



Ricerca di Sistema elettrico

Valutazione sperimentale e numerica dell'esposizione ai campi elettromagnetici residui emessi da un sistema di ricarica senza contatto

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

VALUTAZIONE SPERIMENTALE E NUMERICA DELL'ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI RESIDUI EMESI
DA UN SISTEMA DI RICARICA SENZA CONTATTO

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

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

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

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

Obiettivo: a.1 Ricarica rapida in c.c. contactless

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELL'ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI RESIDUI EMESSI DA UN SISTEMA COMMERCIALE DI RICARICA SENZA CONTATTO.....	6
2.1 SPECIFICHE TECNICHE DEL SISTEMA DI RICARICA COMMERCIALE.....	6
2.2 PROCEDURE DI MISURA IMPIEGATE PER LA VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE.....	7
2.3 RISULTATI.....	9
3 VALUTAZIONE NUMERICA DELL'ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI RESIDUI EMESSI DA UN SISTEMA DI RICARICA SENZA CONTATTO.....	12
3.1 IL METODO NUMERICO.....	13
3.2 MODELLO DI UN PROTOTIPO DI SISTEMA DI RICARICA SENZA CONTATTO.....	13
3.3 MODELLO DEL SISTEMA DI RICARICA SENZA CONTATTO PLUGLESS TM	15
3.4 RISULTATI.....	18
3.4.1 <i>Dosimetria numerica del prototipo del sistema di ricarica senza contatto</i>	18
3.4.2 <i>Dosimetria numerica del sistema di ricarica senza contatto PluglessTM</i>	19
4 CONCLUSIONI.....	20
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	22

Sommario

Nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova si è svolta, nel precedente biennio, una attività scientifica finalizzata allo sviluppo e alla realizzazione di un prototipo per la ricarica senza contatto, di potenza pari a 600W, in grado di ricaricare le batterie di una piccola autovettura da città. Di seguito alla realizzazione del prototipo da banco, si sono messe a punto procedure di misura finalizzate alla valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici (CEM) residui emessi, relativamente al personale che operava in sua prossimità durante le regolari mansioni lavorative.

Nel caso di sistemi destinati alla commercializzazione, la valutazione dell'esposizione ai CEM emessi dai sistemi di ricarica senza contatto deve fare riferimento ai limiti stabiliti dal legislatore per la protezione della popolazione. La legislazione italiana (DPCM 8 luglio 2003) stabilisce che a tutela delle esposizioni a CEM a frequenze comprese tra 0 Hz e 100 kHz, generati da sorgenti non riconducibili agli elettrodotti, si applica l'insieme completo delle restrizioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999, pubblicata nella G.U.C.E. n. 199 del 30 luglio 1999.

Nel corso dell'annualità 2014-2015, l'attività di ricerca, svolta presso la Divisione Tecnologie e metodologie per la salvaguardia della salute dell'ENEA, ha riguardato la valutazione dell'esposizione ai CEM residui emessi da un sistema di ricarica senza contatto commerciale (Plugless™) in grado di erogare, in condizioni operative, una potenza pari a 3.3 kW alla frequenza di lavoro di 19.5 kHz.

Per valutare l'esposizione ai CEM emessi, si sono eseguite misure radiometriche di campo elettrico (E), di campo magnetico (H) e di campo di induzione magnetica (B) secondo la norma tecnica internazionale IEC 61980-Part1:2015. Di seguito, è stato condotto uno studio dosimetrico, utilizzando un codice di calcolo commerciale dotato di solutore in bassa frequenza.

Con riferimento alle misure radiometriche, in nessuno dei punti di misura considerati sono stati superati i livelli di riferimento per il campo E (pari a 87 V/m), mentre nella maggioranza dei punti di misura all'esterno dell'autoveicolo sono stati superati i livelli di riferimento per il campo H (pari a 5 A/m) e per il campo B (pari a 6.25 μ T) nelle condizioni operative considerate.

Tali risultati hanno quindi reso necessario l'esecuzione di uno studio dosimetrico finalizzato al confronto con le restrizioni di base della normativa. Si è realizzato un modello numerico del sistema Plugless™: convalidato confrontando i valori di campo B simulati con i valori misurati durante le sessioni sperimentali. Per le valutazioni dosimetriche si è utilizzato il fantoccio ellissoidale descritto nella norma tecnica CEI 61110 e costituito da materiale con le stesse caratteristiche del muscolo alla frequenza di 19.5 kHz, posizionato in modi diversi rispetto al sistema di ricarica. In tutti i casi simulati il valore di corrente indotta J (99^{mo} percentile della distribuzione dei valori) risulta non conforme al limite di base della raccomandazione europea e pari a 39 mA/m² a 19.5 kHz.

1 Introduzione

I sistemi di trasferimento di potenza senza contatto (Wireless Power Transfer, WPT) stanno suscitando un sempre maggiore interesse in molte applicazioni industriali e civili. In questo ambito, la possibilità di applicare questa tecnologia alla ricarica delle batterie dei veicoli elettrici risulta particolarmente vantaggiosa, poiché offre maggiore sicurezza contro i contatti accidentali e praticità (non più cavi volanti, protezioni etc.) dei sistemi di ricarica convenzionali basati su spine e prese.

Nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova si è svolta, nel precedente biennio, una attività scientifica finalizzata allo sviluppo e alla realizzazione di un prototipo per la ricarica senza contatto di potenza pari a 600W, in grado di ricaricare le batterie di una piccola macchina di città [1].

Per il trasferimento di potenza questo sistema utilizza la tecnologia dell'accoppiamento magnetico mediante circuiti risonanti. L'elemento principale di una tecnologia di questo tipo è rappresentato da una bobina trasmittente (sistema primario, SP) e da una bobina ricevente (sistema secondario, SS) progettate per trasferire potenza alla frequenza di risonanza, in genere pari a qualche decina di kHz. Durante il trasferimento di potenza dal SP al SS, la corrente che scorre all'interno delle bobine genera un campo elettromagnetico (CEM) residuo, altamente non uniforme, il cui livello può eccedere i limiti imposti dalla legislazione per la protezione degli individui che si possono trovare in prossimità di tali sistemi.

Durante la scorsa annualità, nel Laboratorio di Tecnologie Biomediche afferente alla Divisione di Tecnologie e metodologie per la salvaguardia della salute, si sono messe a punto procedure di misura finalizzate alla valutazione dell'esposizione ai CEM residui emessi dal prototipo realizzato all'Università di Padova [2]. In questo caso, trattandosi di un prototipo da laboratorio, l'esposizione umana ai CEM residui riguardava i lavoratori che operavano in sua prossimità durante le loro regolari mansioni lavorative.

Nel caso di sistemi destinati alla commercializzazione e quindi anche all'utilizzo in ambito urbano, la valutazione dell'esposizione ai CEM emessi dai sistemi di ricarica senza contatto deve fare riferimento ai livelli imposti dal legislatore per la protezione della popolazione. La legislazione italiana (DPCM 8 luglio 2003) stabilisce che a tutela delle esposizioni a CEM a frequenze comprese tra 0 Hz e 100 kHz, generati da sorgenti non riconducibili agli elettrodotti, si applica l'insieme completo delle restrizioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999, pubblicata nella G.U.C.E. n. 199 del 30 luglio 1999.

In questa raccomandazione, l'approccio alla valutazione dei rischi per la salute connessi alle esposizioni ai CEM recepito si basa sul sistema dei limiti di base (riferiti a grandezze dosimetriche) e dei livelli di riferimento (riferiti a grandezze radiometriche). Secondo questo approccio, in prima istanza è necessario confrontare le grandezze radiometriche, legate all'intensità del CEM imperturbato, con i rispettivi livelli di riferimento prescritti dalla normativa. Se uno di questi livelli è superato, si rende necessaria una verifica del rispetto dei limiti di base che, come detto coinvolgono le grandezze dosimetriche, cioè le grandezze fisiche indotte nel corpo del soggetto esposto e più direttamente connesse agli effetti sanitari che si intende prevenire.

Nel corso dell'annualità 2014-2015, l'attività di ricerca, svolta presso la Divisione Tecnologie e metodologie per la salvaguardia della salute dell'ENEA, ha riguardato la valutazione dell'esposizione ai CEM residui emessi da un sistema di ricarica senza contatto commerciale (PluglessTM, Evatran Group Inc, Wytheville, VA, USA). Questo sistema è stato acquistato dal Laboratorio Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo, afferente alla Divisione Produzione, Conversione e Uso Efficienti dell'Energia, per la ricarica delle batterie dall'auto elettrica Nissan Leaf (Nissan Motor Co., Yokohama, Giappone) in dotazione al laboratorio. Tale dispositivo è omologato per l'uso esclusivamente negli Stati Uniti, ma è stato fornito all'ENEA con la garanzia del suo utilizzo per attività di ricerca.

