tratta di uno scasso.

2 Prove di immunità

Il secondo requisito della direttiva EMC riguarda le prove di immunità alle interferenze elettromagnetiche (EMI), necessarie a verificare il livello di suscettibilità di un prodotto ai disturbi provenienti dalla rete di alimentazione, alle scariche elettrostatiche ricevute per contatto con il corpo di una persona, agli impulsi indotti dalle scariche atmosferiche e dagli archi elettrici in genere (**tab. 2**).

Tab. 2 – Norme principali relative alle prove di immunità

Norma EN	EMI
61000-4-2	Scariche elettrostatiche (ESD)
61000-4-3	Campi EM irradiati
61000-4-4	Impulsi provocati da archi elettrici (burst)
61000-4-5	Impulsi provocati dalle scariche atmosferiche (surge)
61000-4-6	Correnti indotte sui cavi di collegamento
61000-4-11	Disturbi dalla rete di alimentazione

Le prove vanno effettuate nelle condizioni di funzionamento più critiche. Il risultato da ottenere non consiste in una misura o un grafico, ma semplicemente in un'osservazione del comportamento corretto oppure degradato dell'EUT sia durante sia al termine dell'applicazione del disturbo, per la corretta determinazione della categoria di classificazione del dispositivo nei confronti dell'immunità (**tab. 3**).

Tab. 3 – Classificazione degli apparati per gradi di immunità

Cat.	Comportamento				
	prima	durante	dopo	danno	ripristino
A	ok	ok	ok	–	
B	ok	con degrado	ok	–	
C	ok	con degrado	no	limitato	reset
D	ok	con degrado	no	permanente	impossibile

Il degrado nel comportamento può risultare limitato alla durata della prova (categoria B), per esempio una visualizzazione scorretta senza perdita dei dati di memoria, oppure con danno limitato e con necessità di un intervento di reset dall'esterno per il corretto riavvio (categoria C, per es. un PC commerciale), o piuttosto con un danno permanente che richiede un intervento di manutenzione per il ripristino dell'apparato (categoria D, per esempio un dispositivo usa e getta).
In ogni caso, il degrado della funzionalità dell'apparecchiatura non deve essere causa di pericolo per l'operatore o per le cose.

© E. Ferrari, L. Rinaldi, *Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni 3*, Editrice SAN MARCO

2.1 Immunità ai disturbi di rete

La fornitura di energia elettrica in Europa (230/400 V, 50 Hz), è garantita con una tolleranza del ±10%. Alterazioni superiori al ±10% rappresentano quindi dei disturbi, classificati rispettivamente *variazioni* se si tratta di fluttuazioni lente, con durata superiore ad un singolo periodo (> 20 ms), e *impulsi* se si configurano come alterazioni veloci, con durata minore di 20 ms.

I **disturbi impulsivi** si configurano come transienti veloci di tensione e corrente, di elevata intensità e di breve durata e possono essere a loro volta distinti in *surge* (ingrossamenti) e *burst* (scoppi).

I **surge** sono impulsi caratterizzati da un elevato contenuto energetico e dovuti principalmente alla commutazione di grossi carichi, a guasti nella rete e alle scariche atmosferiche, sia dirette sia indirette, che si propagano sui conduttori di rete.

