



Ricerca di Sistema elettrico

## Campi elettromagnetici e e-mobility: introduzione alla tematica e stato dell'arte

R. Pinto, V. Lopresto, L. Ardoino

## CAMPI ELETTROMAGNETICI E E-MOBILITY: INTRODUZIONE ALLA TEMATICA E STATO DELL'ARTE

R. Pinto, V. Lopresto SSPT-TECS-TEB  
L. Ardoino SSPT-TECS-SAM

Dicembre 2019

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Mobilità

Linea di attività 2.10: V2H wireless e campi elettromagnetici della e-mobility: analisi delle potenzialità del V2H e disamina della letteratura su CEM ed elettromobilità

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 QUADRO NORMATIVO .....	5
2.2 CEM E VEICOLI ELETTRICI E IBRIDI.....	7
2.3 CEM E STAZIONI DI RICARICA.....	11
2.4 OTTIMIZZAZIONE DEL MODELLO NUMERICO DEL SISTEMA WPT DINAMICO .....	13
2.5 PROSPETTIVE APPLICATIVE DI MERCATO DEI SISTEMI DI RICARICA WIRELESS DINAMICA .....	18
2.6 RAPPORTO SULLO STATO DELL'ARTE DELLE NORME TECNICHE SUI SISTEMI WPT (AGGIORNAMENTO AL 31 GENNAIO 2020) .....	22
2.6.1 <i>Scopo</i> .....	22
2.6.2 <i>Gruppi di lavoro IEC attivi sulla standardizzazione dei sistemi WPT</i> .....	22
2.6.3 <i>Collegamenti (liaisons) tra i comitati tecnici IEC attivi sulla standardizzazione dei sistemi WPT</i> .....	23
2.6.4 <i>Altri comitati tecnici attivi sulla standardizzazione dei sistemi WPT</i> .....	23
2.6.5 <i>Norme tecniche sui sistemi WPT o che includono i sistemi WPT disponibili sul sito web IEC Webstore (https://webstore.iec.ch/)</i> .....	24
3 CONCLUSIONI.....	24
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	25

## Sommario

Il progresso tecnologico nel settore della mobilità elettrica che ha visto e vedrà sempre più la realizzazione di veicoli che impiegano correnti di centinaia di Ampere per il loro funzionamento e di stazioni di ricarica fast/ultrafast di centinaia di kW e wireless, può accrescere l'incidenza dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici (CEM) accidentali emessi da questo tipo di dispositivi. Durante questa prima annualità si è eseguita un'analisi della letteratura su questa tematica con lo scopo di evidenziare eventuali lacune nella conoscenza e di porre le basi per le attività scientifiche del biennio successivo. Per quanto riguarda l'esposizione della popolazione ai CEM emessi dai veicoli elettrici/ibridi si sono raccolti e analizzati 16 lavori pubblicati tra il 2003 e il 2019. In tutti i lavori è stata evidenziata la complessità dello scenario di esposizione e la necessità di eseguire le valutazioni di esposizione in condizioni di moto dell'auto. Pur nella diversità dei protocolli di misura e della strumentazione utilizzata, nessuno dei lavori analizzati evidenzia delle situazioni di sovraesposizione rispetto alle normative vigenti. I limiti dei lavori analizzati stanno nella mancanza di standardizzazione delle procedure di misura e nella non univocità nella scelta del parametro di esposizione, che rendono i lavori e i risultati scarsamente confrontabili tra di loro. Per quanto riguarda i sistemi di ricarica, al momento non sono presenti in letteratura lavori sulle colonnine di ricarica convenzionali. Diverso è il caso dei sistemi di ricarica wireless applicati ai veicoli elettrici per i quali sono stati revisionati 16 lavori. L'analisi dei lavori è risultata piuttosto complessa, infatti, a fronte di alcune apparenti similitudini, la mancanza di una procedura specifica e definita per la valutazione di queste situazioni espositive, dovuta al fatto che i sistemi auto elettrica-WPT sono ancora sperimentali o comunque estremamente limitati, rende il confronto tra i lavori piuttosto difficile, riducendolo, di fatto al confronto delle conclusioni in termini di verifica del rispetto delle restrizioni di base secondo le linee guida ICNIRP [2, 17]. Nei lavori in cui è stata rilevata una sovraesposizione rispetto ai livelli di riferimento definiti in [1, 2, 17], i valori delle grandezze di base, ottenuti con i codici di calcolo, non eccedono le restrizioni di base. Da questa analisi sono derivate indicazioni utili sulle metodiche implementate che hanno, da una parte confermato la validità di quanto fatto in passato dal nostro gruppo e dall'altra fornito spunti di riflessione importanti le attività future.