In condizioni operative, questo sistema è in grado di erogare una potenza pari a 3.3 kW alla frequenza di lavoro di 19.5 kHz.

Per valutare l'esposizione ai CEM emessi si sono eseguite misure radiometriche di campo elettrico (E), di campo magnetico (H) e di campo di induzione magnetica (B) secondo la norma tecnica internazionale IEC 61980-Part1:2015 [3].

Seguendo l’approccio in due fasi adottato dalla raccomandazione europea, è stato eseguito uno studio dosimetrico, utilizzando un codice di calcolo commerciale dotato di solutore in bassa frequenza.

I risultati delle misure radiometriche e delle valutazioni dosimetriche sono stati poi confrontati con i valori riportati in Tabella 1 e rappresentanti i limiti di base e i livelli di riferimento (valori efficaci) stabiliti nella raccomandazione stessa alla frequenza di 19.5 kHz per la popolazione.

A questa frequenza il limite di base è in termini di densità di corrente indotta all’interno del soggetto esposto, mentre i livelli di riferimento sono dati in termini delle grandezze radiometriche misurabili campo E, campo H e campo B.

Tabella1. Restrizioni di base e livelli di riferimento stabiliti a 19.5 kHz dalla raccomandazione europea del 1999.

Limiti di Base	Livelli di riferimento		
J [mA/m ²]	E [V/m]	H [A(m)]	B [μT]
39	87	5	6.25

2 Valutazione sperimentale dell’esposizione ai campi elettromagnetici residui emessi da un sistema commerciale di ricarica senza contatto

2.1 Specifiche tecniche del sistema di ricarica commerciale

Il sistema di ricarica senza contatto acquisito per il progetto è il Plugless™ (Evatran Group Inc, Wytheville, VA, USA). E’ un sistema in grado di erogare una potenza di 3.3 kW, come un sistema di ricarica convenzionale di livello 2. In Figura 1 è mostrato il sistema formato da una bobina trasmittente (primario, anche detto *parking pad*) da posizionare a terra e collegata via cavo alla centralina di controllo, solitamente fissata al muro: essa fornisce l’alimentazione al primario nonché controlla il corretto allineamento del veicolo rispetto al *parking pad* e il processo di ricarica. Il sistema è completato da una bobina ricevente (secondario), installata a sul telaio tramite un adattatore specifico per ciascun modello di autoveicolo, e collegata alle batterie dell’autoveicolo.



Figura 1. Sistema di ricarica senza contatto in cui sono evidenti la bobina trasmittente a terra, la bobina ricevente a bordo auto e la centralina di controllo

Le bobine sono in grado di trasferire energia dal sistema primario al secondario alla frequenza operativa di 19.5 kHz. Di seguito sono riportate le specifiche tecniche del sistema Plugless™.

Frequenza operativa	19.5 kHz
Tensione operativa d'ingresso	208 to 240 VAC
Corrente nominale nell'interruttore	30 A
Distanza nominale tra le bobine	100 mm
Potenza massima nominale erogata	3300 watts
Sistema primario (bobina trasmittente)	
Forma	Approssimativamente circolare
Dimensioni	559 (diagonale) x 470 (lunghezza) mm
Sistema secondario (bobina ricevente)	
Forma	Rettangolare
Dimensioni	464 (lunghezza) x 525 (larghezza) mm

2.2 Procedure di misura impiegate per la valutazione dell'esposizione

Nel caso specifico analizzato, il sistema di ricarica Plugless™ è stato montato su un autoveicolo elettrico modello Nissan Leaf.

I sistemi di ricarica senza contatto trasmettono energia attraverso la generazione di un CEM che non rimane confinato nello spazio tra le bobine; tali sistemi infatti determinano emissioni di CEM anche nelle immediate vicinanze delle bobine, che potenzialmente possono eccedere i limiti normativi sull'esposizione umana. Le valutazioni sperimentali condotte nell'ambito di questo lavoro sono svolte secondo le procedure stabilite dalla norma tecnica internazionale [3].

Tale norma prevede che le misure di CEM siano eseguite con il sistema di ricarica funzionante con un livello di corrente corrispondente a una potenza operativa compresa tra il 50% e il 100% della potenza nominale. Al fine di ottenere una valutazione del campo magnetico (o del flusso di induzione magnetica) emesso indipendente dal livello di potenza trasmessa dal sistema, contestualmente alla misura del campo magnetico deve essere misurata la corrente che scorre nel CP del sistema, secondo la seguente relazione:

$$H_{corr} = H_{mis} \cdot \frac{I_r}{I_{mis}} \quad (1)$$

Ove H_{corr} è il valore corretto del campo magnetico misurato, H_{mis} è il valore misurato del campo magnetico, I_{mis} è il valore misurato della corrente che scorre nella bobina durante la misura di campo magnetico, I_r è la corrente nominale che scorre nella bobina al livello nominale di potenza trasmessa come da specifica del fornitore.

La valutazione di conformità ai limiti di esposizione deve essere condotta in condizioni di caso peggiore. A questo proposito, la norma tecnica [3] fornisce una procedura, articolata in due passaggi, per individuare la posizione rappresentativa del caso peggiore: 1) scansione con la sonda di campo di un piano verticale ideale posto a una distanza di 20 cm e parallelo ai quattro lati dell'autoveicolo (Figura 2); tale piano è delimitato lateralmente e superiormente dalle dimensioni del veicolo e inferiormente dal suolo; il centro della sonda è sul piano ideale; per ciascuno dei quattro lati del veicolo sarà misurato almeno un punto, in corrispondenza della semi-distanza tra il suolo e il bordo inferiore del veicolo; 2) nelle posizioni di caso peggiore individuate nelle scansioni di cui al punto 1) sarà condotta una misura finale per un periodo di almeno 10 s; la lettura sarà registrata, congiuntamente alle corrispondenti coordinate spaziali, e comparata con i limiti normativi.

Le misure di CEM devono essere eseguite, secondo la procedura suddetta, in corrispondenza della posizione operativa ottimale, in cui l'autoveicolo è posizionato in modo tale che le bobine trasmittente e bobina ricevente siano centrate, come rappresentato in Figura 2, e in corrispondenza delle posizioni operative di massimo disallineamento consentito tra le due bobine lungo gli assi X e Y, tali da mantenere attivo il trasferimento di energia. Infine devono essere eseguite misure di CEM anche a bordo dell'autoveicolo, nei punti rappresentati nella Figura 3, rispettivamente in corrispondenza della posizione centrale del poggiatesta (A), posizione centrale dello schienale (B), posizione centrale del sedile (C), ad una distanza di 10 cm dalla superficie di appoggio.

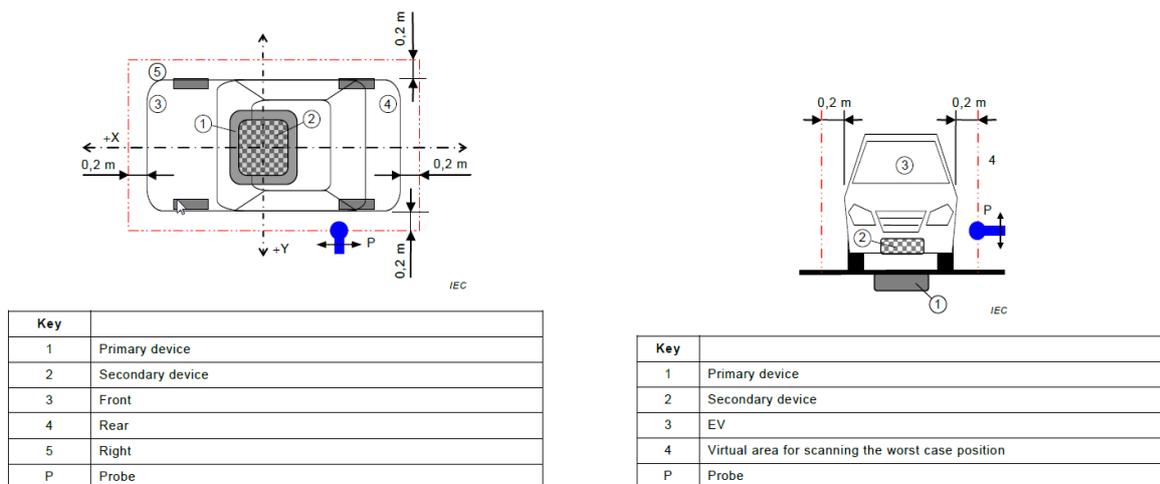


Figura 2. Punti di misura nella posizione operativa ottimale, in cui i circuiti primario e secondario sono centrati (IEC 61980-1 © IEC 2015).

