

Campioni elettromagnetici di riferimento costruiti a Firenze viaggiano in Europa – Parte B

Carlo Carobbi

Le prime esperienze di confronti di misure di compatibilità elettromagnetica

La prima importante esperienza di circuito interlaboratorio di misure di emissione radiata fu condotta fra il 2005 ed il 2006. Ci furono varie circostanze favorevoli che precedettero l'avvio dell'attività. Negli anni dal 2001 al 2004 ci fu una collaborazione fra il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica ed il Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano 'Giacinto Motta' (CESI, Milano) su misure di campi elettromagnetici e valutazione di incertezza di misura in ambito compatibilità elettromagnetica. CESI finanziò il dottorato di ricerca dell'Ing. Marco Cati (attualmente Quality & After Sales Director in Powersoft S.p.A.), che si era appena laureato discutendo una tesi di compatibilità elettromagnetica (relatore il Prof. Millanta). Nel 2003 il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica ricevette un finanziamento dall'Ente Cassa di Risparmio di Firenze per il potenziamento della propria dotazione strumentale. Nel 2005, l'Ing. Carlo Panconi avviò il dottorato di ricerca su tematiche connesse alle misure di compatibilità elettromagnetica, presso il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica e in collaborazione con Esaote S.p.A (dove, nel frattempo, l'Ing. Cati era stato assunto per assistere l'Ing. Polignano nel curare la conformità dei prodotti alle leggi e norme applicabili). Nel 2005, a seguito del trasferimento dell'Istituto di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche (IROE, CNR) da Firenze Rifredi al Polo Scientifico di Sesto Fiorentino, nella attuale sede dell'Istituto di Fisica Applicata 'Nello Carrara' (IFAC, CNR), fu completata la realizzazione della camera anecoica dell'Istituto. Nella camera anecoica di IFAC furono svolte attività di misura delle prestazioni dei materiali assorbenti in collaborazione con il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica, e predizioni di campo elettromagnetico attraverso l'impiego di simulatori numerici. I tempi erano maturi per proporre un primo circuito interlaboratorio per confrontare le prestazioni delle camere anecoiche compatte (per misure a 3 m di distanza dell'apparecchio in prova). L'idea era di confrontare le prestazioni delle camere anecoiche, senza introdurre altre

Carlo Carobbi, University of Florence, Italy, carlo.carobbi@unifi.it, 0000-0002-9274-8256

Referee List (DOI 10.36253/fup_referee_list)

FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup_best_practice)

Carlo Carobbi, *Campioni elettromagnetici di riferimento costruiti a Firenze viaggiano in Europa – Parte B*, © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0975-5.15, in Stefano Selleri, Alberto Tesi, Enrico Vicario (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 2. Ingegneria dell'Informazione*, pp. 59-64, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0975-5, DOI 10.36253/979-12-215-0975-5

cause di variabilità. Decisi quindi di far circolare nelle varie camere anecoiche operative, sparse prevalentemente nel centro-nord Italia, la strumentazione (generatore di pettine e antenna trasmittente, analizzatore di spettro e antenna biconica ricevente), accompagnata da tre ingegneri (Cati, Panconi e me) per eseguire la misura. La gamma di frequenza di interesse era compresa fra 30 MHz e 300 MHz. Il campo elettromagnetico era generato da un'antenna a stilo alimentata dalla terza versione del generatore di pettine, realizzata dall'Ing. Cati su circuito stampato (Figura 29).

Furono 14 i siti indagati di cui per brevità riporto qui solo le sigle: IFAC, OTE, RTM, GE, CISAM, ESAOTE, GALILEO (sedi di Firenze e Torino Caselle), TESEO, COREP, IMQ (sedi di Milano e Bollate), CESI, INTEK. I risultati del circuito interlaboratorio furono presentati in una riunione presso Esaote S.p.A. il 13 luglio 2006, a cui furono invitati i responsabili dei vari laboratori di prova che parteciparono all'esercizio. Fra i presenti ricordo oltre ai padroni di casa, Polignano e Cati, Marco Bini e Cristiano Riminesi (IFAC – CNR), Alessandro Agostini, Lorenzo Pozzi e Paolo Ignesti (GE Transportation Systems), Cecilia Cantaluppi (IMQ), Anna Baruzzi (INTEK), Claudio Tredici (GALILEO AVIONICA), Andrea Scotti (RTM) e Nicola Spillantini (CISAM). I risultati dell'attività, oltre ad avere valore scientifico (Carobbi, Cati, Panconi 2009), avevano valore pratico per i laboratori di prova che trovavano nella dispersione fra i risultati di misura un'indicazione quantitativa del contributo della camera anecoica all'incertezza di misura in quella gamma di frequenza. In quella stessa riunione proposi di avviare un successivo circuito interlaboratorio in cui venisse fatta circolare solo la sorgente di campo elettromagnetico in modo da comprendere nella variabilità osservata oltre al contributo della camera anecoica anche quello della strumentazione di misura e del personale del laboratorio partecipante. La proposta fu accolta con entusiasmo dai rappresentanti dei laboratori di prova. I risultati di questo secondo circuito interlaboratorio furono presentati ancora in Esaote S.p.A. il 12 dicembre 2007. La partecipazione dei rappresentanti dei laboratori fu ancora più numerosa che nel precedente incontro del 2006. Alla precedente lista di partecipanti si aggiunsero infatti l'Ing. Walter Savio, del Centro Ricerche FIAT, l'Ing. Alessandro Tacchini, di Reggio Emilia Innovazione, l'Ing. Domenico Capriglione, dell'Università di Cassino, l'Ing. Enrico Boni, dell'Università di Firenze.



