



Ricerca di Sistema elettrico

Caricabatterie contactless per city car: caratterizzazione sperimentale e misure radiometriche dei campi elettromagnetici residui per la valutazione dell'esposizione occupazionale

R. Pinto, V. Lopresto, S. Mancini, C. Merla

CARICABATTERIA CONTACTLESS PER CITY CAR: CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE E MISURE RADIOMETRICHE DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI RESIDUI PER LA VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE OCCUPAZIONALE

R. Pinto, V. Lopresto, S. Mancini, C. Merla (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

Obiettivo: Componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi, per la ricarica rapida in c.a. ed in c.c.

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1. INTRODUZIONE	5
2. QUADRO NORMATIVO EUROPEO E ITALIANO PER LA PROTEZIONE DAI CAMPI ELETTROMAGNETICI DELLA POPOLAZIONE E DEI LAVORATORI	5
2.1 NORMATIVA INTERNAZIONALE ED EUROPEA.....	6
2.2 NORMATIVA ITALIANA	8
3. CARATTERIZZAZIONE DELL’IMPIANTO DI RICARICA CONTACTLESS DA BANCO	9
3.1 BANCO E PROCEDURE DI MISURA	9
3.1.1 MISURA DI INDUTTANZA SULLE SINGOLE BOBINE.....	9
3.1.2 MISURA DI INDUTTANZA SULLE SINGOLE BOBINE AFFACCIAE (SISTEMA COMPLETO).....	11
3.1.2 MISURE DI MUTUA INDUTTANZA SUL SISTEMA COMPLETO	11
3.2 RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE.....	12
3.2.1 MISURA DI INDUTTANZA SULLE SINGOLE BOBINE.....	12
3.2.2 MISURA DI INDUTTANZA SULLE SINGOLE BOBINE AFFACCIAE (SISTEMA COMPLETO).....	12
3.2.1 MISURA DI MUTUA INDUTTANZA SUL SISTEMA COMPLETO.....	13
4. VALUTAZIONE DELL’ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI RESIDUI EMESSI DALL’IMPIANTO DI RICARICA CONTACTLESS	14
4.1 BANCO E PROCEDURE DI MISURA	14
4.2 RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DELL’ESPOSIZIONE	17
5. CONCLUSIONI.....	18
APPENDICE.....	19

Sommario

I Sistemi di Trasferimento dell'Energia Elettrica Senza Contatto (STEESC) trovano sempre un maggiore impiego nelle realtà industriali, specie nel settore dei veicoli elettrici per la ricarica delle batterie. Una delle soluzioni adottate per questi sistemi prevede l'utilizzo di bobine risonanti poste a distanza di qualche cm l'una dall'altra per il trasferimento di energia. Nell'ambito della Ricerca Sistema Elettrico del 2014, l'Università di Padova ha realizzato un prototipo di STEESC che utilizza un sistema di bobine risonanti, operante alla frequenza di 85 kHz e in grado di fornire una potenza di 560 W alla batteria di una piccola citycar. Il gruppo di Bioelettromagnetismo dell' 'Unità Tecnica di Biologia delle Radiazioni e salute umana' (UTBIORAD) dell'ENEA è stato coinvolto in questo progetto per la caratterizzazione sperimentale del sistema di bobine realizzato, nonché per la valutazione del rischio derivante dall'esposizione ai campi elettromagnetici residui, emessi dal prototipo realizzato dai ricercatori dell'università coinvolti nel progetto.

La caratterizzazione sperimentale del sistema di bobine ha confermato i risultati delle simulazioni svolte dall'università di Padova in termini di induttanza e mutua induttanza delle bobine.

La valutazione dell'esposizione del personale ai campi elettromagnetici residui emessi dal prototipo finale di STEESC è stata eseguita presso l'Università di Padova. Chiunque operi in prossimità di un sistema che ha una frequenza di lavoro di 85 kHz subisce una esposizione a un campo elettromagnetico di tipo 'campo vicino', per questo motivo una caratterizzazione dello scenario espositivo passa necessariamente attraverso la misura del campo elettrico (E) e di induzione magnetica (B). Dopo un'analisi in loco dello scenario espositivo si sono decisi i punti di misura, posizionati su un piano frontale alle bobine posto a 30 cm da queste.

Dalle misure effettuate si evince la conformità dell'esposizione ai limiti imposti dalla Direttiva Europea 2013/35/EU per i lavoratori esposti ai campi elettromagnetici, sia in termini di E che di B.

I risultati ottenuti, però, conducono ad alcune considerazioni. I valori di E misurati a una distanza di 30 cm dalle bobine sono superiori ai livelli imposti dalla normativa europea e italiana per la popolazione, per questo motivo sarà necessario eseguire analoghe misure sul sistema nelle reali condizioni di utilizzo, vale a dire montato sotto l'automobile. Inoltre, saranno necessari studi di valutazione numerica del campo elettrico indotto all'interno dei corpi esposti a questo tipo di sorgente, al fine di valutare l'effettivo livello di interazione tra i campi elettromagnetici residui dello STEESC e i sistemi biologici.

Un altro sviluppo futuro riguarda le valutazioni di esposizione, numerico – sperimentali, su sistemi a potenze maggiori (qualche kW), che rappresentano il futuro per questo tipo di applicazioni. Infatti il loro impatto sull'esposizione della popolazione dovrà essere valutato ed eventuali soluzioni di schermaggio dovranno essere implementate, nella prospettiva di un impiego su larga scala di questo tipo di dispositivi.

1. Introduzione

I Sistemi di Trasferimento dell'Energia Elettrica Senza Contatto (STEESC) possono essere vantaggiosamente utilizzati per ricaricare gli accumulatori dei Veicoli Elettrici (VE) poiché offrono maggiore sicurezza e praticità dei sistemi di ricarica convenzionali. Durante il primo anno del progetto, l'Università di Padova ha progettato uno STEESC risonante destinato alla carica degli accumulatori di una city car elettrica, scelta come caso di studio. Questa tipologia di dispositivi è costituita da un sistema primario (invertitore ad alta frequenza e bobina trasmittente) e un sistema secondario (bobina ricevente, raddrizzatore ad alta frequenza con carico capacitivo che costituisce la sorgente di energia elettrica in continua per la carica degli accumulatori). Completano il STEESC il convertitore CC-CC che alimenta gli accumulatori della city car in modo controllato e il sistema di governo che esegue il controllo e la gestione del caricabatteria contactless.

Nel secondo anno l'Università di Padova ha realizzato uno STEESC con bobine risonanti operanti alla frequenza di 85 kHz, fissata dal gruppo di lavoro J2954TM dell'organizzazione Society of Automotive Engineers (SAE) International, per uniformare le frequenze di lavoro dei caricabatteria contactless. La potenza di lavoro scelta è di 600 W, in questo modo è possibile la ricarica degli accumulatori della city car a disposizione dell'Università in 8 ore.