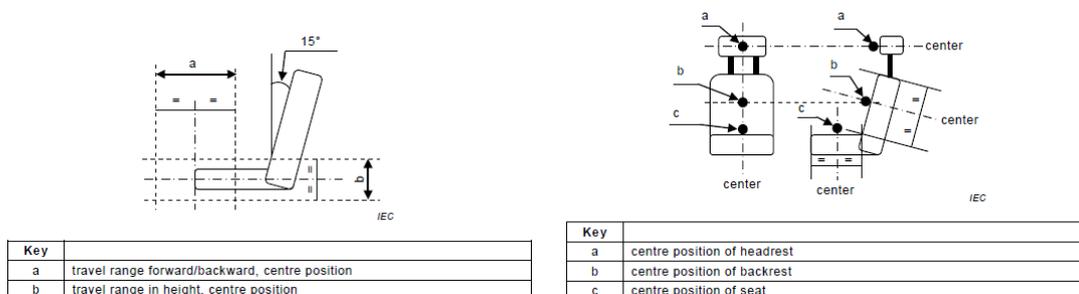


Figura 3. Punti di misura a bordo dell'autoveicolo in corrispondenza dei sedili (sedile, schienale, poggiatesta) (IEC 61980-1 © IEC 2015).

Per le misure di CEM è stato utilizzato un sensore isotropico di campo elettrico e magnetico con cui è possibile eseguire analisi selettive in frequenza e su larga banda (Narda EHP-200A, Narda Safety Test Solutions, Hauppauge, NY, USA). Tale sensore ha una frequenza operativa compresa tra 9 kHz e 30 MHz, misura campi elettrici di intensità compresa tra 0.02 e 1000 V/m e campi magnetici di intensità compresa tra 0.6 mA/m e 300 A/m; esso è dotato di un modulo interno per l'analisi spettrale in frequenza, nonché di una connessione in fibra ottica con un personal computer per il controllo automatico della misura e l'acquisizione dei dati attraverso un software dedicato.

Le misure di campo elettrico e magnetico sono state eseguite in modalità di selettiva in frequenza, utilizzando le seguenti impostazioni del programma di controllo e acquisizione: start 10 kHz, stop 40 kHz, RBW Auto, Modo Free Scan, Misura Max-hold. In tal modo, in ciascun punto di misura, sono stati acquisiti sia il valore massimo di picco sia il valore a larga banda (cioè integrato sulla larghezza di banda) dei campi E, H e B.

La corrente erogata dal SP è stata misurata contestualmente alla misura di campo elettrico e magnetico, utilizzando un oscilloscopio digitale (Tektronix DPO 2024, Tektronix Inc, Beaverton, OR, USA), con larghezza di banda pari a 200 MHz e tasso di campionamento di 1 GS/s, equipaggiato con una sonda amperometrica (Tektronix TCP 0030, 120 MHz TekVPI® 30 Ampere AC/DC).

Durante le operazioni di ricarica è stata misurata anche la potenza attiva erogata dal SP utilizzando un wattmetro digitale (ELECTREX Energy data meter X3M, Akse s.r.l., Reggio Emilia, Italia).

Lo schema del setup di misura è rappresentato in dettaglio nella Figura 4.

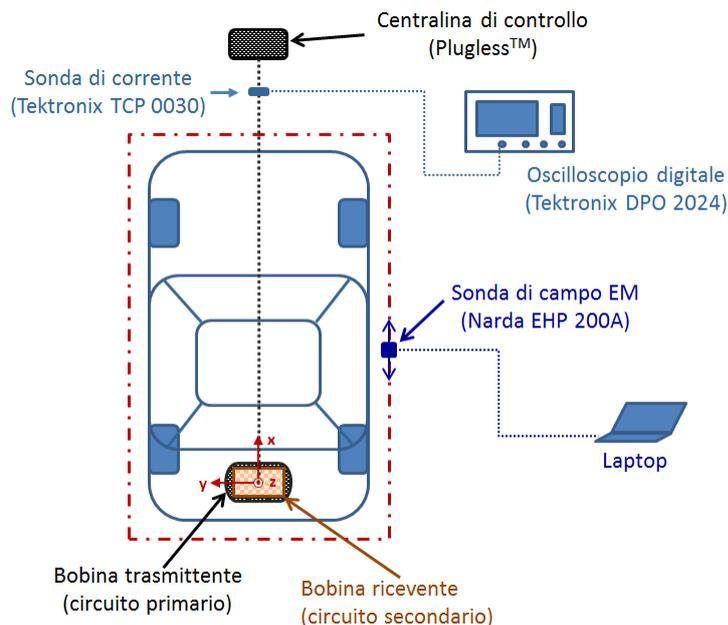


Figura 4. Schema del setup di misura.

2.3 Risultati

Le misure di CEM sono state eseguite in sito aperto presso i Laboratori della Divisione Produzione, Conversione e Uso Efficienti dell'Energia. Nella Figura 5 sono illustrate le misure condotte all'esterno del veicolo, in Figura 6 le misure condotte a bordo del veicolo.



Figura 5. Misure di campo elettrico e magnetico all'esterno del veicolo e dettaglio della bobina trasmittente.

I risultati sono forniti corredati da un'incertezza espansa ($K = 2$) di tipo B, pari rispettivamente al 19.4% per il campo E e al 21.4% per il campo B. Il fornitore del dispositivo Plugless™ non ha reso disponibile il dato della corrente nominale, rispetto a cui correggere, secondo la relazione (1), il valore del campo magnetico (H) misurato; pertanto ai fini della valutazione di conformità ai limiti di esposizione, sono stati considerati i valori di campo H relativi alla corrente effettivamente misurata. I valori misurati sono riportati come intensità efficace dei campi elettrico E (V/m), magnetico H (A/m) e di induzione magnetica B (μT), rispettivamente come valore di picco massimo (individuato alla frequenza di 19.5 kHz) e a larga banda (10 – 40 kHz).

I dati delle misure condotte all'esterno del veicolo con le bobine nella posizione operativa nominale (Figura 2) sono riepilogati nella Tabella 2. Le coordinate dei punti di misura sono riferite al sistema cartesiano

rappresentato in Figura 4, la cui origine, relativamente alle coordinate X e Y, è nel centro geometrico della bobina trasmittente mentre la coordinata Z rappresenta l'altezza dal suolo.



Figura 6. Misure di campo elettrico e magnetico a bordo del veicolo nei tre punti di riferimento (sedile, schienale, poggiatesta).

Tabella 2. Misure (valori efficaci) all'esterno del veicolo con le bobine nella posizione operativa ottimale (SP e SS centrati).

ID	X, Y, Z (cm)	E _{HP} (V/m)	E _{WB} (V/m)	H _{HP} (A/m)	H _{WB} (A/m)	B _{HP} (μT)	B _{WB} (μT)
P0	-80, 0, 16	21.7	22.0	12.4	12.5	15.6	15.7
P1	-80, 20, 16	16.4	16.5	11.5	11.5	15.0	15.2
P2	-80, -20, 16	22.9	23.0	11.5	11.6	14.3	14.4
P3	0, -110, 16	12.5	12.8	3.7	3.7	4.6	4.7
P4	-20, -110, 16	8.0	8.2	4.2	4.3	5.4	5.4
P5	20, -110, 16	12.2	12.7	2.8	2.8	3.5	3.5
P6	110, -110, 16	5.1	5.6	0.7	0.7	0.9	0.9
P7	0, 90, 16	4.7	5.2	5.3	5.3	6.7	6.7
P8	-40, 90, 16	4.2	4.7	5.6	5.8	7.1	7.2
P9	20, 90, 16	4.4	4.8	4.0	4.0	5.1	5.1
P10	130, 90, 16	7.0	7.4	1.2	1.3	1.5	1.6
P11	410, 0, 16	5.0	5.0	0.1	0.1	0.1	0.1
P12	-80, 0, 50	4.9	4.9	9.9	9.9	12.5	12.5
P13	-80, 20, 50	5.6	5.6	10.0	10.0	12.5	12.5
P14	-80, -20, 50	4.7	4.7	9.9	9.9	12.3	12.3

Parimenti, in Tabella 3 sono riportati i dati delle misure condotte a bordo del veicolo nella condizione operativa ottimale. I riferimenti dei punti di misura sono secondo la rappresentazione descritta in Figura 3.

Tabella 3. Misure (valori efficaci) a bordo del veicolo con le bobine nella posizione operativa ottimale (SP e SS centrati).