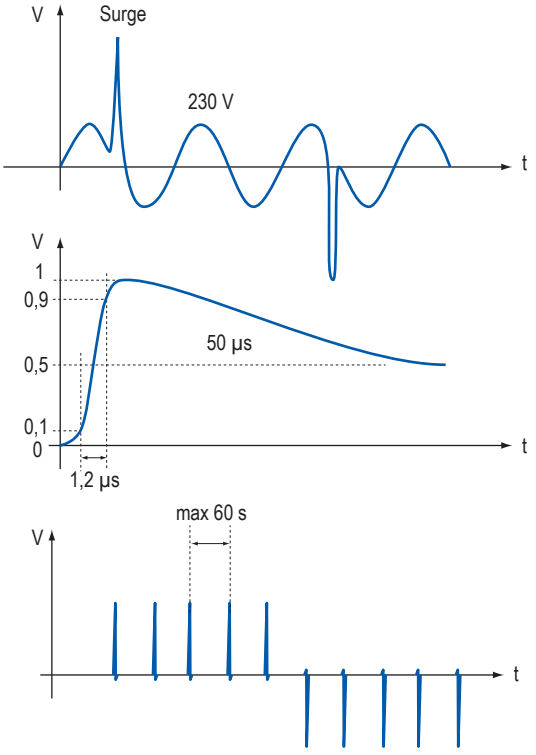


Fig. 8. *Impulsi di surge.*

La relativa prova di immunità (EN 61000-4-5) prevede di sovrapporre alla tensione di alimentazione dell'EUT una raffica di 5 impulsi positivi e 5 negativi, normalizzati 1,2/50 µs (**fig. 8**), con ampiezza legata al grado di severità specificato dalle norme di prodotto (**tab. 4**).

Lo sfasamento di applicazione degli impulsi rispetto alla tensione di rete deve essere il più sfavorevole e va ricercato. La prova va ripetuta tre volte e tra ogni coppia di conduttori (fase-neutro, fase-PE, neutro-PE).

Per la prova è necessario disporre di un apposito generatore di impulsi di rete disaccoppiato rispetto alla linea di alimentazione a monte (**fig. 9**).

Tab. 4 – Ampiezza degli impulsi di surge

Livello	Ampiezza impulso [kV]
1	0,5
2	1
3	2
4	4

Fig. 9. *Generatore di surge e burst.*

I **burst** sono raffiche ravvicinate di disturbi impulsivi a limitato contenuto energetico, dovuti per esempio alla commutazione di carichi induttivi e agli archi di apertura degli interruttori elettromeccanici.

La prova (EN 61000-4-4), prevista per tutte le apparecchiature contenenti parti elettroniche, interessa sia le linee di alimentazione AC e DC, sia le linee di controllo o segnale, se di lunghezza superiore a 3 m. La prova consiste nel sollecitare i cavi di alimentazione o i cavi dati dell'EUT con raffiche di impulsi positivi e negativi distanti tra loro 0,2 ms (f = 5 kHz), in gruppi di 15 ms (75 imp/gruppo), emessi ogni 300 ms (**fig. 10**) e per almeno un minuto (almeno 200 gruppi).

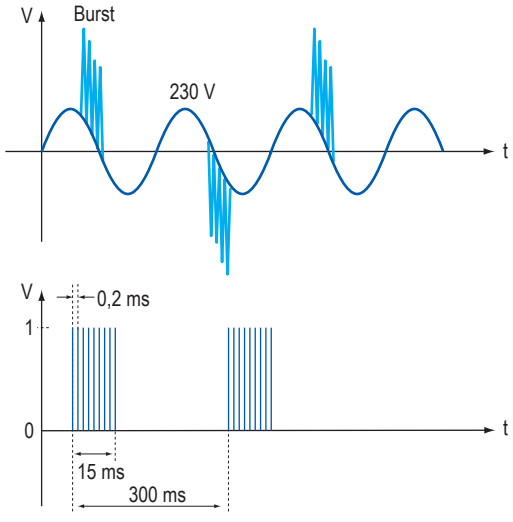


Fig. 10. *Burst.*

Gli impulsi sono molto brevi, del tipo 5/50 ns, con ampiezza (e frequenza) legata al livello di severità della prova indicato dalle norme di prodotto

© E. Ferrari, L. Rinaldi, *Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni 3*, Editrice SAN MARCO

(**tab. 5**) e vanno emessi in sincronismo con la tensione di rete, ricercando le condizioni di sfasamento più sfavorevoli.