Si è poi messo a punto e ottimizzato un modello numerico del sistema prototipale di WPT dinamico realizzato in ENEA durante il precedente triennio di ricerca. Il confronto tra i dati sperimentali e i dati numerici, ottenuti sul modello numerico ottimizzato, presenta un ottimo accordo, rendendo il modello numerico utile per le successive simulazioni di dosimetria. Si sono inoltre presentate le attività riguardanti la definizione e standardizzazione dei metodi e procedure di valutazione dell'esposizione umana ai campi elettrici e magnetici emessi dai sistemi WPT, che i gruppi di lavoro internazionali WG9 e PT63184 del sottocomitato TC106 della IEC (International Electrotechnical Commission) stanno elaborando.

## 1 Introduzione

Per riuscire a contenere il riscaldamento medio del pianeta sotto i due gradi, come prevede l'accordo di Parigi sul clima, si punta ad avere, entro 20 anni, 600 milioni di vetture elettriche in circolazione in tutto il mondo. Già diverse case automobilistiche hanno annunciato per i prossimi anni la presentazione di un gran numero di nuove auto elettriche e questo incremento non riguarda solo la mobilità privata, ma anche quella pubblica e industriale. Molte città italiane hanno investito o intendono investire nel rinnovo e nella conversione all'elettrico della flotta dei mezzi pubblici di superficie.

Con questo scenario, è previsto un aumento del numero di stazioni di ricarica sempre più veloci ed efficienti: il Piano Nazionale Infrastrutturale per la Ricarica dei veicoli alimentati ad energia Elettrica (PNire) prevede il completamento e il consolidamento della rete di infrastrutture di ricarica pubblica (e privata). In questo ambito, recentemente, ENEL ha annunciato l'installazione di 7000 colonnine (tra quick 22 kW nelle aree urbane, fast 50 kW e ultrafast 150 kW) entro il 2020, per arrivare a 14000 nel 2022. Considerati i tempi di ricarica veloce, che si attestano su un ordine della mezz'ora, è prevedibile che per ogni stazione di ricarica, verranno installate numerose colonnine e che le stazioni di ricarica saranno strutturate in modo simile alle attuali stazioni di servizio convenzionali.

Un discorso a parte lo meritano i sistemi alternativi di ricarica quali ad esempio la ricarica senza contatto (wireless power transfer, WPT). La ricarica stazionaria è già una realtà con prototipi e con alcuni oggetti sul mercato dedicati ai modelli di veicolo elettrico più diffusi. Vista la comodità di questi sistemi, è assolutamente plausibile la realizzazione, in un immediato futuro, di parcheggi di car sharing oppure di autobus pubblici in cui sia possibile ricaricare i veicoli in modalità wireless durante la sosta. La ricarica dinamica wireless è, invece, una tecnologia ancora non completamente matura e che, comunque, richiederà importanti investimenti sulla rete viaria e autostradale.

È prevedibile, quindi, che il progresso tecnologico nel settore della mobilità elettrica che ha visto e vedrà sempre più la realizzazione di veicoli che impiegano correnti di centinaia di Ampere per il loro funzionamento e di stazioni di ricarica fast/ultrafast di centinaia di kW e wireless, possa accrescere l'incidenza dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici (CEM), ponendo all'attenzione il problema della valutazione dei CEM emessi dai veicoli elettrici/ibridi e dai vari sistemi di ricarica, con riferimento alla protezione della salute degli utenti e con un particolare riguardo degli utenti che sono portatori di dispositivi medici impiantabili.

Durante questo primo anno di attività si è eseguita una revisione della letteratura riguardante le due tematiche citate, vale a dire la valutazione dell'esposizione ai CEM emessi dai veicoli elettrici/ibridi e dalle stazioni di ricarica cablate o wireless, con lo scopo di evidenziare eventuali lacune nella conoscenza e di porre le basi per le attività scientifiche del biennio successivo. Inoltre si è completata la caratterizzazione sperimentale del CEM emesso da un sistema prototipale di WPT dinamico realizzato in ENEA durante il precedente triennio di ricerca, e si è realizzato e ottimizzato un suo modello numerico da utilizzare per le simulazioni di dosimetria. A questo, si sono aggiunte le attività riguardanti la definizione e standardizzazione dei metodi e procedure di valutazione dell'esposizione umana ai campi elettrici e magnetici emessi dai sistemi WPT, che i gruppi di lavoro internazionali WG9 e PT63184 del sottocomitato TC106 della IEC (International Electrotechnical Commission) stanno elaborando per la redazione di una norma tecnica internazionale di base.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Quadro Normativo