Questo tipo di sistemi trasmette potenza attraverso la generazione di un campo elettromagnetico (CEM) che non rimane confinato nello spazio tra le bobine, allocate nella parte inferiore del veicolo; tale campo nelle immediate vicinanze delle bobine è altamente non uniforme e potrebbe eccedere i limiti normativi sull'esposizione umana. Nel caso specifico del prototipo da banco realizzato dall'Università di Padova si è resa necessaria una valutazione del rischio da esposizione ai CEM prevista dagli artt.28 e 181 del DLgs.81/2008 per la protezione dei lavoratori, che in questo caso è rappresentato dal personale che lavora al dispositivo durante il suo funzionamento.

Al momento, per questo tipo di dispositivi, non esistono procedure standardizzate per la valutazione dell'esposizione e della sua conformità ai limiti normativi fissati per i CEM. E' in corso d'opera una norma IEC che includerà i requisiti per la compatibilità elettromagnetica, la sicurezza elettrica e le caratteristiche funzionali e operative. A questi sistemi si possono ricondurre in parte gli standard IEC 62233 del 2005 "Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure " e IEC 62110 del 2009 "Electric and magnetic field levels generated by AC power systems—measurement procedures with regard to public exposure".

In questo documento viene presentata la caratterizzazione sperimentale del sistema di bobine in termini di misure di induttanza e mutua induttanza e la valutazione dell'esposizione a CEM residui del prototipo di STEESC da banco, realizzato dall'Università di Padova, la valutazione dell'esposizione è stata condotta dal personale dell'Unità Tecnica BIORAD dell'ENEA.

Nel primo capitolo verranno descritti i quadri normativi italiani e europei per l'esposizione dei lavoratori e della popolazione. Nel secondo capitolo sarà presentato il banco di misura e le procedure messe a punto per la caratterizzazione del sistema di bobine. Si forniranno, inoltre i risultati di questa caratterizzazione in condizioni operative. Nel terzo capitolo verranno descritti i metodi e i risultati della valutazione dell'esposizione ai CEM generati da prototipo da banco. In questa fase progettuale di sviluppo del prototipo la conformità sarà valutata con riferimento ai limiti stabiliti per l'esposizione dei lavoratori, anche se verrà fornito anche il confronto con i limiti per la popolazione.

2. Quadro normativo europeo e italiano per la protezione dai campi elettromagnetici della popolazione e dei lavoratori

Con il termine Radiazioni Non Ionizzanti, sinteticamente NIR, dalle iniziali della omologa definizione inglese Non-Ionizing Radiation, si indica genericamente quella parte dello spettro elettromagnetico il cui meccanismo primario di interazione con la materia non è quello della ionizzazione, infatti non essendo questo tipo di radiazioni dotato di energia sufficiente per ionizzare direttamente atomi e molecole. Alle NIR appartengono le radiazioni ottiche (300 GHz - 3×10^4 THz) e non ottiche (0 Hz - 300 GHz); queste ultime sono l'oggetto del presente capitolo.

Fanno parte dello spettro elettromagnetico delle NIR non ottiche le microonde (MW: microwave), le radiofrequenze (RF: radiofrequency), i campi elettrici (CE) e magnetici (CM) a frequenza estremamente bassa (ELF: Extremely Low Frequency), fino ai CE e CM statici.

I meccanismi di interazione dei CEM con la materia biologica accertati si traducono sostanzialmente in due effetti fondamentali: induzione di correnti nei tessuti elettricamente stimolabili, e cessione di energia con rialzo termico. Tali effetti sono definiti effetti diretti in quanto risultato di un'interazione diretta dei campi con il corpo umano.

Alle frequenze più basse e fino a circa 1 MHz, l'effetto principale di interazione è l'induzione di correnti elettriche nei tessuti elettricamente stimolabili, come nervi e muscoli. Con l'aumentare della frequenza diventa sempre più significativa la cessione di energia nei tessuti attraverso il rapido movimento oscillatorio di ioni e molecole di acqua, con lo sviluppo di calore e riscaldamento. A frequenze superiori a circa 10 MHz, quest'ultimo effetto è l'unico a permanere, e al di sopra di 10 GHz, l'assorbimento è esclusivamente a carico della cute.

Tali meccanismi sono in grado di determinare i così detti effetti acuti, che si manifestano al di sopra di una certa soglia di induzione, nei confronti dei quali esiste un ampio consenso scientifico e il quadro delle conoscenze consente di disporre di un "razionale" (cioè una base logico-scientifica) per la definizione di valori limite di esposizione che contemplino ampi margini di sicurezza tra gli stessi e le reali soglie di pericolosità.

Nel caso dello STEECS realizzato nell'ambito del progetto la frequenza di lavoro è pari a 85 kHz per cui l'effetto acuto riscontrato, se si superano le soglie stabilite, è la stimolazione elettrica di tutti i tessuti del sistema nervoso centrale e periferico all'interno del corpo, compresa la testa.

2.1 Normativa Internazionale ed Europea

Le principali organizzazioni protezionistiche internazionali hanno sviluppato un sistema di protezione dai CEM organico e ben fondato. Un autorevole riferimento è fornito dai documenti della International Commission on Non Ionising Radiation Protection (ICNIRP). Per quanto riguarda i campi variabili nel tempo, l'ICNIRP ha pubblicato nel 1998 delle linee guida per la limitazione dell'esposizione a CEM con frequenza fino a 300 GHz. Nel 2010 ha pubblicato delle nuove linee guida per i campi variabili tra 1 Hz e 100 kHz, mentre ha confermato, tramite uno statement, la validità dei contenuti delle linee guida del 1998 per le radiofrequenze e microonde (frequenze superiori a 100 kHz). Rilevanti sono anche le linee guida, emanate nel 2009, per la limitazione dell'esposizione a CM statici che aggiornano quelle precedentemente pubblicate nel 1994 e quelle del 2014 che fissa i limiti per i CM tra 0 e 1 Hz.

In tutti i documenti ICNIRP, in primo luogo, vengono definite le grandezze fisiche "dosimetriche" (*grandezze di base*) proprie dell'interazione tra i campi e i sistemi biologici. Nella banda di frequenza in cui è allocata la frequenza di lavoro dello STEECS realizzato, l'interazione dei campi con il soggetto esposto si esplica nell'induzione di correnti; in questo caso in ICNIRP 2010 (1 Hz – 100 kHz) si è definito come grandezza di base il CE indotto in situ, E_i , espresso in V/m, considerato rappresentativo degli effetti, in quanto diretto responsabile del meccanismo di elettrostimolazione a livello cellulare. Al variare della frequenza sono stati assegnati dei valori per il CE indotto che, a partire dalle soglie per gli effetti acuti e certi riscontrati in letteratura assicurano la non insorgenza di tali effetti (*limiti di base*). La conformità a questi limiti deve essere sempre assicurata.