Tab. 5 – Ampiezza degli impulsi di burst

Livello	Ampiezza impulso [kV]	f [kHz]
1	0,5	5
2	1	5
3	2	5
4	4	2,5

Come per i surge, la prova va ripetuta tre volte e tra ogni coppia di conduttori (fase-neutro, fase-PE, neutro-PE).

2.2 Pinza capacitiva

Per quanto riguarda i conduttori di comando e di segnale, i disturbi a burst vanno iniettati mediante accoppiamento capacitivo, utilizzando un apposito dispositivo con coperchio (*Capacitive Coupling Clamp*, **fig. 11**), dotato di superficie metalliche interne e lungo 1 m, all'interno del quale va alloggiato il cavo di comunicazione dell'EUT.

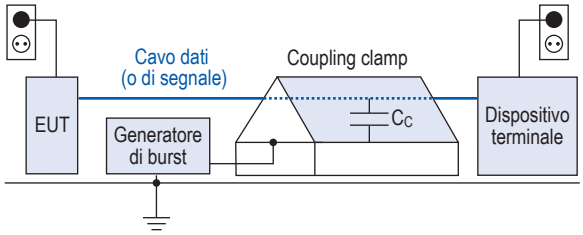


Fig. 11. *Pinza capacitiva per prove di burst sui cavi dati e di segnale.*

Una volta chiuso, le superfici metalliche del clamp, formano un condensatore di 50 ÷ 200 pF con il cavo stesso. Inserendo il generatore di surge tra il clamp e la terra, il disturbo di surge, attraversa il condensatore parassita, percorre il cavo di comunicazione e raggiunge l'EUT.

2.3 Variazioni di tensione

Sono da considerare variazioni di tensione le interruzioni, gli abbassamenti (*sag*) e gli incrementi (*swell*) della tensione di alimentazione oltre i valori contrattuali, causati in genere rispettivamente da guasti nella rete e da improvvisi allacciamenti o distacchi di grossi carichi, con durate superiori a 10 ms. Una mancanza di alimentazione con durata superiore ad alcuni periodi è detta invece buco di tensione o interruzione (*outage*); in modo simile, le variazioni di durata superiore a qualche secondo prendono il nome di *undervoltage* o *overvoltage*.
La prova di immunità alle variazioni di tensione (EN 61000-4-11) richiede l'impiego di un apposito dispositivo alimentatore in grado di generare una tensione rivolta all'EUT che contenga sia buchi di tensione, sia variazioni brusche e lente coerenti con le norme (**tab. 6** e **fig. 12**).

Tab. 6 – Variazioni della tensione di rete

Tipo di variazione	Modalità	Durata [periodi della tensione di rete]
Brusca	interruzione	0,5÷1
	riduzione del 60%	5÷10
	riduzione del 30%	25÷50
Lenta	riduzione del 60%	variazione lineare = 2 s
	riduzione del 100%	

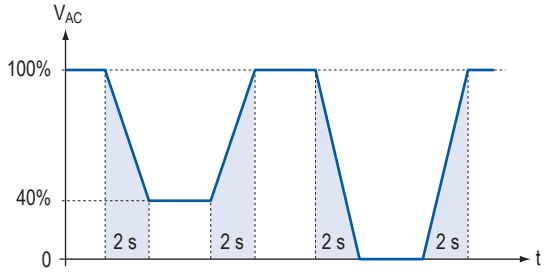


Fig. 12. *Variazioni lente della tensione di alimentazione.*

Le variazioni brusche devono essere almeno tre, distanti 10 s tra loro e con fase di innesco variabile, così da ricercare la condizione più sfavorevole.

2.4 Immunità ai disturbi irradiati

La prova di immunità ai disturbi irradiati (EN 61000-4-3) tende a verificare il grado di suscettibilità di un dispositivo ai campi elettromagnetici di frequenza compresa tra 80 MHz e 1 GHz.
Per la prova bisogna disporre nella camera semianecoica alcune piramidi assorbenti anche sul pavimento, in modo da eliminare ogni onda riflessa e permettere la formazione di un campo omogeneo in prossimità dell'EUT (**fig. 13**).
Il campo elettromagnetico di disturbo, modulato in ampiezza da un segnale a 80 kHz, con profondità 80%, è emesso da una antenna trasmittente (di tipo BiLog) posta a 3 m dal dispositivo in prova.
Vanno eseguite due prove, nelle due direzioni di polarizzazione dell'antenna (orizzontale e verticale) e con l'EUT in condizioni di funzionamento, le più gravose dal punto di vista EMC.