Tutti i sistemi elettrici generano CEM accidentali come conseguenza delle correnti e delle tensioni presenti nei loro circuiti. Nel caso delle tecnologie legate alle mobilità elettrica, l'esposizione fortuita ai CEM emessi avviene a frequenze inferiori ai 100 kHz (basse frequenze e frequenze intermedie). A queste frequenze i campi magnetici (CM) inducono campi elettrici e correnti all'interno dei tessuti umani che possono indurre elettrostimolazioni indesiderate a livello muscolare e nervoso. Si tratta di effetti acuti, che si manifestano al

di sopra di una certa soglia di induzione, nei confronti dei quali esiste un ampio consenso scientifico; 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. L’Unione Europea ha pubblicato nel 1999 una Raccomandazione [1] relativa alla limitazione dell’esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz. Questa Raccomandazione fornisce i criteri minimi a cui gli stati membri devono attenersi nel redigere le regolamentazioni nazionali. Questo documento si basa sull’impianto normativo definito nelle linee guida dell’International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) per la protezione della popolazione nel 1998 [2]. In primo luogo, vengono definite le grandezze fisiche “dosimetriche” (grandezze di base) proprie dell’interazione tra i CEM e i sistemi biologici e vengono definite dei *limiti di base* su queste grandezze. 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 campo elettrico (E, V/m), del campo magnetico (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 i cosiddetti *livelli di riferimento* per le grandezze misurabili in condizioni di massimo accoppiamento tra i campi e il corpo esposto. I livelli di riferimento garantiscono il rispetto dei limiti di base in tutte le circostanze di esposizione. 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.

Fino a 100 kHz, l’interazione dei campi con il soggetto esposto si esplica nell’induzione di correnti: in questo caso in ICNIRP 1998 [2], nell’intervallo di frequenze compreso tra 1 Hz e 100 kHz, si è definito come grandezza di base la densità di corrente indotta (J, A/m<sup>2</sup>). I limiti di base per i campi alle frequenze estremamente basse (ELF) sono basati sugli effetti nocivi accertati sul sistema nervoso centrale: al variare della frequenza sono stati, quindi, assegnati dei limiti di base per la densità di corrente indotta che, a partire dalle soglie per gli effetti acuti e certi riscontrati in letteratura e includendo un fattore di sicurezza, assicurano la non insorgenza di tali effetti. Tuttavia, poiché i limiti di base si riferiscono agli effetti nocivi sul sistema nervoso centrale, sono possibili intensità di corrente più elevate in tessuti corporei diversi dal sistema nervoso centrale a parità di condizioni di esposizione. La conformità a questi limiti deve essere sempre assicurata. In Tabella 1 e 2 sono mostrati i limiti di base (in valore efficace) e i livelli di riferimento (in valore efficace), rispettivamente fissati in ICNIRP 1998 e mutuati dalla Raccomandazione Europea del 1999 per la protezione della popolazione dall’esposizione ai CEM di frequenza fino a 100 kHz.

**Tabella 1. Limiti di base fino a 100 kHz in [1,2]**

Frequenza	Densità di flusso magnetico [B, mT]	Densità di corrente [J, mA/m <sup>2</sup> ]
0 Hz	40	
>0-1 Hz		8
1-4 Hz		8/f
4-1000 Hz		2
1-100 kHz		f/500

Note: f è la frequenza in Hz.

**Tabella 2: Livelli di riferimento fino a 100 kHz in [1,2]**

Frequenza	Intensità di campo E [V/m]	Intensità di campo H [A/m]	Campo B [ $\mu$ T]
0-1 Hz		$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$
1-8 Hz	10000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$
8-25 Hz	10000	$4000/f$	$5000/f$
0.025-0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$
0.8-3 kHz	$250/f$	5	6.25
3-100 kHz	87	5	6.25

Note: f è la frequenza come indicata nella colonna 'Frequenza'.

In Italia, la Legge del 22 febbraio 2001 n. 36 "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici" [3], assicura la tutela della salute della popolazione dagli effetti dell'esposizione ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (art. 1, comma 1, lett. a).