Figura 29 – Terza versione del generatore di pettine, realizzato dall'Ing. Cati mentre in Esaote S.p.A.

Le prove valutative di misure di compatibilità elettromagnetica

Il Prof. Millanta andò in pensione nel 2006 e scomparve purtroppo poco tempo dopo, il 3 agosto 2009. Il Prof. Millanta era molto noto nell'ambiente della compatibilità elettromagnetica, sia a livello nazionale che internazionale, in ambito scientifico e normativo. Mi era evidente che non dovevo limitarmi a coltivare la compatibilità elettromagnetica solo dal punto di vista scientifico, in Università, ma dove la si 'faceva' a livello professionale. Per orientare la ricerca sugli aspetti applicativi delle misure di compatibilità elettromagnetica decisi nel 2009 di candidarmi sia come membro del Comitato Tecnico 210 del Comitato Elettrotecnico Italiano, sia come ispettore del Sistema Nazionale di Accreditamento dei Laboratori di Prova (SINAL, oggi ACCREDIA). Entrambe queste candidature furono accolte (di questo sono in debito con il Dott. Domenico Festa per CEI, e con l'Ing. Michele Borsero dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica – INRIM – e l'Ing. Amerigo Cancellieri per SINAL). Venni quindi coinvolto sia nello sviluppo delle norme di compatibilità elettromagnetica, sia nell'accREDITAMENTO dei laboratori di prova alla norma ISO/IEC 17025. In particolare, presidei il sotto-comitato 210/77 B del CEI per nove anni (dal 2011 al 2019, segretario l'Ing. Giancarlo Borio di COREP, Politecnico di Torino). Inoltre, come ispettore tecnico SINAL, negli anni sono stato incaricato dell'accREDITAMENTO e sorveglianza di, sostanzialmente, tutti i laboratori che eseguono prove di compatibilità elettromagnetica in Italia, gran parte dei quali partecipano alle riunioni dei comitati tecnici del CEI. Ciò mi diede molta visibilità in ambito industriale e mi consentì di guadagnare la fiducia dei laboratori di prova. I tempi erano quindi maturi per proporre dei circuiti interlaboratorio finalizzati a valutare la 'competenza' dei laboratori di prova, le cosiddette 'prove valutative'. La partecipazione alle prove valutative è un requisito a cui i laboratori devono attenersi per l'accREDITAMENTO alla norma ISO/IEC 17025. L'esito della partecipazione è un giudizio circa la validità del risultato di misura fornito dal laboratorio. Essenzialmente, la validità del risultato di misura dipende dallo scostamento fra il valore misurato dal laboratorio ed il valore di riferimento assegnato al campione itinerante. Un esito negativo richiede, per il mantenimento dell'accREDITAMENTO, un'azione correttiva da parte del laboratorio.

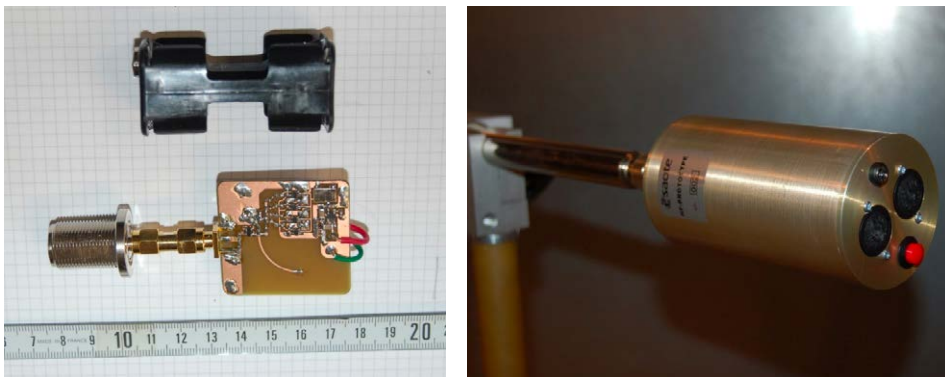


Figura 30 – Circuito della quarta versione del generatore di pettine, in (a), ed il suo contenitore cilindrico, in (b).