© E. Ferrari, L. Rinaldi, *Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni 3*, Editrice SAN MARCO

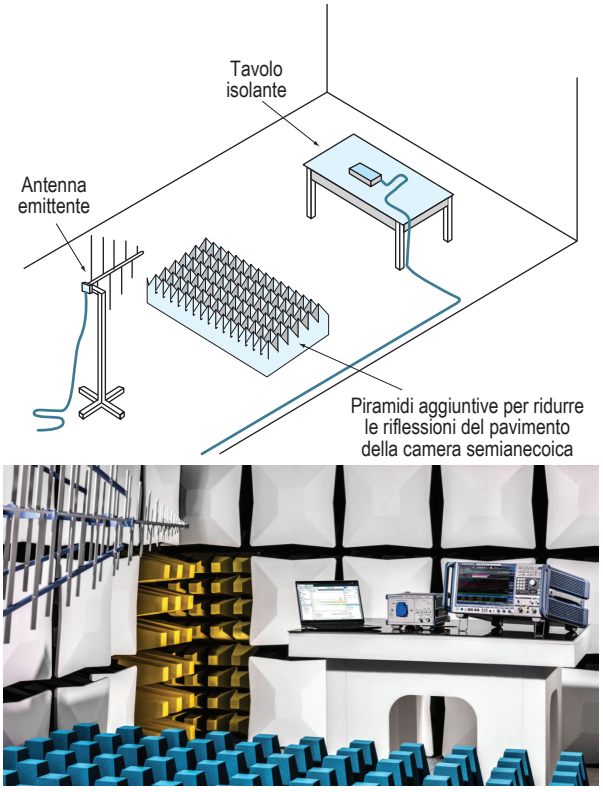


Fig. 13. *Prova di immunità ai disturbi radiati.*

2.5 Immunità alle scariche elettrostatiche

La norma EN 61000-4-2 indica le modalità di verifica del grado di immunità di un dispositivo alle scariche elettrostatiche (ESD) prodotte dal corpo umano, indicando un modello elettrico equivalente (HBM,*Human Body Model*) costituito da una capacità di 150 pF caricata a tensione elevata, con una resistenza in serie di 330 Ω.

Il dispositivo sottoposto a test (EUT) va posto su un tavolo di legno dotato di piano conduttore, poggiato a sua volta sopra un piano conduttore di riferimento, collegato al primo tramite due resistenze in serie da 470 kΩ ciascuna (**fig. 14**).

Con il dispositivo in funzione si applicano scariche elettrostatiche a contatto diretto e in aria, su tutti i punti accessibili dell'EUT e sul piano metallico di appoggio mediante una apposita pistola collegata al generatore ESD, che simula le scariche prodotte da un corpo umano.

I puntali a disposizione sono due (**fig. 15**), uno arrotondato per le prove con scarica in aria e l'altro a punta per le prove a contatto, con possibilità di bucare la vernice protettiva del contenitore.