I limiti di esposizione ai CEM per la protezione della popolazione sono fissati dai due decreti attuativi del presidente del consiglio dei ministri (DPCM) dell'8 luglio 2003, riferiti, rispettivamente, alle alte frequenze (100 kHz – 300 GHz) [4] e alle basse frequenze (0 Hz – 100 kHz) [5]. I DPCM recepiscono i limiti di esposizione indicati in [1], ad eccezione dei limiti relativi alle emissioni di CEM generati, rispettivamente, da sorgenti riconducibili ai "sistemi fissi delle telecomunicazioni e radiotelevisivi"[4], e da sorgenti operanti alla frequenza di rete (50 Hz) e riconducibili al "funzionamento e all'esercizio degli elettrodomesti"[5]. Per tali categorie di sorgenti sono fissati anche limiti variabili in funzione della prevista durata dell'esposizione. Nello specifico, il DPCM 8 luglio 2003 per le basse frequenze (0 Hz – 100 kHz) e gli elettrodomesti "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 elettrodomesti."[5], stabilisce (articolo 1, comma 3) che "A tutela delle esposizioni a campi a frequenze comprese tra 0 Hz e 100 kHz, generati da sorgenti non riconducibili agli elettrodomesti, si applica l'insieme completo delle restrizioni stabilite nella raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea del 12 luglio 1999". Per le emissioni di CEM generati da sorgenti operanti alla frequenza di rete (50 Hz) riconducibili al "funzionamento e all'esercizio degli elettrodomesti", il DPCM fissa limiti di esposizione (articolo 3, comma 1) per il campo di induzione magnetica (100  $\mu$ T, da intendersi come valore efficace) e per il campo elettrico (5 kV/m, da intendersi come valore efficace), nonché i valori di attenzione (articolo 3, comma 2) per il campo di induzione magnetica (10  $\mu$ T, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio) a titolo di misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine, eventualmente connessi con l'esposizione ai campi magnetici nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere. Nella progettazione di nuovi elettrodomesti e nella progettazione dei nuovi insediamenti in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, il DPCM fissa inoltre l'obiettivo di qualità (articolo 4, comma 1) per il campo di induzione magnetica (3  $\mu$ T, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio), ai fini della progressiva minimizzazione della esposizione ai campi elettrici e magnetici generati dalle sorgenti suddette.

## 2.2 CEM e veicoli elettrici e ibridi

Per l'analisi dello stato dell'arte riguardante lo studio delle emissioni dei CEM emessi da veicoli elettrici e ibridi si sono raccolti 16 lavori pubblicati su rivista scientifica dal 2003 al 2019.

Le componenti principali dei veicoli elettrici e ibridi, quali i motori elettrici, i convertitori di potenza le batterie e i cavi che connettono tutte queste parti sono sorgenti di campi magnetici (CM) posizionate in prossimità dei passeggeri. In molti casi, i cavi, che trasportano le correnti ad alta tensione dalle batterie,

posizionate sul retro o sotto l'auto, al motore, posto davanti, passano sotto i sedili del guidatore e del passeggero. In [6] sono state identificate le diverse sorgenti di CM presenti in una auto elettrica/ibrida.

#### *Correnti di trazione*

La rete di potenza ad alta tensione agisce come un loop di corrente che genera un CM a frequenza pari a 0 Hz. In [6], il rapporto tra il campo B e la corrente di trazione è dell'ordine di 0.2-1.0  $\mu\text{T}/\text{A}$  (dipende dalle auto). Pertanto, se la corrente di trazione ha variazioni fino a  $\pm 300$  A, il campo B associato può raggiungere variazioni fino a  $\pm 300$   $\mu\text{T}$ . Il campo B associato alle correnti di trazione presenta una variabilità spaziale piuttosto alta, in quanto dipende da come i cavi sono montati all'interno dell'auto. Questi valori di campo B misurati in [6] sono molto inferiori a quanto raccomandato in [1] (40 mT a 0 Hz), ma ci possono essere delle componenti a frequenze superiori a 1 Hz a causa dei transienti della corrente di trazione.

#### *Ruote*

La magnetizzazione permanente dei pneumatici rinforzati in acciaio è una sorgente nota di CM all'interno del veicolo [7]. In [7] si è misurato il campo B generato da questa tipologia di pneumatici montati su 12 auto all'interno dei veicoli. Il massimo valore misurato è stato di circa 10  $\mu\text{T}$  ai piedi del guidatore con componenti spettrali fino a circa 45 Hz, per una velocità del veicolo pari a 80 km/h. In [6] il campo B dovuto alle gomme è di circa 2  $\mu\text{T}$  all'interno del veicolo, con una frequenza che varia fra 0 e 20 Hz, per velocità del veicolo comprese tra 0 e 130 km/h. Ci sono anche armoniche a frequenze diverse, ma con intensità di campo B più basse.