ID	Posizione	E _{HP} (V/m)	E _{WB} (V/m)	H _{HP} (A/m)	H _{WB} (A/m)	B _{HP} (μT)	B _{WB} (μT)
A	poggiatesta	ND	ND	0.04	0.08	0.05	0.1
B	schienale	ND	ND	0.05	0.08	0.05	0.1
C	sedile	ND	ND	0.04	0.08	0.05	0.1

L'intensità di corrente misurata nel SP, contestualmente alle misure di CEM nella posizione operativa ottimale, è pari a 10.6 A in valore efficace (valore massimo 15.9 A) alla frequenza di 19.5 kHz. La potenza attiva misurata contestualmente nel SP è pari a 3.6 kW in valore efficace.

I dati delle misure condotte nella posizione operativa di massimo disallineamento consentito tra le due bobine lungo l'asse Y, pari a +7 cm, sono riportati nella Tabella 4. Le coordinate dei punti di misura sono riferite al sistema cartesiano rappresentato in Figura 4.

Tabella 4. Misure (valori efficaci) nella posizione operativa di massimo disallineamento consentito tra le due bobine lungo l'asse Y (+7 cm).

ID	X, Y, Z (cm)	E_{HP} (V/m)	E_{WB} (V/m)	H_{HP} (A/m)	H_{WB} (A/m)	B_{HP} (μ T)	B_{WB} (μ T)
P0'	-80, 0, 16	24.1	24.1	15.2	15.7	19.8	19.9
P1'	-80, 20, 16	15.0	15.3	14.2	14.2	17.5	17.5
P2'	-80, -20, 16	18.1	18.3	13.7	13.9	17.2	17.4
P3'	0, -103, 16	8.6	8.6	4.7	4.7	5.9	5.9
P4'	-40, -103, 16	3.3	3.3	4.9	5.0	6.2	6.3
P5'	20, -103, 16	9.1	9.1	3.4	3.4	4.3	4.3
P6'	130, -103, 16	5.6	5.7	0.7	0.8	0.9	0.9
P7'	0, 113, 16	3.7	3.8	4.5	4.5	5.6	5.6
P8'	-20, 113, 16	3.2	3.2	5.0	5.1	6.5	6.5
P9'	20, 113, 16	3.6	3.6	3.5	3.7	4.7	4.7
P10'	130, 113, 16	7.2	7.2	0.7	0.7	0.8	0.8
P11'	410, 7, 16	4.6	4.6	0.1	0.1	0.1	0.1
P12'	-80, 7, 50	6.5	6.5	16.1	16.1	20.4	20.6
P13'	-80, 27, 50	5.8	5.8	13.5	13.6	17.2	17.3
P14'	-80, -13, 50	6.0	6.1	13.2	13.3	16.6	16.7

Parimenti, in Tabella 5 sono riportati i dati delle misure condotte a bordo del veicolo nella condizione operativa di massimo disallineamento lungo l'asse Y (+7 cm). I riferimenti dei punti di misura sono secondo la rappresentazione descritta in Figura 3.

Tabella 5. Misure (valori efficaci) a bordo del veicolo con le bobine nella posizione operativa di massimo disallineamento consentito tra le due bobine lungo l'asse Y (+7 cm).

ID	Posizione	E_{HP} (V/m)	E_{WB} (V/m)	H_{HP} (A/m)	H_{WB} (A/m)	B_{HP} (μ T)	B_{WB} (μ T)
A	poggiatesta	ND	ND	0.05	0.09	0.06	0.1
B	schienale	ND	ND	0.04	0.08	0.05	0.1
C	sedile	ND	ND	0.04	0.08	0.04	0.1

L'intensità di corrente misurata nel SP, contestualmente alle misure di CEM nella posizione operativa di massimo disallineamento tra le bobine lungo l'asse Y (+7 cm), è pari a 13.9 A in valore efficace (valore massimo 20.7 A) alla frequenza di 19.5 kHz. La potenza attiva misurata contestualmente nel SP è pari a 3.3 kW in valore efficace.

I dati riportati nelle Tabelle 3 e 5 evidenziano che i valori di campo E e campo B, misurati all'interno dell'autoveicolo, risultano inferiori di oltre un ordine di grandezza ai limiti di esposizione riportati in Tabella 1. Pertanto, nelle altre posizioni operative considerate, sono state eseguite solo misure all'esterno dell'autoveicolo in corrispondenza dei punti rappresentativi dei casi peggiori.

I dati delle misure condotte nella posizione operativa con un disallineamento tra le due bobine lungo l'asse X pari a +3 cm sono riportati nella Tabella 6. Le coordinate dei punti di misura sono riferite al sistema cartesiano rappresentato in Figura 4.

Tabella 6. Misure (valori efficaci) nella posizione operativa con un disallineamento tra le due bobine lungo l'asse X pari a +3 cm.

ID	X, Y, Z (cm)	E_{HP} (V/m)	E_{WB} (V/m)	H_{HP} (A/m)	H_{WB} (A/m)	B_{HP} (μ T)	B_{WB} (μ T)
P0''	-83, 0, 16	7.6	7.9	18.0	18.2	22.6	22.9
P12''	-83, 0, 50	6.0	6.0	13.8	14.0	17.0	17.4

L'intensità di corrente misurata nel SP, contestualmente alle misure di CEM nella posizione operativa con un disallineamento tra le bobine lungo l'asse X pari a +3 cm, è di 17.7 A in valore efficace (valore massimo

23.8 A) alla frequenza di 19.6 kHz. La potenza attiva misurata contestualmente nel SP è pari a 3.2 kW in valore efficace.

I dati delle misure condotte nelle posizioni operative con un disallineamento tra le due bobine lungo l'asse X pari rispettivamente a +6 cm, +10 cm, +16 cm sono riportati nella Tabella 7. Le coordinate dei punti di misura sono riferite al sistema cartesiano rappresentato in Figura 4. Nella medesima tabella sono riportati anche i corrispondenti valori misurati efficaci della corrente e della potenza attiva nel SP.

Tabella 7. Misure (valori efficaci) nelle posizioni operative con un disallineamento tra le due bobine lungo l'asse X pari rispettivamente a +6 cm, +10 cm e +16 cm.

ID	X, Y, Z (cm)	E _{HP} (V/m)	E _{WB} (V/m)	H _{HP} (A/m)	H _{WB} (A/m)	B _{HP} (μT)	B _{WB} (μT)	I (A)	P (kW)
PO ^{III}	-74, 0, 16	8.1	8.1	21.7	22.0	27.2	27.7	17.7	4.0
PO ^V	-70, 0, 16	6.5	6.8	21.5	21.5	27.0	27.1	17.7	4.0
PO ^V	-64, 0, 16	8.8	8.8	34.6	34.7	43.2	43.7	15.8	3.6

La posizione operativa riferita a un disallineamento, tra le bobine ricevente e trasmittente, lungo l'asse X pari a +16 cm è risultata essere una posizione limite per mantenere attivo il trasferimento di energia.

Con riferimento ai limiti di esposizione riportati nella Tabella 1, si può notare che in nessuno dei punti di misura considerati sono stati superati i livelli di riferimento per il campo E (pari a 87 V/m), mentre nella maggioranza dei punti di misura all'esterno dell'autoveicolo sono stati superati i livelli di riferimento per il campo H (pari a 5 A/m) e del campo B (pari a 6.25 μT) nelle condizioni operative considerate. In particolare, i livelli di riferimento per il campo H e per il campo B sono stati sistematicamente superati nelle posizioni operative con disallineamento tra le bobine trasmittente e ricevente; i valori massimi misurati di campo H e di campo B sono stati riscontrati in corrispondenza della condizione operativa limite con un disallineamento tra le bobine lungo l'asse X pari a +16cm.

3 Valutazione numerica dell'esposizione ai campi elettromagnetici residui emessi da un sistema di ricarica senza contatto

I risultati delle misure radiometriche eseguite sul sistema di ricarica commerciale Plugless™ hanno reso necessaria una verifica del rispetto dei limiti di base fissati dalla normativa. Come detto, questi coinvolgono le grandezze "dosimetriche", cioè le grandezze fisiche indotte nel corpo del soggetto esposto, direttamente connesse agli effetti sanitari che si intende prevenire. Nel caso della raccomandazione europea e della normativa italiana, la grandezza dosimetrica di riferimento alla frequenza di 19.5 kHz è la densità di corrente indotta J (A/m²), direttamente legata al campo elettrico indotto E (V/m) attraverso la relazione:

$$J = \sigma E \quad (2)$$

dove σ (S/m) è la conducibilità elettrica.