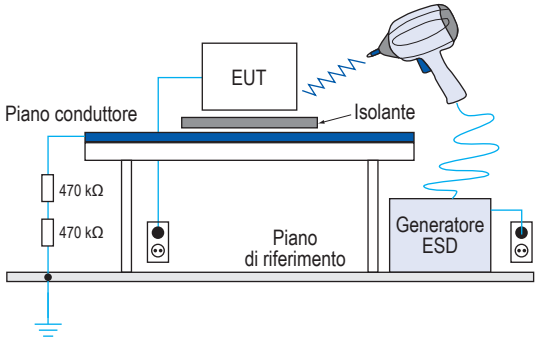


Fig. 14. *Prove ESD.*

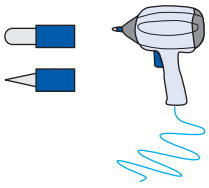


Fig. 15. *Puntali per la prova ESD.*

Il valore della tensione di scarica da adottare è legato al livello di severità previsto dalla prova (**tab. 7**)

Tab. 7 – Tensioni di scarica per prova ESD

Livello	Tensione di scarica [kV]	
	a contatto	in aria
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15

© E. Ferrari, L. Rinaldi, *Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni 3*, Editrice SAN MARCO

Compatibilità elettromagnetica — Test

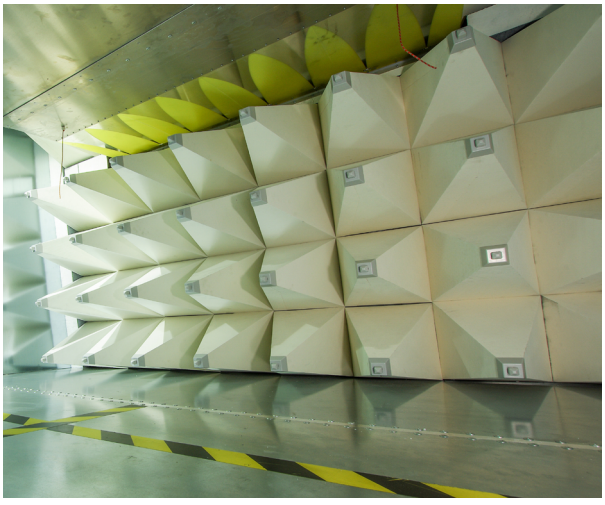
Tra le seguenti affermazioni, individua quelle corrette (V) e quelle errate (F).

1 La direttiva sulla compatibilità elettromagnetica:

1. è detta direttiva ECM V F
2. definisce il complesso di regole che permettono alle apparecchiature di funzionare correttamente le une vicine alle altre V F
3. specifica i limiti delle emissioni elettromagnetiche che una apparecchiatura può produrre V F
4. indica il livello di immunità elettromagnetica che l'apparecchio stesso deve possedere V F

2 In merito alle prove di compatibilità:

1. le prove pre-compliance sono effettuate in modo libero V F
2. le prove full-compliance sono le vere prove di qualificazione V F
3. le prove pre-compliance vanno effettuate presso un ente certificatore riconosciuto V F
4. per le produzioni di serie possono essere previste prove di tipo V F



3 Per quanto riguarda le prove di emissione:

1. per le condotte sul cavo di rete serve lo strumento LISA V F
2. le emissioni irradiate vanno misurate in camera anecoica V F
3. all'interno della camera serve un'antenna in grado di ruotare attorno al suo asse nelle due posizioni orizzontale e verticale V F
4. le emissioni dai cavi dati sono misurate mediante pinza capacitiva V F

4 In merito alle prove di immunità si può dire che:

1. verificano il livello di suscettibilità di un prodotto alle interferenze elettromagnetiche V F
2. per l'immunità ai disturbi di rete si fanno prove di surge e di burst V F
3. i conduttori di comando e di segnale vanno sottoposti a burst mediante antenna RF V F
4. sono previste anche con variazione brusca e lenta della tensione di rete V F

5 Tra le prove di immunità:

1. per la prova ai disturbi irradiati bisogna disporre nella camera anecoica ulteriori piramidi assorbenti sul soffitto V F
2. va eseguita una sola prova con l'antenna in polarizzazione orizzontale V F
3. l'immunità alle scariche elettrostatiche va verificata applicando solo scariche a contatto diretto V F
4. mediante la pistola collegata al generatore ESD si simulano le scariche ottenibili da un corpo umano V F

© E. Ferrari, L. Rinaldi, *Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni 3*, Editrice SAN MARCO