Nella pratica, le grandezze di base non sono però direttamente misurabili nei soggetti esposti. Per verificare il rispetto dei limiti di base è necessario considerare i valori delle grandezze fisiche, proprie dei CEM, direttamente misurabili nell'ambiente. Tali grandezze sono rappresentate dalle intensità del CE (E , V/m), del CM (H , A/m) e del campo induzione magnetica (B , T). In base a modelli teorici di interazione bioelettromagnetica, successivamente validati da analisi sperimentali, vengono calcolati in condizioni di massimo accoppiamento tra i campi e il corpo esposto, i cosiddetti *livelli di riferimento* per le grandezze misurabili, che garantiscano in tutte le circostanze di esposizione il rispetto dei limiti di base. Se la conformità ai livelli di riferimento non è rispettata allora il rispetto dei limiti di base non è garantito e, quindi, si rende necessario fare delle analisi dosimetriche, numeriche o sperimentali per l'accertamento della conformità ai limiti di base. I limiti di base e i livelli di riferimento sono diversi per i lavoratori

professionalmente esposti e per la popolazione, essendo applicati per quest'ultima fattori cautelativi maggiori.

In Tabella 1 sono mostrati i limiti (in valore efficace) fissati in ICNIRP 2010 per tutte le grandezze definite nei paragrafi precedenti, relativi alla frequenza di 85 kHz.

	E_{interno} (limite di base) [V/m]	E (livello di riferimento) [V/m]	B (livello di riferimento) [μT]
popolazione	11.5	83	27
lavoratori	22.9	170	100

Tabella 1: limite di base e livelli di riferimento alla frequenza di 85 kHz stabiliti in ICNIRP 2010

In Europa è stata promulgata dal Consiglio dell'Unione una *Raccomandazione relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 a 3000 GHz nel 1999 (1999/519/CE)*, che recepisce per intero le linee guida stabilite in ICNIRP 1998. In queste linee guida, e quindi anche nella Raccomandazione del 1999, la grandezza di base tra 1 Hz e 100 kHz è la densità di corrente J (A/m^2) indotta dall'esposizione, ovvero la quantità di corrente che fluisce attraverso una sezione unitaria di tessuto. Il livello di riferimento per il campo B, per la popolazione, è decisamente più basso di quello stabilito nelle linee guida ICNIRP del 2010, che tengono conto degli ultimi dati scientifici a disposizione, riportati in Tabella 2.

	J (limite di base) [mA/m^2]	E (livello di riferimento) [V/m]	B (livello di riferimento) [μT]
popolazione	170	87	6.25

Tabella 2: grandezze di base e livelli di riferimento alla frequenza di 85 kHz stabiliti in 1999/519/CE

Per quello che riguarda la protezione dei lavoratori il 26 giugno 2013 è stata approvata la nuova *Direttiva 2013/35/UE del parlamento europeo e del consiglio sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici)*. Gli Stati membri dovranno conformarsi alla direttiva entro il primo luglio 2016.

In questa direttiva la definizione dei limiti passa attraverso la definizione dei limiti di base (Valori Limite di Esposizione, VLE) e di livelli di riferimento (Livelli di Azione, LA). Anche in questo caso, per l'intervallo di frequenze di nostro interesse, i VLE garantiscono la protezione dei lavoratori dalla stimolazione elettrica, indotta dall'esposizione, su tutti i tessuti. Per quanto riguarda i LA per il CE esterno, vengono definiti dei livelli inferiori che si basano sulla limitazione del CE indotto al di sotto dei VLE e sulla limitazione delle scariche di scintille nell'ambiente di lavoro. Inoltre sono definiti dei livelli superiori per il CE al di sotto dei quali il CE indotto non supera i VLE e si evitano fastidiose scariche di scintille, purché siano prese adeguate misure di protezione. Per i CM in questo intervallo di frequenza i LA inferiori e superiori coincidono, sono però definiti i LA per l'esposizione degli arti che derivano dai VLE sul CE indotto relativi alla stimolazione elettrica dei tessuti negli arti, tenendo conto del fatto che il CM presenta un accoppiamento più debole negli arti che nel corpo intero. In Tabella 3 sono presentati i VLE e i LA relativi al CE e al campo induzione magnetica esterni stabiliti nella direttiva alla frequenza di 85 kHz.

Entro il 2015 dovranno essere edite delle linee guida non vincolanti per l'applicazione pratica della Direttiva.

	E (VLE) [V/m]	E (LA inferiore) [V/m]	E (LA superiore) [V/m]	B (LA) [μT]	B (LA arti) [μT]
lavoratori	32.3	1.7 x 10 ²	6.1 x 10 ²	100	300

Tabella 3: VLE (valore di picco) e LA (valori efficaci) alla frequenza di 85 kHz stabiliti in 2013/35/UE

2.2 Normativa Italiana

L'esposizione della popolazione ai CEM è regolata in Italia dalla legge n. 36 del 22/2/2001 "*Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*". Tale legge fissa il quadro normativo generale, ma demanda ad appositi decreti attuativi i limiti di esposizione.

Il criterio scelto per la stesura di questa legge quadro è molto diverso da quello seguito per la definizione delle linee guida internazionali illustrate nel paragrafo precedente. Infatti, l'impianto della legge non è basato sulla definizione delle grandezze dosimetriche, ma si definiscono direttamente i seguenti limiti, tutti basati sull'utilizzo dei valori imperturbati di campo:

- *limite di esposizione*: è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione
- *valore di attenzione*: è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico che non deve essere superato negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate. Esso costituisce misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine
- *obiettivi di qualità*: i valori di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, definiti dallo Stato ai fini della progressiva mitigazione dell'esposizione ai campi

I due decreti attuativi Presidente del Consiglio dei Ministri (DPCM) riportano la data dell'8 luglio 2003: il primo DPCM si intitola "*Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz*", il secondo DPCM "*Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti*".

Quest'ultimo è il DPCM di riferimento per la valutazione dell'esposizione al sistema STEESC realizzato. In questo DPCM a tutela delle esposizioni a campi a frequenze comprese tra 0 Hz e 100 kHz, generati da sorgenti non riconducibili agli elettrodotti (50 Hz), si applica l'insieme completo delle restrizioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999. Per cui a 85 kHz sono validi i limiti per il CE e per il campo induzione magnetica riportati in Tabella 2.

Per quanto riguarda i lavoratori il riferimento normativo per la sicurezza nei luoghi di lavoro è il decreto legislativo (D. Lgs.) datato 9 aprile 2008 n.81 "*Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*". Le disposizioni specifiche in materia di protezione dei lavoratori dalle esposizioni ai campi elettromagnetici sono contenute nel Capo IV del Titolo VIII - Agenti fisici – e derivano dal recepimento della prima direttiva europea sui lavoratori (2004/40/CE) che è stata abrogata al momento della pubblicazione della direttiva 2013/35/UE.

In attesa della opportuna riformulazione del Titolo VIII Capo IV del D.Lgs. 81/2008, ai fini del recepimento della nuova direttiva, resta valido il principio generale di cui all'art.28 del D.Lgs. 81/2008, ribadito relativamente agli agenti fisici all'art.181, che impegna il datore di lavoro alla valutazione di tutti i rischi per la salute e la sicurezza, inclusi quelli derivanti da esposizioni a campi elettromagnetici, ed all'attuazione delle appropriate misure di tutela, a decorrere dal 1 gennaio 2009 (art. 306).