Per una valutazione accurata di queste grandezze dosimetriche ci si può avvalere di tecniche sperimentali, analitiche o numeriche. Queste ultime hanno mostrato le maggiori potenzialità ed hanno portato recentemente allo sviluppo di pacchetti software commerciali, che si affiancano ai programmi messi a punto in ambiti di ricerca. La proposta di applicativi per le basse frequenze (fino a qualche centinaio di kHz) è tuttora limitata e la loro diffusione scarsa.

L'applicativo commerciale utilizzato per la valutazione del campo elettrico indotto e, quindi, per la valutazione delle correnti indotte è stato EM Studio 2015 (EMS2015, CST Computer Simulation Technology AG, Darmstadt, Germania).

3.1 Il metodo numerico

Il pacchetto Software EMS2015, per la soluzione del problema elettromagnetico a basse frequenza fa uso della cosiddetta approssimazione quasi-statica, ottenendo così una grande semplificazione delle equazioni che descrivono l'accoppiamento tra campo elettromagnetico e soggetto esposto. Per poter applicare l'approssimazione quasi statica si devono considerare verificate tre distinte condizioni. La prima condizione permette di trascurare gli effetti di propagazione e di considerare il campo elettrico ed il campo magnetico come agenti fisici indipendenti, che danno origine a due problemi distinti: il problema elettrico ed il problema magnetico. Tale condizione è verificata quando le dimensioni del problema, intese come massima dimensione del teatro espositivo, sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda. La seconda condizione introduce un'ulteriore semplificazione del problema magnetico ed è applicabile quando le dimensioni dell'oggetto esposto sono piccole rispetto alla profondità di penetrazione; da questa condizione deriva che gli effetti dei campi magnetici prodotti dalle correnti indotte nei tessuti siano ridotti, e quindi il campo magnetico applicato non sia sostanzialmente perturbato dall'oggetto esposto. L'ultima condizione permette di semplificare il problema elettrico ed è verificata quando i tessuti dell'organismo esposto possono essere considerati come buoni conduttori ($\sigma \gg \epsilon$). Di conseguenza nel soggetto esposto le correnti di spostamento sono trascurabili rispetto alle correnti di conduzione.

Per la soluzione del sistema di equazioni in regime quasi-statico EMS 2015 utilizza una formulazione basata sul potenziale vettore magnetico (solutore Magneto Quasi-Statico MQS), che porta alla soluzione dell'equazione

$$\left(\nabla \times \frac{\nabla}{\mu} \times j\omega\sigma\right) \vec{A} = J_s \quad (3)$$

Dove A è il potenziale vettore, μ la permeabilità magnetica, σ la conducibilità elettrica, ω la pulsazione e J_s la densità di corrente delle sorgenti.

Tale equazione può essere risolta con due tipi di solutori: il Transient Solver, che esegue la soluzione nel dominio del tempo e il Frequency Solver, che la esegue invece nel dominio della frequenza. Il caso in esame riguarda un sistema operante a frequenza fissa, si è scelto, quindi, di lavorare con quest'ultimo solutore.

Se si utilizza il Frequency Solver, la discretizzazione del volume di calcolo può essere eseguita con una 'mesh' a tetraedri oppure a esaedri. La prima tipologia di mesh può essere utilizzata per le simulazioni dei sistemi nello spazio libero e per la dosimetria in modelli omogenei. La mesh ad esaedri è, invece, necessaria per la dosimetria su modelli anatomici realistici, in quanto la discretizzazione dei tessuti di cui sono composti è a cubetti ('voxel') di dimensioni $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$.

3.2 Modello di un prototipo di sistema di ricarica senza contatto

Per validare la capacità del codice di calcolo di simulare correttamente il problema elettromagnetico in esame, si è deciso, in una prima fase, di simulare il prototipo di sistema di ricarica senza contatto messo a punto dall'Università di Padova e caratterizzato sperimentalmente durante la scorsa annualità [1-2]. Di questo sistema sono note la geometria, i parametri elettrici in termini di induttanza e mutua induttanza e i valori di campo B e campo E residui emessi dal sistema durante la fase di ricarica.

Il sistema è costituito da due bobine planari a spirale (Figura 7): il loro raggio esterno è pari a 380 mm, il numero di avvolgimenti è pari a 15 e la distanza tra loro è di 7.5 mm. La frequenza di funzionamento è pari a 85 kHz e per ridurre il fenomeno dell'effetto pelle, che a questa frequenza inciderebbe sulle prestazioni del sistema, è stato utilizzato il filo di Litz per la realizzazione delle spirali. Per aumentare il rendimento del sistema e diminuire l'intensità dei campi residui, si è scelto di appoggiare le bobine su delle mattonelle di ferrite ($400 \times 400 \times 6 \text{ mm}^3$) aventi induzione residua pari a 0.1 T e permeabilità magnetica relativa pari a 1000. I due sistemi bobine-ferriti erano affacciati a una distanza pari a 150 mm.

Il modello numerico realizzato riproduce fedelmente la geometria del sistema (Figura 8). Le spirali sono state alimentate con una corrente di picco pari a 5.5 A sul SP e pari a 13.7 A sul SS, così come avviene in condizioni operative durante la ricarica di una batteria. Le mattonelle di ferrite sono state simulate di geometria analoga all'originale e caratterizzate con una permeabilità magnetica relativa pari a 1000. Il numero totale di celle utilizzate per la simulazione è stato pari a 325900.



Figura 7. Bobina ricevente e trasmittente del prototipo realizzato a Padova

Uno dei dati forniti dal codice di calcolo è la matrice delle impedenze del sistema. Da questa matrice è possibile ricavare i valori di induttanza e mutua induttanza del sistema da confrontare poi con i valori misurati.

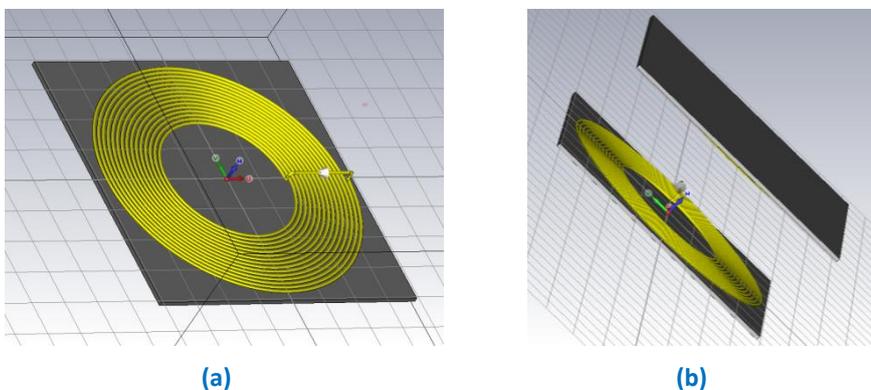


Figura 8. Geometria simulata (a) della singola bobina, (b) del sistema completo

Per confrontare i valori numerici di campo B emessi dal sistema con gli analoghi valori misurati, si sono estratti i valori di campo in corrispondenza dei punti di misura utilizzati durante la valutazione dell'esposizione ai CEM emessi dal prototipo [2], tenendo conto del volume occupato dal sensore utilizzato per le misure (EHP 200A) pari a $90 \times 90 \times 110 \text{ mm}^3$. Riassumendo, si tratta di nove punti di misura, posizionati su un piano verticale posto a una distanza di 300 mm dal prototipo e scelti in base alle sue dimensioni finali ($440 \times 440 \times 190 \text{ mm}^3$). Il punto P5 è stato posizionato al centro delle bobine, i punti P4 e P6 a una distanza di $\pm 22 \text{ cm}$ rispetto al punto P5, sulla stessa linea (bordo delle bobine). I punti P1, P2, P3 e P7, P8, P9 sono stati posti simmetricamente in alto e in basso a distanze di $\pm 50 \text{ cm}$ rispettivamente, rispetto alla prima terna.

Verificata la validità del modello, si è passati a valutazioni dosimetriche su un fantoccio omogeneo semplificato. Il fantoccio scelto ha le dimensioni dell'ellissoide descritto nella norma tecnica [4]. Questo ellissoide ha assi verticale e orizzontale rispettivamente di 1.5 m e di 0.35 m. Si è scelto di realizzarlo con muscolo equivalente le cui caratteristiche dielettriche a 85 kHz sono pari a $\epsilon_r = 8496.6$ e $\sigma = 0.36 \text{ S/m}$. L'ellissoide è stato posto a una distanza di 30 cm e con l'asse maggiore perpendicolare al sistema (Figura 9). Trattandosi di un fantoccio omogeneo, anche in questo caso si è utilizzata una mesh a tetraedri con un numero totale di celle pari a 335000 (Figura 9).