La prima prova valutativa proposta fu la misura delle emissioni irradiate nella gamma di frequenza fra 200 MHz e 3000 MHz. Fu impiegata come sorgente del campo elettromagnetico di riferimento la combinazione di un generatore di pettine (la quarta

versione basata su Wyatt, Chaney 1991) inserito in un contenitore cilindrico (una forma semplice da simulare con un simulatore elettromagnetico) e di dimensioni contenute (quindi pratico da trasportare), e di un'antenna log-periodica commerciale tarata (il cui fattore di taratura fu verificato con il simulatore elettromagnetico). La quarta versione del generatore di pettine fu realizzata dall'Ing. Boni (attualmente Prof. Associato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione), si veda la Figura 31. La spaziatura delle righe del generatore di pettine era 20 MHz e la potenza generata a ciascuna riga ed il coefficiente di riflessione in uscita furono misurati all'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM, Torino) grazie alla preziosa disponibilità dell'Ing. Michele Borsero e del P.I. Giuseppe Vizio.

L'avvio dell'attività fu preceduto da un incontro tecnico con i laboratori di prova sul tema «Prove valutative nell'ambito della compatibilità elettromagnetica», organizzato presso il plesso didattico 'Morgagni' dell'Università di Firenze il 16 maggio 2012. Relatori di quest'incontro furono, oltre a me, l'Ing. Cati (Esaote S.p.A.) e l'Ing. Borsero (INRIM). Parteciparono all'incontro i rappresentanti di 13 laboratori di prova italiani (CESI, LACE-COREP, IMQ, INTEK, REINNOVA, ELETTRA, TESEO, CMC, CREIVEN, TUV SUD ITALIA, EQI, EMILAB, CELAB, BTICINO), un rappresentante di ACCREDIA, Dipartimento dei laboratori di taratura (l'Ing. Giulia Suriani) ed esperti italiani di compatibilità elettromagnetica, fra cui ricordo con piacere il P.I. Vittorio Ormezzano (ex Galileo Ferraris, ed ex Olivetti). Alla prova valutativa parteciparono 15 laboratori, di cui quattro con due siti di prova. I risultati della prova valutativa furono presentati ad Esaote S.p.A. il 12 giugno 2013. A questo incontro parteciparono i rappresentanti di 11 laboratori di prova. Oltre ai risultati della prova valutativa di emissione irradiata nella gamma 200 MHz – 3000 MHz presentai la successiva prova valutativa nella gamma di frequenza 30 MHz – 1000 MHz. Due aspetti tecnici fondamentali caratterizzavano le prove valutative: il fatto che i campioni fossero tarati attraverso l'impiego di misure (condotte presso INRIM) e simulazioni elettromagnetiche (eseguite presso il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica) e la possibilità di partecipazione da parte di laboratori di prova con siti aventi caratteristiche diverse (camere completamente anecoiche per misure a 3 m e camere semianecoiche per misure a 3 m e a 10 m). Queste caratteristiche tecniche delle prove valutative offerte dall'Università di Firenze erano assolutamente originali (Carobbi et al. 2014; 2016) e consentivano la partecipazione a tutti i laboratori di prova in grado di eseguire le misure radiate.

Notevole impulso alle prove valutative di compatibilità elettromagnetica dell'Università di Firenze fu dato grazie al dottorato di ricerca dell'Ing. Alessio Bonci (dottorando di ricerca dal 2012 al 2014), tutt'oggi collaboratore del Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica. L'Ing. Bonci svolse l'attività di dottorato di ricerca sulle prove valutative di compatibilità elettromagnetica e progettò, simulò e realizzò (con il supporto, sulla meccanica dell'antenna, del P.I. Ismano Semboloni) un'antenna biconica compatta, Figura 31(b), per impiego come campione itinerante. L'antenna conteneva al suo interno la quinta, ed attuale versione del generatore di pettine, Figura 31(a), operante nella gamma di frequenza da 50 MHz a 6 GHz con spaziatura delle righe spettrali di 50 MHz. La quinta, come la quarta versione del generatore di pettine, fu sviluppata dal Prof. Boni. Dettagli tecnici sul generatore di pettine, l'antenna biconica compatta e la sorgente di riferimento ottenuta dalla loro integrazione sono riportati in Bonci, Boni, Carobbi (2021).

La sorgente di riferimento fu caratterizzata ampiamente dal punto di vista elettromagnetico, anche attraverso un lavoro di tesi comprendente simulazioni elettromagnetiche con due simulatori commerciali (basati su principi indipendenti: il Metodo dei

Momenti e il Metodo delle Differenze Finite nel Dominio del Tempo) e una campagna di misure all'INRIM (Guadagnoli 2018).