Le disposizioni per la valutazione del rischio sono specificamente mirate alla protezione dagli effetti certi (*effetti acuti*) di tipo diretto ed indiretto che hanno una ricaduta in termini sanitari ("*rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori dovuti agli effetti nocivi a breve termine conosciuti nel corpo umano derivanti dalla circolazione di correnti indotte e dall'assorbimento di energia, e da correnti di contatto*", D.Lgs. 81/2008, art. 206 comma 1).

Coerentemente con gli scopi della direttiva europea, il capo IV del D.Lgs. 81/2008 non riguarda la

protezione da eventuali effetti a lungo termine, per i quali mancano dati scientifici conclusivi che comprovino un nesso di causalità, né i rischi conseguenti al contatto con i conduttori in tensione (art. 206, comma 2) questi ultimi già coperti dalle norme per la sicurezza elettrica.

Da notare che la maggior parte degli effetti avversi considerati nel DLgs.81/2008 compaiono immediatamente (es. aritmie, contrazioni muscolari, ustioni, malfunzionamento pacemaker e dispositivi elettronici impiantati etc.), ma alcuni, come la cataratta o la sterilità maschile, essendo la conseguenza di un meccanismo cumulativo, possono manifestarsi a distanza di tempo.

3. Caratterizzazione dell'impianto di ricarica contactless da banco

3.1 Banco e procedure di misura

Sul sistema di bobine realizzato su progetto dell'università di Padova è stata eseguita una prima caratterizzazione in condizioni di riferimento (regime sinusoidale), presso i laboratori di UTBIORAD dell'ENEA.

Il banco di misura è mostrato in Figura 1.

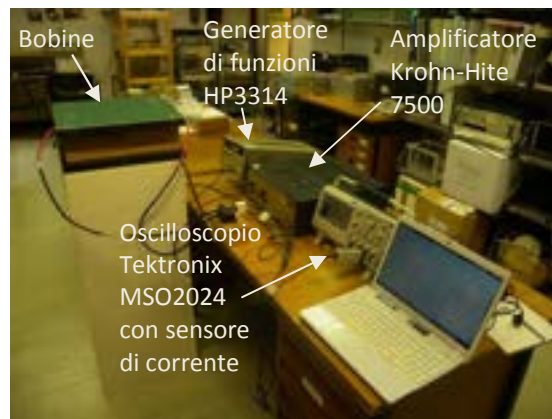


Figura 1: banco di misura per la caratterizzazione in laboratorio dello STEESC

Il sistema è stato alimentato tramite un generatore di funzioni Hewlett Packard modello 3314, in grado di fornire tensioni sinusoidali a frequenza e intensità volute, e un amplificatore a larga banda (DC – 1 MHz) Krohn-Hite modello 7500 (controllato in tensione, corrente massima 600 mA), in grado di fornire una potenza massima di 75 W; tale potenza è sicuramente inferiore a quella di utilizzo dello STEESC, tuttavia è sufficiente per eseguire le misure di caratterizzazione del sistema. Per misurare le tensioni e le correnti in condizioni di riferimento si è utilizzato un oscilloscopio Tektronix modello MSO2024, (200 MHz, 4 canali) equipaggiato con quattro sonde di tensione nonché con una sonda di corrente Tektronix modello TCP 0030 (DC-120 MHz, 30 A), con sensibilità di 1 mA, adatta a questo tipo di misure. Per ogni misura nell'oscilloscopio è stato impostato il parametro 'average' per 256 acquisizioni.

Per caratterizzare il sistema si è ritenuto necessario eseguire tre diversi tipi di misure sulla coppia di bobine complete di ferriti (di seguito definite bobine per semplicità): induttanza della singola bobina in aria (per entrambe le bobine), induttanza della singola bobina quando è posta di fronte all'altra bobina a una distanza opportuna (per entrambe le bobine), misura della mutua induzione tra le due bobine. Per ogni configurazione si sono eseguite 6 misure ripetute.

3.1.1 Misura di induttanza sulle singole bobine

In Figura 2 è mostrato lo schema di misura utilizzato per la misura di induttanza delle bobine in aria.

Nel caso di un induttore reale si deve considerare l'effetto dissipativo dovuto alle perdite nel rame del filo conduttore di Litz con cui si è realizzato l'avvolgimento che ha resistività non nulla. Il circuito equivalente

della singola bobina illustrato in Figura 3 è quello di un'impedenza complessa che, a regime sinusoidale può essere così espressa:

$$Z = R + j\omega L$$

Dove R è la resistenza (Ω), L è l'induttanza (Henry) e ω (radianti) è la pulsazione del segnale (Figura 3).

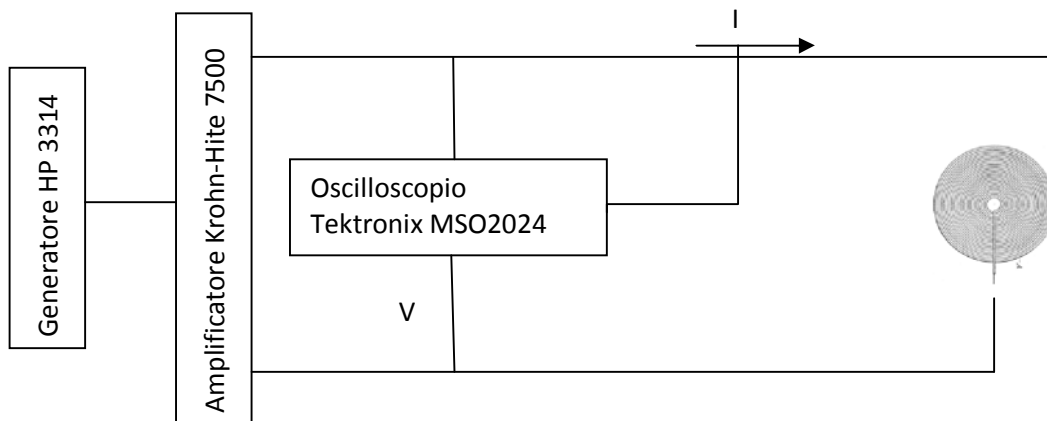


Figura 2: schema di misura dell'induttanza della singola bobina

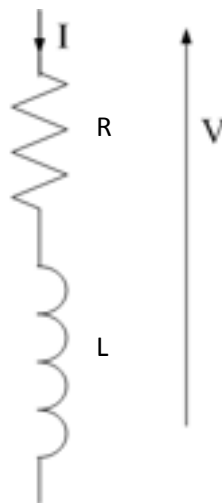


Figura 3: circuito equivalente di un induttore reale

Il modulo e la fase dell'impedenza sono legate a R e L dalle seguenti relazioni

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

Il modulo dell'impedenza è noto una volta misurate con l'oscilloscopio la tensione V ai capi dell'induttore e la corrente I; anche la fase φ tra i due segnali è fornita dallo strumento. Noti modulo e fase dell'impedenza complessa, una semplice relazione matematica permette di risalire ai valori di R e L.

In accordo con l'università di Padova si è scelto di eseguire le misure di impedenza complessa della bobina nell'intervallo di frequenza 80 – 90 kHz con passo di 2.5 kHz (5 passi in totale) a potenza fissa.