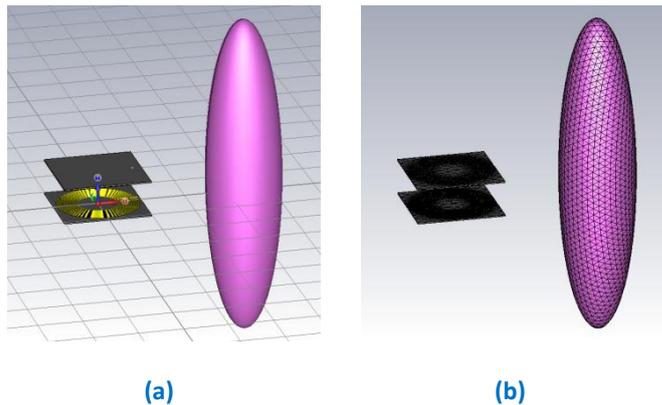


Figura 9. (a) Modello della simulazione finalizzata alla valutazione dosimetrica dell'esposizione del fantoccio omogeneo CEI 62110 posto a 30 cm dal prototipo di sistema di ricarica senza contatto, (b) visualizzazione della discretizzazione a tetraedri del volume di calcolo

A simulazione ultimata si sono estratti i valori di campo elettrico indotto (E), da cui si sono derivati i valori di densità di corrente indotta (J). Per la verifica della conformità ai limiti di base si è utilizzato come valore di riferimento il 99^{mo} percentile di tutti i valori estratti, al fine di non tenere conto di eventuali artefatti numerici che possono presentarsi in corrispondenza delle celle di interfaccia tra il mezzo dissipativo e l'aria.

3.3 Modello del sistema di ricarica senza contatto PluglessTM

A differenza del sistema prototipale realizzato all'Università di Padova, il sistema PluglessTM ha geometria ignota, a parte alcune informazioni incomplete ricavabili dalle specifiche fornite. Per questo motivo si è deciso di realizzare il modello a partire da alcune immagini radiografiche eseguite in ENEA presso il Dipartimento di Sostenibilità dei sistemi produttivi e territoriali, Divisione Uso efficiente delle risorse e chiusura dei cicli. In Figura 10 sono mostrate due delle immagini utilizzate per dedurre la geometria dei sistemi ricevente e trasmittente.

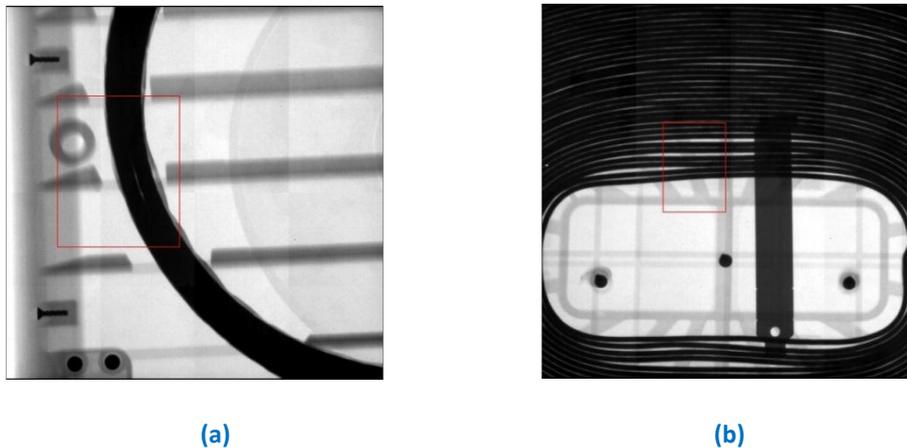


Figura 10. Immagini radiografiche delle bobine PluglessTM: (a) trasmittente, (b) ricevente

Dall'analisi delle immagini e dalle specifiche tecniche fornite, si sono potute dedurre le seguenti informazioni:

- Sistema Primario: ha forma ellittica, le dimensioni esterne dell'asse maggiore e dell'asse minore sono rispettivamente pari a 434 mm e 324 mm. La sezione trasversale della bobina ha forma rettangolare di dimensioni pari a 20 x 50 mm². Il numero di avvolgimenti è incognito.
- Sistema Secondario: è una spirale piana quasi rettangolare, le dimensioni del rettangolo interno sono pari a 182 x 80 mm², le dimensioni del rettangolo esterno sono pari a 448 x 133 mm², lo spessore è 20 mm. Il numero di avvolgimenti è pari a 45.

La geometria delle bobine risultava piuttosto complessa da introdurre nel codice di calcolo, per cui si è deciso di utilizzare, in questo caso, una delle sorgenti primitive di EMS2015 denominata 'coil', con la quale è

possibile disegnare una sorgente la cui geometria rispetta la forma e le dimensioni di massima del sistema reale. Fatto ciò, è possibile fornire a queste primitive il numero di avvolgimenti e la corrente di alimentazione.

In Figura 11 Sono mostrati i modelli di sorgente realizzati per il SP e per il SS.

Realizzati questi modelli, nel sistema finale sono stati affiancati e distanziati di 10 cm l'uno dall'altro (Figura 12).

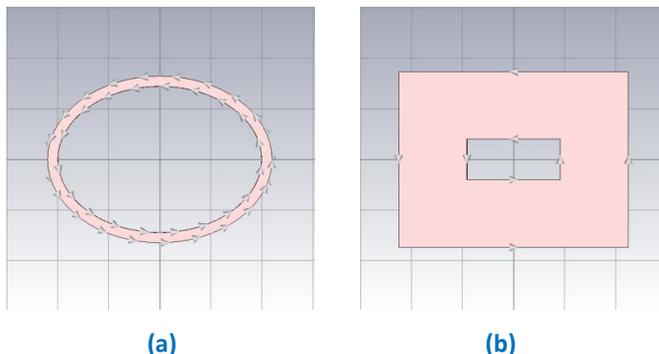


Figura 11. Geometria del modello numerico delle bobine Plugless™: (a) trasmissente, (b) ricevente

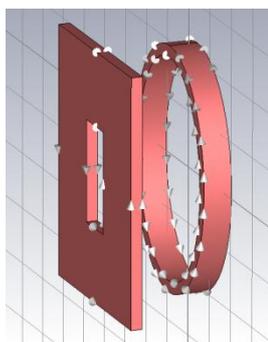


Figura 12. Geometria del modello completo del sistema Plugless™

Come visto, durante le misure finalizzate alla valutazione dell'esposizione (Cap. 2), si sono misurate anche le correnti che alimentavano il SP nelle diverse condizioni. A partire da queste misure e dalle specifiche del sistema è stato possibile risalire alla corrente che alimenta il SS: le correnti sono state impostate pari a 10.6 A e 5.8 A (valori efficaci) rispettivamente per il SP e SS. A questo punto l'unica incognita rimasta era rappresentata dal numero di avvolgimenti del SP. Per ottenere questo dato, sono state eseguite una serie di simulazioni, mantenendo costante la geometria del sistema e variando il numero di avvolgimenti del SP; a simulazione ultimata si confrontavano il valore del campo B misurato nel caso di bobine con massimo accoppiamento nel punto P0 e pari a 15.4 μ T, con il valore numerico ottenuto nella posizione analoga e mediato sul volume di misura del sensore EHP200A. Il numero ottimo di avvolgimenti trovato è stato pari a 55: tale dato è stato impostato nel modello per tutte le simulazioni successive.

A questo punto è importante notare che le risorse di calcolo a disposizione non hanno permesso di poter simulare la condizione realistica di esposizione, vale a dire il sistema montato sull'automobile. Infatti il numero di celle, necessario a discretizzare una geometria simile, sarebbe stato troppo elevato per le prestazioni della workstation utilizzata per le simulazioni. Per questo motivo, il confronto è stato fatto solo sul campo B, in quanto risulta essere quello meno perturbato dalla presenza dell'automobile e quindi i dati misurati e simulati possono essere considerati confrontabili.

Con questa geometria si è poi fatto un confronto con i dati sperimentali ottenuti nei punti P0, P1, P2, P3, P7, P12 identificati nel paragrafo 2.3.

Dato che nelle condizioni sperimentali non è garantito un allineamento perfetto delle due bobine, è stata fatta una analisi numerica di variabilità del campo B spostando il SS di ± 20 mm lungo x e ± 20 mm lungo y rispetto al SP.

Verificata la validità del modello in aria, si è passati alla valutazione dosimetrica sull'ellissoide CEI 62110. In questo caso, trattandosi di un sistema operante a 19.5 kHz, i parametri dielettrici del muscolo sono stati impostati nel modo seguente: $\epsilon_r = 15763$ e $\sigma = 0.34$ S/m.