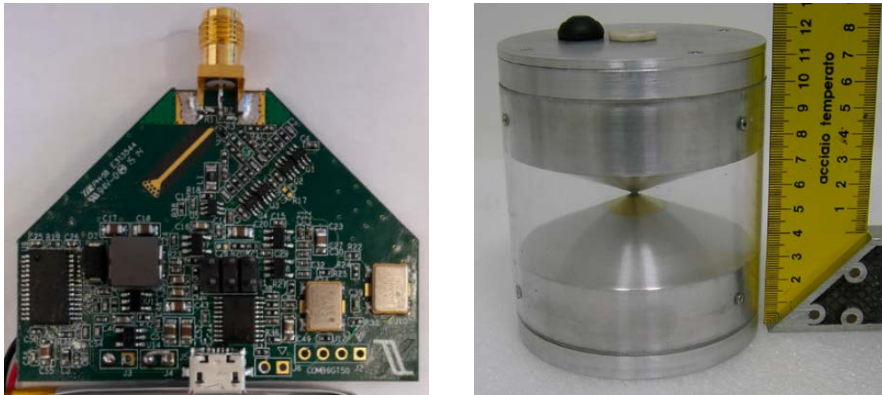


Figura 31 – La quinta, ed attuale, versione del generatore di pettine, (a), e la prima antenna biconica compatta in cui fu inserito, (b).

Con la collaborazione con l'Ing. Bonci, proseguita attraverso incarichi professionali fino al momento in cui sto scrivendo questo articolo, le prove valutative di compatibilità hanno raggiunto un buon livello di sviluppo e varietà nell'offerta delle tecniche di misura. La narrazione infatti si è qui concentrata sulle misure di emissione irradiata, le prime ad essere sviluppate, e forse quelle di maggiore impatto, ma le tecniche di misura indagate attraverso le prove valutative sono state, oltre all'emissione irradiata fra 50 MHz e 6 GHz: la misura della tensione di disturbo nella gamma di frequenza 9 kHz – 30 MHz, la misura della tensione di disturbo nella gamma di frequenza 150 kHz – 108 MHz, la misura di emissione di armoniche di corrente nella gamma di frequenza 50 Hz – 2000 Hz, la misura di emissione radiata in ambito automobilistico (metodo ALSE) nella gamma di frequenza fra 150 kHz e 1000 MHz. Altre prove valutative sono oggi in corso di sviluppo, in particolare la misura della potenza di disturbo nella gamma di frequenza 30 MHz – 1 GHz, misura del campo magnetico di disturbo nella gamma di frequenza fra 150 kHz – 30 MHz con la tecnica della cosiddetta Large Loop Antenna.

Dal 2012 ad oggi il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica ha portato a termine 18 prove valutative a cui hanno preso parte decine e decine di laboratori in Italia e in Europa (ed anche un laboratorio negli USA del gruppo Electrolux!) e costituisce la principale fonte di sostentamento del laboratorio per il suo sviluppo strumentale. Recentemente il Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica ha ricevuto un co-finanziamento di Ateneo per l'acquisizione di una camera riverberante elettromagnetica e di apparecchiature ancillari che, senza il contributo economico derivante dalle prove valutative, non sarebbe stato possibile ottenere. Questa recente acquisizione darà sicuramente ulteriore impulso a nuove ricerche, anche interdisciplinari, nell'ambito delle misure e dell'elettromagnetismo applicato ed anche, certamente, alle prove valutative dell'Università di Firenze.

Riferimenti bibliografici

Bonci, A., E. Boni e C. F. M. Carobbi. 2021. "A Compact, Broadband, and Calculable Electromagnetic Field Source for Quality Assurance in EMC Testing." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 63(2): 335-43.

- Carobbi, C. F. M. et al. 2014. "Design, Preparation, Conduct, and Result of a Proficiency Test of Radiated Emission Measurements." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 56(6): 1251-61.
- Carobbi, C. F. M. et al. 2016. "Proficiency Testing by Using Traveling Samples with Preassigned Reference Values." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 58(4): 1339-48.
- Carobbi, C. F. M., M. Cati e C. Panconi. 2009. "Reproducibility of Radiated Emissions Measurements in Compact, Fully Anechoic Rooms—The Contribution of the Site-to-Site Variations." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 51(3): 574-82.
- Guadagnoli, A. 2018. *Caratterizzazione di una sorgente di campo elettromagnetico di riferimento attiva nella banda 50 MHz – 6 GHz per misure di emissione radiata in ambito EMC*. Tesi di laurea, Ingegneria delle Telecomunicazioni.
- Wyatt, K. e D. Chaney. 1991. "RFI Measurements Using a Harmonic Comb Generator." *RF Design*: 53-58.