3.1.2 Misura di induttanza sulle singole bobine affiancate (sistema completo)

In Figura 4 è mostrato lo schema di misura dell'induttanza delle singole bobine quando sono affiancate tra di loro nelle normali condizioni di utilizzo a una distanza d (cm)

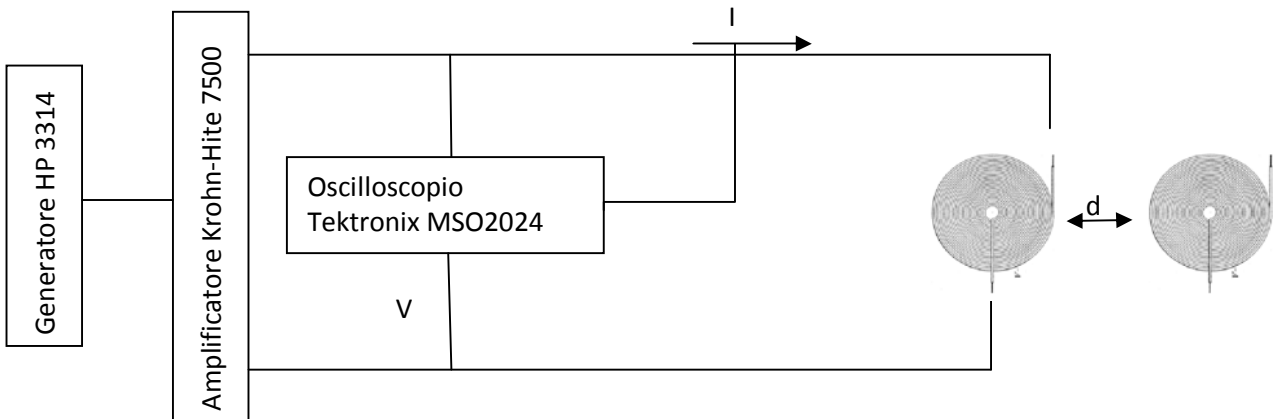


Figura 4: schema di misura dell'induttanza della singola bobina posta a una distanza d dall'altra

Le misure effettuate sono analoghe a quelle descritte nel paragrafo precedente. La differenza sta nel fatto che le due bobine non sono in aria, ma sono poste a distanza opportuna l'una dall'altra come nelle reali condizioni di lavoro. Anche in questo caso l'impedenza complessa della singola bobina verrà misurata nell'intervallo di frequenza 80 – 90 kHz con passo di 5 kHz. Si considereranno le distanze d pari a 10, 15, 20 cm.

3.1.2 Misure di mutua induttanza sul sistema completo

In Figura 5 è mostrato lo schema di misura impiegato per le misure di mutua induttanza tra le bobine distanziate tra di loro della distanza d .

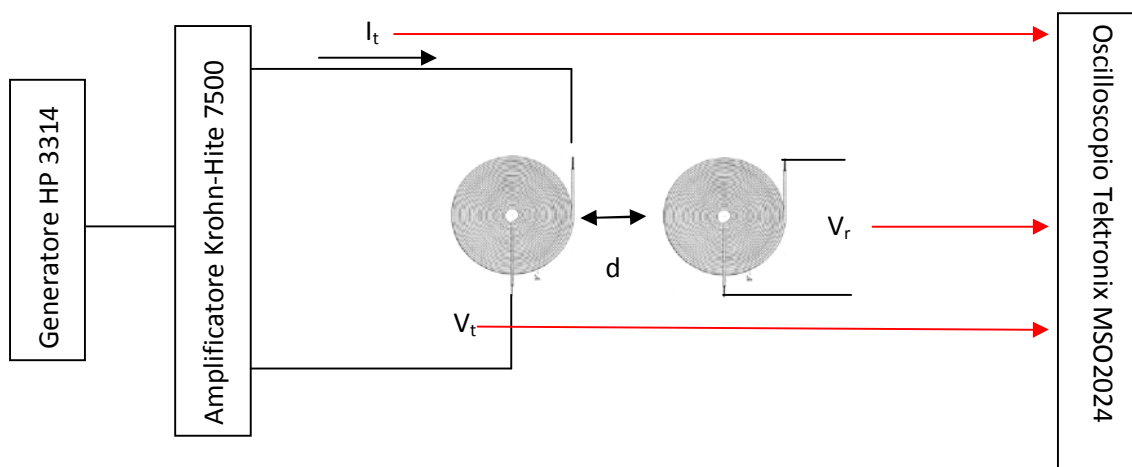


Figura 5: schema di misura della mutua induttanza

Anche in questo caso la distanza tra le bobine è stata fissata a 10, 15, 20 cm e le frequenza di misura sono le stesse delle misure precedenti.

Per ogni distanza e per tutte le frequenze si è misurata la mutua induttanza del sistema completo attraverso la relazione:

$$M = \frac{V_r}{2\pi f I_t}$$

dove I_t rappresenta la corrente al sistema primario (bobina trasmittente) e V_r la tensione del sistema secondario (bobina ricevente).

3.2 Risultati della caratterizzazione

Di seguito sono mostrati i risultati delle misure di caratterizzazione delle bobine nelle configurazioni descritte.

Ogni dato in tabella è fornito come media sulle sei misure ripetute \pm deviazione standard sperimentale.

3.2.1 Misura di induttanza sulle singole bobine

In Tabella 4 e 5 sono riportati i valori di induttanza e resistenza misurati sulle singole bobine poste in aria.

Frequenza [kHz]	L [μ H]	R [Ω]
80.0	110.6 \pm 1.9	1.9 \pm 0.4
82.5	109.5 \pm 2.1	1.4 \pm 0.7
85.0	108.7 \pm 1.2	1.4 \pm 0.3
87.5	106.6 \pm 0.9	1.8 \pm 0.9
90.0	106.8 \pm 1.3	2.3 \pm 0.7

Tabella 4: induttanza e resistenza della bobina 1 in aria

Frequenza [kHz]	L [μ H]	R [Ω]
80.0	109.5 \pm 1.1	1.5 \pm 0.5
82.5	108.1 \pm 0.7	0.9 \pm 0.3
85.0	107.3 \pm 1.0	1.5 \pm 0.3
87.5	106.4 \pm 0.8	1.6 \pm 0.2
90.0	105.5 \pm 1.2	1.6 \pm 0.1

Tabella 5: induttanza e resistenza della bobina 2 in aria

I valori di induttanza devono essere confrontati con i valori forniti dalle simulazioni effettuate dall'Università di Padova con un codice di calcolo che implementa il metodo degli elementi finiti (FEM) per la soluzione delle equazioni di Maxwell. Il valore calcolato per l'induttanza delle bobine è pari a 120 μ H che risulta compatibile con quello misurato tenuto conto delle condizioni di idealità del sistema simulato.

3.2.2 Misura di induttanza sulle singole bobine affacciate (sistema completo)

Nella Tabella 6 sono riportati i valori delle induttanze della bobina 1 quando è posta a distanze pari a 10, 15, 20 cm dalla bobina 2.