L'ellissoide è stato posto in diverse posizioni (Figura 13) rispetto al sistema di ricarica:

- Posizione 1: ellissoide a 30 cm di distanza dal sistema, asse maggiore perpendicolare al sistema, asse minore coplanare al piano mediano del sistema. Questa posizione è stata scelta per un confronto diretto con le simulazioni fatte sul prototipo realizzato all'Università di Padova;
- Posizione 2: ellissoide a 30 cm di distanza dal sistema, ma posizionato in modo tale che la sua parte più inferiore si trova a $z = +20$ cm rispetto alla base del sistema di ricarica. Questa posizione è stata scelta per riprodurre una situazione in cui il sistema è posto a terra;
- Posizione 3: ellissoide posto a 80 cm dal centro del sistema, posizionato secondo l'asse z come nella posizione 2. Questa distanza è quella utilizzata nelle misure (punto P0, P1, P2), corrisponde a una distanza di 20 cm dalla parte posteriore dell'auto, rappresentativa di un caso realistico di esposizione peggiore.

Anche in questi casi si è utilizzata una mesh a tetraedri (Figura 14): a simulazione ultimata si sono estratti i valori di campo elettrico indotto, da cui si sono derivati i valori di densità di corrente indotta. Così come nel caso precedente per il confronto con i limiti di base si è utilizzato come valore di riferimento il 99^{mo} centile di tutti i valori estratti.

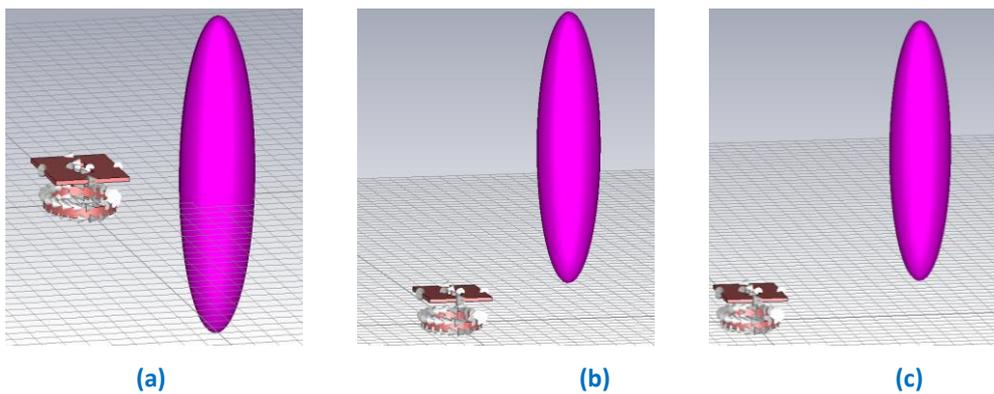


Figura 13. Modelli delle simulazioni finalizzate alla valutazione dosimetrica dell'esposizione: (a) Posizione 1, (b) Posizione 2, (c) Posizione 3

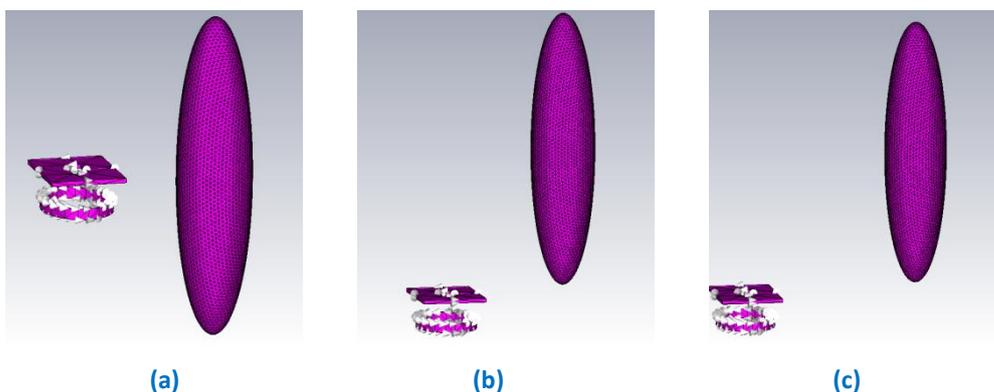


Figura 14. Discretizzazione delle simulazioni finalizzate alla valutazione dosimetrica dell'esposizione: (a) Posizione 1, numero di celle= 142508, (b) Posizione 2, numero di celle = 142799, (c) Posizione 3, numero di celle = 147057

3.4 Risultati

3.4.1 Dosimetria numerica del prototipo del sistema di ricarica senza contatto

La validazione del modello numerico del prototipo di sistema di ricarica senza contatto, realizzato all’Università di Padova, è stata eseguita mediante il confronto fra i dati sperimentali e numerici relativi alla induttanza e mutua induttanza del sistema, nonché mediante il confronto tra le misure sperimentali e dati numerici di campo B (valori efficaci) secondo le modalità descritte nel paragrafo 3.2.

In Tabella 8 è mostrato il primo confronto sui parametri elettrici del sistema; si è poi passati a confrontare i dati sperimentali con quelli numerici relativi al campo B (Tabella 9).

Tabella 8. Confronto fra i valori misurati e simulati dei parametri elettrici del prototipo dell’Università di Padova

L_{mis} [μH]	L_{num} [μH]	M_{mis} [μH]	M_{num} [μH]
123	134	31	32

Tabella 9. Confronto fra i valori misurati e simulati dei valori di campo B (valori efficaci) in corrispondenza dei punti utilizzati durante le valutazioni radiometriche del prototipo dell’Università di Padova

Posizione	B_{mis} [μT]	B_{sim} [μT]
P1	3.7 ± 0.8	4.2
P2	4.0 ± 0.9	4.9
P3	3.6 ± 0.8	4.2
P4	6.7 ± 1.4	8.4
P5	8.8 ± 1.9	10.9
P6	6.5 ± 1.4	8.4
P7	3.6 ± 0.8	4.5
P8	3.9 ± 0.8	5.2
P9	3.3 ± 0.7	4.5

Dai dati mostrati nelle tabelle si può dedurre che c’è un buon accordo tra dati misurati e dati simulati, sia per quel che riguarda i parametri elettrici che per quel che riguarda il campo B. Si può quindi concludere che il modello numerico realizzato, tenuto conto delle idealità introdotte dal codice di calcolo, è valido.

Per quel che riguarda le valutazioni dosimetriche (Figura 15), il 99^{mo} percentile della distribuzione di campo E indotto all’interno del fantoccio è pari a 405 mV/m a cui corrisponde una densità di corrente pari a 145.8 mA/m² (valori efficaci), conforme al limite di base per la popolazione (170 mA/m²a 85 kHz) riportato nella raccomandazione europea a cui, come detto, la legislazione italiana fa riferimento.

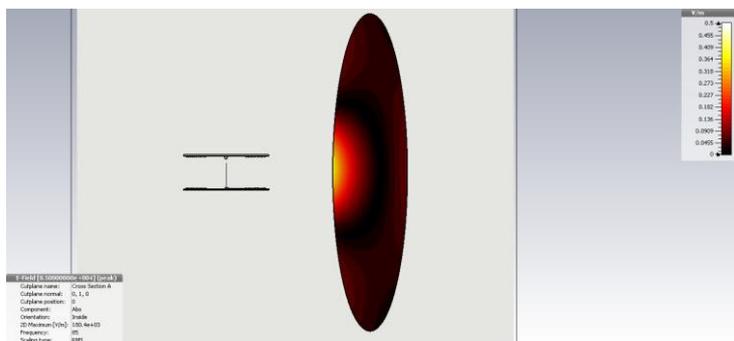


Figura 15. Distribuzione numerica di campo E indotto nel fantoccio CEI 62110 esposto al campo residuo generato dal prototipo dell’Università di Padova (piano y = 0)

Questa posizione permette di fare un confronto diretto con la simulazione eseguita sul sistema di ricarica dell'Università di Padova. Come si può osservare, l'assenza di una schermatura fa sì che i campi dispersi intorno al dispositivo siano più alti di quelli osservabili nel caso del prototipo dell'Università di Padova (Figura 13). In questo caso, il 99^{mo} percentile della distribuzione di campo E indotto all'interno del fantoccio è pari a 497 mV/m a cui corrisponde una densità di corrente pari a 179.9 mA/m² (valori efficaci), non conforme al valore indicato per la popolazione nella raccomandazione europea a 19.5 kHz (vedi Tabella 1). In Figura 18 è riportata la distribuzione di campo E sul piano y = 0 nel caso della Posizione 2.