Frequenza [kHz]	L (d = 10 cm) [μ H]	L (d = 15 cm) [μ H]	L (d = 20 cm) [μ H]
80.0	113.5 \pm 0.8	110.1 \pm 0.6	109.5 \pm 0.7
82.5	112.7 \pm 0.7	109.8 \pm 0.7	108.7 \pm 0.8

85.0	111.8 ± 0.9	109.3 ± 0.6	108.3 ± 0.7
87.5	111.4 ± 0.7	108.8 ± 0.7	108.0 ± 0.7
90.0	110.6 ± 0.3	108.1 ± 0.7	106.9 ± 0.6

Tabella 6: induttanza della bobina 1 distanziata dalla bobina 2 di 10, 15, 20 cm

Analogamente in Tabella 7 sono riportati i valori delle induttanze della bobina 2 quando è posta a distanze pari a 10, 15, 20 cm dalla bobina 1.

Frequenza [kHz]	L (d = 10 cm) [μH]	L (d = 15 cm) [μH]	L (d = 20 cm) [μH]
80.0	113.4 ± 1.5	109.6 ± 0.6	109.8 ± 1.6
82.5	112.0 ± 1.0	108.5 ± 0.5	108.6 ± 0.7
85.0	111.2 ± 1.1	107.8 ± 1.1	108.2 ± 0.7
87.5	110.7 ± 0.9	107.6 ± 0.7	107.6 ± 0.8
90.0	109.8 ± 0.9	107.0 ± 0.3	106.8 ± 0.6

Tabella 7: induttanza della bobina 2 distanziata dalla bobina 1 di 10, 15, 20 cm

I valori di induttanza misurati alla frequenza di lavoro di 85 kHz, quando le bobine sono affiancate di 15 cm sono in accordo tra di loro ($L = 109.3 \pm 0.6 \mu\text{H}$ per la bobina 1 e $L = 107.8 \pm 1.1 \mu\text{H}$ per la bobina 2) e come atteso leggermente più elevate rispetto agli analoghi valori misurati nel caso delle bobine non affiancate e poste in aria.

3.2.1 Misura di mutua induttanza sul sistema completo

Nella Tabella 8 sono riportati i valori delle mutue induttanze misurate sul sistema completo quando le bobine sono distanziate tra di loro di 10, 15, 20 cm e quando ad essere alimentata in potenza è la bobina 1.

Frequenza [kHz]	M (d = 10 cm) [μH]	M (d = 15 cm) [μH]	M (d = 20 cm) [μH]
80.0	36.4 ± 0.9	20.8 ± 0.2	11.8 ± 0.1
82.5	36.0 ± 0.8	20.7 ± 0.2	11.7 ± 0.1
85.0	35.8 ± 0.7	20.6 ± 0.2	11.7 ± 0.1
87.5	35.7 ± 0.7	20.6 ± 0.2	11.6 ± 0.1
90.0	35.3 ± 0.6	20.4 ± 0.2	11.5 ± 0.1

Tabella 8: valori di mutua induttanza misurati con la bobina 1 alimentata e posta a distanze di 10, 15, 20 cm dalla bobina 2

Analogamente, in Tabella 9 sono riportati i valori di mutua induttanza quando è la bobina 2 ad essere alimentata.

Frequenza [kHz]	M (d = 10 cm) [μH]	M (d = 15 cm) [μH]	M (d = 20 cm) [μH]
80.0	35.8 ± 0.6	20.6 ± 0.2	11.8 ± 0.1
82.5	35.4 ± 0.5	20.4 ± 0.1	11.7 ± 0.1
85.0	35.2 ± 0.5	20.3 ± 0.2	11.7 ± 0.1
87.5	35.0 ± 0.4	20.2 ± 0.2	11.7 ± 0.1
90.0	34.7 ± 0.4	20.2 ± 0.2	11.6 ± 0.1

Tabella 8: valori di mutua induttanza misurati con la bobina 2 alimentata e posta a distanze di 10, 15, 20 cm dalla bobina 1

Come atteso i valori di mutua induttanza misurati alimentando alternativamente le due bobine sono di fatto sovrapponibili tra di loro per tutte le distanze e tutte le frequenze considerate.

I valori di mutua induttanza derivati dalle simulazioni effettuate dall'Università di Padova sono pari a $M = 38 \mu\text{H}$ per $d = 10 \text{ cm}$ e $M = 13 \mu\text{H}$ per $d = 20 \text{ cm}$ e confrontabili con i valori misurati.

4. Valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici residui emessi dall'impianto di ricarica contactless

4.1 Banco e procedure di misura

Al momento, non esiste nessuna procedura standardizzata per la valutazione dell'esposizione al tipo di dispositivi oggetto del presente studio. Vista l'analogia sia strutturale che di modalità di funzionamento con i piani di cottura a induzione, si è deciso di utilizzare come riferimento la norma CEI EN 62233. Per la scelta dei punti di misura si è fatto riferimento alle procedure indicate nell'Allegato A, in particolare nel capitolo A3 relativo alle condizioni di prova per piani di cottura a induzione, adattandole allo scenario espositivo realistico mostrato in Figura 6. Come si può osservare, il sistema, costituito dalla coppia di bobine poste a una distanza reciproca di 15 cm, di bobine è posizionato su un tavolo: l'unico lato di accesso per il personale che lavora al progetto è quello frontale.



Figura 6: scenario di esposizione per il personale impegnato al prototipo di STEESC presso l'Università di Padova

Dall'analisi dello scenario si sono scelti nove punti di misura posti su un piano frontale a 30 cm dalle bobine e posizionati come in Figura 7.

Come detto, le bobine sono poste a una distanza reciproca di 15 cm; la loro dimensione finale compreso, l'ingombro delle ferriti, è di $44 \times 44 \text{ cm}^2$. Il punto 5 è stato posizionato al centro delle bobine, i punti 4 e 6 a una distanza di $\pm 22 \text{ cm}$ rispetto al punto 5, sulla stessa linea (bordo delle bobine). I punti 1, 2, 3 e 7, 8, 9 sono stati posti simmetricamente in alto e in basso a distanze di $\pm 50 \text{ cm}$ rispetto alla prima terna.

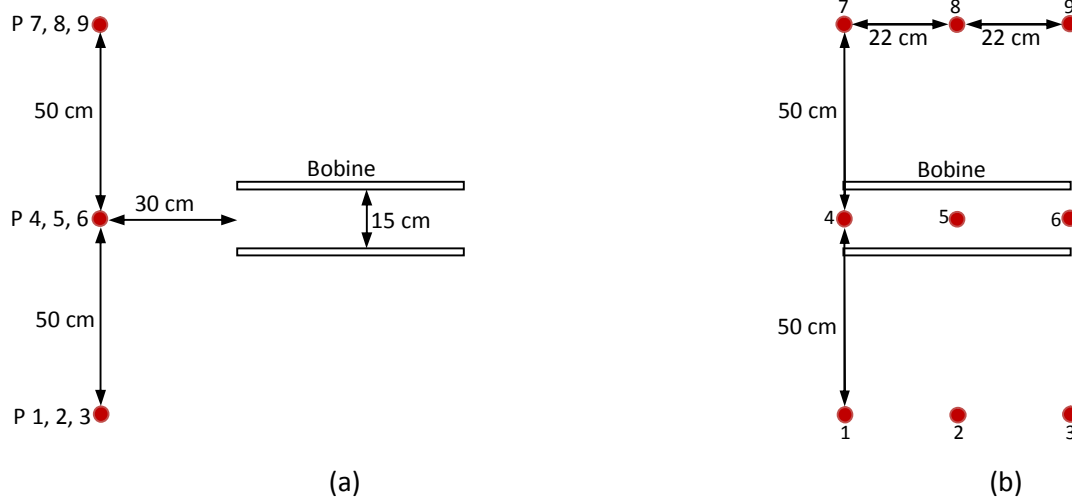


Figura 7: a) visione laterale e b) visione frontale dei punti di misura scelti con relative quote

Alla distanza di 30 cm e alla frequenza operativa di 85 kHz si è in una condizione espositiva di campo vicino. Pertanto, per una completa caratterizzazione dell'esposizione è stato necessario effettuare sia misure di campo elettrico (E) sia misure di campo di induzione magnetica (B).

La condizione di lavoro prescelta per le bobine prevede l'utilizzo della massima corrente: in questo caso, per ottenere una tensione di 56 V e una corrente di 10 A in continua sulla batteria (560 W), la corrente al sistema primario è pari a 5.5 A di picco, mentre al sistema secondario è pari a 13.7 A di picco.

Le misure di E e di B sono state effettuate con il sensore isotropo a banda larga di campo elettrico e magnetico Narda modello EHP 200, con banda di lavoro 9 kHz – 30 MHz.

Questo sensore ha dimensioni esterne di $9 \times 9 \times 11 \text{ cm}^3$, al suo interno si trovano un sistema triassiale dipolo – diodo per la misura isotropa di E e un sistema triassiale di bobine concentriche per una misura isotropa di B. Le sue dimensioni e il volume di misura soddisfano le specifiche imposte dalla norma CEI 62233 per i sensori, che indicano un'area di misura pari a $100 \text{ cm}^2 \pm 5 \text{ cm}^2$, sensibilità isotropica e diametro esterno del sensore di riferimento non superiore ai 13 cm.

L'intervallo di misura per il campo E è pari a 0.1 – 1000 V/m, mentre per il campo B è 0.04 – 377 μT . Da specifiche, questo sensore presenta una anisotropia di $\pm 0.8 \text{ dB}$ a 1 MHz, una linearità di 0.5 dB a 1 MHz e una accuratezza di $\pm 0.8 \text{ dB}$ a 1 MHz.

La sonda è collegata a un computer per mezzo di una fibra ottica, un software proprietario permette l'impostazione dei parametri dello strumento e la lettura dei valori di campo.

In Figura 8 è mostrato il sensore posizionato a 30 cm dalle bobine in corrispondenza del punto di misura n.ro 5.



Figura 8: sensore EHP 200 in posizione di misura nel punto 5

La prima misura effettuata è stata quella del fondo della stanza a STEESC spento. Per il campo E si sono misurati 0.36 V/m, mentre per il campo B il valore era pari a 0.07 μ T.

In una prima fase, sono state eseguite misure di campo E e di campo B su una banda compresa fra 50 kHz e 1 MHz, al fine di osservare la presenza di eventuali armoniche di ordine superiore e il loro peso sul valore di campo totale, rispetto a quello della portante principale a 85 kHz. La resolution bandwidth (RBW) è stata impostata su 'AUTO' e quindi stabilita dal software.

Nelle Figure 9 e 10 sono mostrati gli spettri dei campi E e B rispettivamente, nella banda 50 kHz - 1 MHz, misurati nel punto 5.

Come atteso, si nota la presenza di armoniche spettrali superiori, il cui contributo al valore totale di campo rappresentato dal termine 'wideband' in figura, non è determinante rispetto al valore della portante a 85 kHz, rappresentato dal termine 'highest peak'. Infatti il contributo della portante è pari al 99 % nel caso del campo E e praticamente pari al 100 % nel caso del campo B.

Il sensore fornisce il valore efficace dei campi misurati.



Figura 9: spettro del campo E misurato nel punto 5 su una banda 50 kHz – 1 MHz.

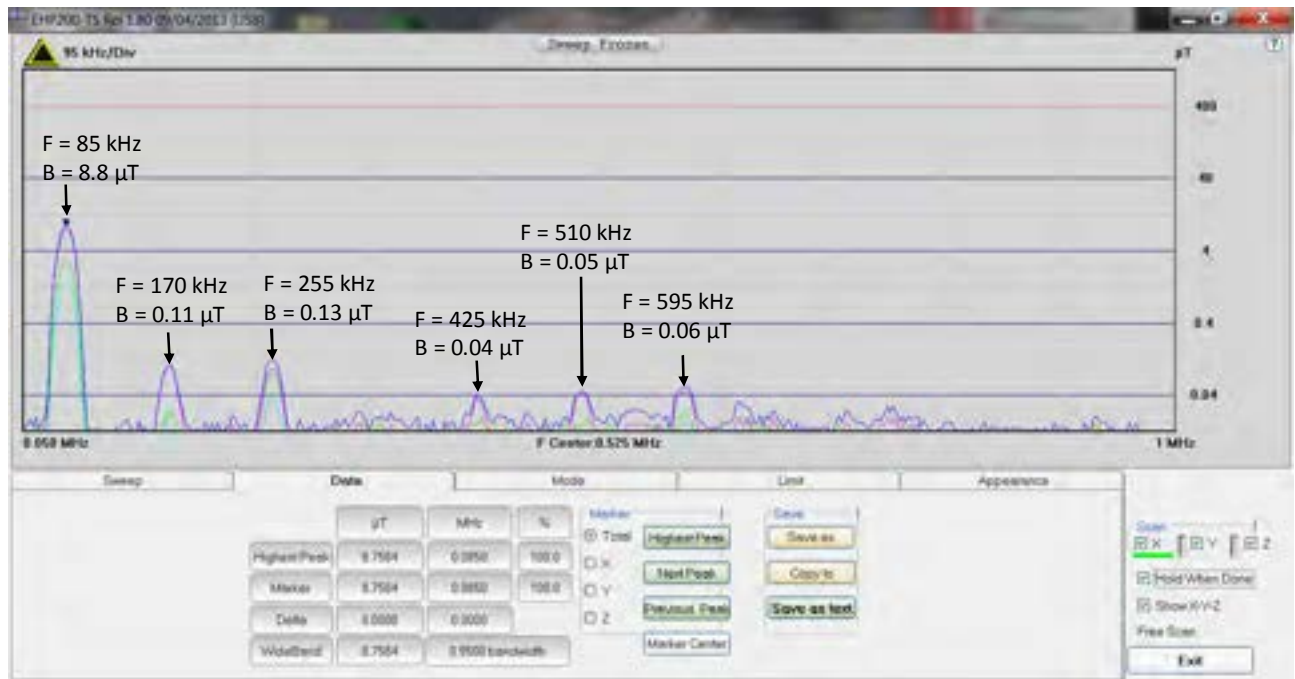


Figura 10: spettro del campo B misurato nel punto 5 su una banda 50 kHz – 1 MHz.