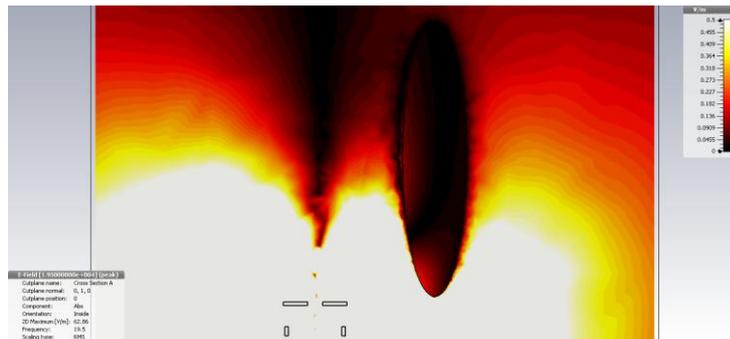


Figura 18. Distribuzione numerica di campo E indotto nel fantoccio CEI 62110 esposto al campo residuo generato dal sistema di ricarica Plugless™ (piano y = 0) nella Posizione 2.

Il 99^{mo} percentile della distribuzione di campo E indotto all'interno del fantoccio è pari a 300 mV/m a cui corrisponde una densità di corrente pari a 108 mA/m² (valori efficaci), anche questa volta non conforme al valore indicato per la popolazione nella raccomandazione europea.

In Figura 19 è riportata la distribuzione di campo E sul piano y = 0 nel caso della Posizione 3.

Il 99^{mo} percentile della distribuzione di campo E indotto all'interno del fantoccio è pari a 115 mV/m a cui corrisponde una densità di corrente pari a 41.4 mA/m² (valori efficaci), non conforme al valore indicato per la popolazione nella raccomandazione europea.

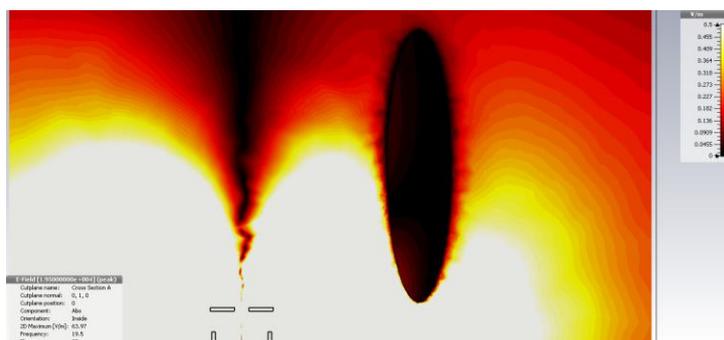


Figura 19. Distribuzione numerica di campo E indotto nel fantoccio CEI 62110 esposto al campo residuo generato dal sistema di ricarica Plugless (piano y = 0) nella Posizione 3.

4 Conclusioni

Le attività di ricerca svolte durante l'annualità 2014-2015, nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, dal gruppo di bioelettromagnetismo della Divisione Tecnologie e metodologie per la salvaguardia della salute, hanno riguardato la valutazione sperimentale e numerica dei

campi elettromagnetici residui emessi da un sistema di ricarica senza contatto per veicoli elettrici disponibile sul mercato statunitense (Plugless™), acquistato dal Laboratorio Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo e montato su un autoveicolo elettrico modello Nissan Leaf in dotazione del laboratorio. Questo sistema è in grado di effettuare una ricarica con una potenza pari a 3.3 kW e opera alla frequenza di 19.5 kHz. Questo tipo di sistemi, durante le operazioni di ricarica, emettono dei CEM residui che potenzialmente possono eccedere i limiti normativi sull'esposizione umana recepiti dalla legislazione italiana.

Seguendo l'approccio previsto dalla normativa, in una prima fase si sono eseguite misure radiometriche dei CEM residui emessi dal sistema Plugless™ in condizioni operative, secondo la norma tecnica [3].

I risultati delle valutazioni radiometriche hanno evidenziato che in nessuno dei punti di misura considerati sono stati superati i livelli di riferimento per il campo E (pari a 87 V/m), mentre nella maggioranza dei punti di misura all'esterno dell'autoveicolo sono stati superati i livelli di riferimento per il campo H (pari a 5 A/m) e per il campo B (pari a 6.25 μ T). In particolare, i livelli di riferimento per il campo H e per il campo B sono stati sistematicamente superati nelle posizioni operative con disallineamento tra le bobine trasmettente e ricevente; i valori massimi misurati di campo H e di campo B sono stati riscontrati in corrispondenza della condizione operativa limite con un disallineamento tra le bobine lungo l'asse X pari a +16cm.

I risultati sopra riportati hanno quindi reso necessario l'esecuzione di valutazioni dosimetriche finalizzate al confronto con i limiti di base, così come previsto dalla normativa. Per fare questo si è utilizzato un codice di calcolo commerciale (EMS2015) dotato di un solutore in bassa frequenza. La validità del codice nel simulare questo tipo di sorgenti, è stata verificata mediante la realizzazione del un modello del prototipo realizzato all'Università di Padova di cui erano note la geometria, le caratteristiche elettriche i valori di campo B in determinati punti [2]. Fatto questo, si è eseguita una prima valutazione dosimetrica utilizzando il fantoccio definito in [4] e posto in una posizione opportuna. In [2] si era verificato che i valori del campo B misurati a 30 cm dal prototipo su una linea orizzontale, mediana al sistema, superavano il livello di riferimento stabilito dalla raccomandazione europea del 1999 per la popolazione. Lo studio dosimetrico ha tuttavia evidenziato la conformità ai limiti di base: infatti il valore simulato di densità di corrente indotta J (99^{mo} percentile della distribuzione dei valori) è risultato pari a 145.8 mA/m², minore del limite di base riportato nella raccomandazione europea e pari a 170 mA/m² a 85 kHz. Questo conferma la validità dell'approccio a due fasi, in quanto permette di prevenire possibili sovrastime del rischio che limiterebbero l'utilizzo di determinate apparecchiature.

Si è poi passati a realizzare un modello numerico del sistema Plugless™ la cui validità è stata verificata confrontando i valori di campo B simulati con i valori misurati durante le sessioni sperimentali. Anche in questo caso si è utilizzato il fantoccio descritto in [4], posizionato in modi diversi rispetto al sistema di ricarica. In tutti i casi simulati, il valore di corrente indotta J (99^{mo} percentile della distribuzione dei valori) risulta non conforme al limite di base riportato nella raccomandazione europea e pari a 39 mA/m² a 19.5 kHz.

E' da notare che il sistema Plugless™ non sia omologato per il mercato europeo ma, essendo commercializzato negli Stati Uniti d'America, è conforme ai limiti di esposizione recepiti dalla legislazione statunitense (IEEE Std C95.1:2005) che risultano essere superiori ai limiti della raccomandazione europea.

Con riferimento all'analisi dosimetrica è importante sottolineare che un fantoccio omogeneo a geometria semplificata, come quello ellissoidale utilizzato in questo lavoro, rappresenta una condizione di caso peggiore con riferimento all'accoppiamento del campo elettromagnetico esterno con il campo elettrico indotto. Per questo motivo negli ultimi anni c'è stata una grande evoluzione nella realizzazione di modelli anatomici realistici che però richiedono un elevato impegno di risorse computazionali, soprattutto in bassa frequenza. La disponibilità di risorse di calcolo ad alte prestazioni consentirebbe l'utilizzo di questi modelli per condurre valutazioni dosimetriche più accurate e realistiche.

Questo studio ha consentito di mettere a punto una metodologia numerico-sperimentale per la caratterizzazione dell'esposizione ai CEM emessi dai sistemi di ricarica senza contatto: tale metodologia ha valenza generale e può essere adottata anche per casi espositivi più complessi (sistemi per ricarica rapida, sistemi dedicati a veicoli industriali o mezzi per il trasporto pubblico).

5 Riferimenti bibliografici

1. G. Buja, M. Bertoluzzo, 'Progetto e sperimentazione di un caricabatteria contactless per city car', Report RdS/PAR2013/098.
2. R. Pinto, V. Lopresto, C. Merla, S. Mancini, 'Caricabatteria contactless per city car: caratterizzazione sperimentale e misure radiometriche dei campi elettromagnetici residui per la valutazione dell'esposizione occupazionale', Report RdS/PAR2013/104).
3. IEC 61980-1:2015, 'Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements', 2015.
4. CEI 62110:2009, 'Livelli di campo elettrico e magnetico generati da sistemi di potenza in c.a. - Procedure di misura con riferimento all'esposizione umana', 2009.