Da questa analisi si è scelto di lavorare con banda 50 – 100 kHz per tutte le misure, al fine di ottenere una migliore accuratezza sulla portante a 85 kHz, sempre impostando la RBW in 'AUTO'.

Il campo B è stato misurato in tutti i punti scelti. Per quel che riguarda il campo E, la norma CEI 62233 specifica che, per i sistemi che rientrano nel suo campo di applicazione, se la tensione di alimentazione non supera 1 kV, si può assumere a priori che i sistemi siano conformi. In questo caso, la tensione di alimentazione non supera i 40 V, ma, trattandosi di un sistema diverso, di tipo industriale e, soprattutto, risonante, si è scelto di fare comunque le misure di E. limitatamente ai punti 4, 5, 6.

Per ogni punto sono state eseguite 5 misure indipendenti.

4.2 Risultati della valutazione dell'esposizione

Nelle Tabelle 9 e 10 sono mostrati i risultati delle misure (media \pm deviazione standard sperimentale) ottenute sul prototipo da banco in termini di campo E e campo B.

Punti di misura	E [V/m]
4	110.8 \pm 4.4
5	127.8 \pm 3.1
6	109.9 \pm 0.7

Tabella 9: medie e deviazioni standard dei valori misurati del campo E nei punti considerati

Punti di misura	B [μ T]
1	3.7 ± 0.2
2	4.0 ± 0.3
3	3.6 ± 0.3
4	6.7 ± 0.2
5	8.8 ± 0.5
6	6.5 ± 0.2
7	3.6 ± 0.1
8	3.9 ± 0.1
9	3.3 ± 0.1

Tabella 10: medie e deviazioni standard dei valori misurati del campo B nei punti considerati

Come si può dedurre dai risultati mostrati nelle Tabelle 9 e 10, i valori misurati sono inferiori ai valori limite, sia per il campo E che per il campo B, (riferiti alla frequenza di 85 kHz) fissati per i lavoratori, dalla Direttiva Europea 2013/35/UE (vedi Tabella 3).

Tuttavia si possono fare delle considerazioni interessanti. Il valore massimo di campo E misurato, pari a 127.8 ± 3.1 V/m, è prossimo al LA inferiore posto dalla Direttiva europea pari a 170 V/m. E' da notare, inoltre, che sia il campo B sia il campo E, misurati nei punti 4, 5, 6, non sono conformi ai limiti di esposizione stabiliti per la popolazione a 85 kHz dalla legislazione europea e italiana (Tabella 2). Anche per quel che riguarda le recenti linee guida ICNIRP 2010, i livelli di campo E misurati non rispettano i livelli di riferimento fissati per la popolazione (Tabella 1).

Per questo motivo si è fatta una prova di misura nel punto 5 ponendo una griglia metallica tra le bobine e il sensore. Il valori misurati sono stati:

$$E = 0.4 \text{ V/m}$$

$$B = 0.07 \mu\text{T.}$$

Come atteso, vista l'azione di schermatura introdotta dalla presenza della griglia, i valori misurati sono di più di 2 ordini di grandezza inferiori rispetto ai valori misurati senza griglia.

5. Conclusioni

Nell'ambito del progetto *'Sperimentazione di un caricabatteria contactless per city car'* svolto dall'Università di Padova, in cui è stato coinvolto il gruppo di bioelettromagnetismo dell'UT BIORAD dell'ENEA Casaccia, si è realizzato un caricabatteria contactless che utilizza per il trasferimento di potenza dalla rete alla batteria un sistema di bobine risonanti. Nello specifico, l'attività svolta dal gruppo di bioelettromagnetismo ha riguardato le misure di caratterizzazione del sistema di bobine progettato dall'Università di Padova, nonché le valutazioni dell'esposizione ai campi elettromagnetici residui emessi dal prototipo finale di STEESC, finalizzate a una valutazione del rischio da esposizione ai campi elettromagnetici del personale dell'Università coinvolto nel progetto.

Le misure di caratterizzazione, in termini di induttanza delle bobine in aria e accoppiate e di mutua induttanza delle bobine accoppiate, hanno confermato i dati numerici derivati dalle simulazioni con il codice FEM eseguite all'Università.

Per quel che riguarda la valutazione dell'esposizione dei lavoratori, si sono eseguite misure di campo E e B in punti considerati significativi per l'esposizione. Da queste misure si evince la conformità dell'esposizione ai limiti imposti dalla Direttiva Europea 2013/35/EU per i lavoratori esposti ai campi elettromagnetici, sia in termini di E che di B.

I valori misurati non sono però conformi ai limiti stabiliti per la popolazione in ambito europeo e nazionale. Questo impone un'analisi più approfondita da effettuarsi quando il prototipo sarà montato sull'automobile, per valutare l'esposizione della popolazione in condizioni di utilizzo realistiche del STEESC.

Inoltre potrebbe essere interessante fare delle valutazioni dosimetriche con dei codici di calcolo per valutare la conformità di questo sistema ai limiti di base imposti dalla legislazione europea per la popolazione.

Un'altra considerazione da fare è che questo sistema è stato progettato per lavorare a 560 W, e i valori di corrente e tensione di progetto derivano da questa specifica. Uno sviluppo futuro potrebbe riguardare la realizzazione di un sistema a potenze più elevate (qualche kW) che richiederebbe valori di corrente maggiori. A questo punto la conformità di un sistema del genere non sarebbe più garantita, visto che allo stato attuale il valore massimo di E misurato è prossimo al valore limite per i lavoratori imposto dalla Direttiva Europea: per questo motivo, analizzare questo nuovo scenario di esposizione con dei codici di calcolo, eseguire valutazioni di esposizione ambientale e dosimetriche e pensare ad eventuali soluzioni di schermaggio, rappresenterebbe un notevole passo avanti in questa ricerca, soprattutto nella sua applicazione pratica su larga scala.

Appendice

Il gruppo di Bioelettromagnetismo di UT BIORAD della Casaccia ha una consolidata esperienza nel campo dell'interazione della radiazione elettromagnetica e i biosistemi. In questo ambito, nel corso degli anni ha acquisito strumentazione e competenze per la valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici ai fini della protezione della popolazione e dei lavoratori esposti. In questi ultimi anni è stato coinvolto come unità operativa in due progetti nazionali del Ministero della Salute:

-Programma Strategico 'Sicurezza e Tecnologie Sanitarie' coordinato dall'Istituto Superiore di Sanità, sottoprogetto 'Rischi diretti e indiretti per la sicurezza di lavoratori e pazienti derivanti dall'utilizzo nelle strutture sanitarie di tecnologie emergenti basate sui campi elettromagnetici (2011-2013), coordinatore Istituto nazionale per l'assicurazione contro gli infortuni sul lavoro (INAIL);

-Ricerca finalizzata 'Studio *ex vivo* ed *in vitro* degli effetti dei campi elettromagnetici sulle cellule staminali e valutazione del rischio degli operatori sanitari' (2012-2015);

nell'ambito dei quali ha svolto valutazioni di esposizione di lavoratori a dispositivi medicali, sorgenti di campi elettromagnetici complessi quali risonanza magnetica e elettrobisturi.