#### *Motore a combustione interna (per veicoli ibridi)*

In [6] si è dimostrata una correlazione tra la frequenza rotazionale del motore a combustione (fino a 100 Hz) e il campo B: questo è forse dovuto al movimento dei pistoni. Il campo misurato in questo caso è pari a circa 150 nT a una frequenza pari al doppio della frequenza rotazionale.

#### *Equipaggiamento specifico*

Un esempio può essere il sistema di frenata rigenerativa, presente in tutti i veicoli elettrici e ibridi. In questo caso i valori di campo B misurati in [6] sono di circa 1  $\mu\text{T}$  con frequenze fino a 400 Hz. Un'altra sorgente può essere la pompa del servosterzo (circa 1  $\mu\text{T}$  con frequenze tra 0.5-1.0 kHz in [6]).

#### *Inverter*

È il dispositivo che converte la corrente continua in alternata e nei veicoli elettrici e ibridi ha una frequenza di switching di circa 10 kHz.

In generale, quindi, i CM all'interno degli autoveicoli originano da diverse sorgenti presenti a bordo e fuori bordo ed hanno contenuti in frequenza e intensità che cambiano continuamente, legati come sono alle caratteristiche del moto (accelerazioni, frenate rigenerative, velocità etc...). Queste condizioni fanno sì che i CM all'interno dei veicoli sono caratterizzati da:

- combinazioni complesse di componenti spettrali fino a qualche kHz;
- forme d'onda complesse;
- intermittenza
- alta variabilità nel tempo
- alta variabilità nello spazio.

Questa complessità dei segnali da misurare, unita al fatto che nell'intervallo di frequenza fino a 100 kHz i livelli di riferimento variano con la frequenza (vedi Tabella 2), fanno sì che il solo valore di campo misurato (che sia una media di valori nel tempo o un punto di massimo) non sia completamente descrittivo della reale esposizione. Per questo motivo, nelle situazioni di esposizione simultanea a campi a diverse frequenze o a segnali complessi, ICNIRP ha proposto due criteri di valutazione dell'esposizione che nell'intervallo di frequenze considerato possono definirsi in questo modo:

1. Metodo Standard (Standard Method Index, SMI)

$$SMI = \sum_i \frac{B_{rms}(f_i)}{B_L(f_i)} < 1$$

Eq.1

In cui  $B(f_i)$  è il valore del campo B misurato alla frequenza i-esima e  $B_L(f_i)$  è il livello di riferimento alla frequenza i-esima. Con questo criterio, si assume che tutte le componenti spettrali abbiano la stessa fase.

## 2. Metodo del picco ponderato (Weighted Peak Index, WPI)

$$WPI = \text{MAX}[WP(t)] = \text{Max} \sqrt{WP_x^2(t) + WP_y^2(t) + WP_z^2(t)} \leq 1 \quad \text{Eq.2}$$

$$WP_{x,y,z}(t) = \sum_i \frac{B_{x,y,z}(f_i)}{B_L(f_i)} \cos[2\pi f_i t + \theta_{x,y,z}(f_i) + \varphi(f_i)]$$

In cui  $B_L(f_i)$  è limite di esposizione alla i-esima frequenza  $f_i$ ,  $B(f_i)$  è l'ampiezza del campo alla i-esima frequenza  $f_i$ ,  $\theta(f_i)$  è la fase del campo alla i-esima frequenza  $f_i$  e infine  $\varphi(f_i)$  rappresenta lo sfasamento che verrebbe introdotto alla frequenza  $f_i$  da una catena di filtri analogici RC del primo ordine, progettata per fornire una risposta di ampiezza in frequenza il più possibile uguale all'inverso del limite  $B_L(f)$ . In questo modo, la fase di ogni componente spettrale è tenuta in conto, per evitare valutazioni dell'esposizione che siano non necessariamente conservative.

Entrambi i metodi propongono, quindi, la definizione di un indice che, se inferiore a 1 o a 100, se indicato in percentuale, stabilisce la conformità dell'esposizione ai limiti applicati.

La prima serie di lavori che verranno presentati in questa revisione, non tiene conto di questi indici, ma fornisce delle indicazioni su valori assoluti di campo B misurati con sensori a larga banda.

Uno dei lavori più datati [8] presenta una serie di misure eseguite su una serie di veicoli per quantificare le loro emissioni, in termini di campo elettrico (CE), ed investigare le problematiche di misura, partendo dalla considerazione che i metodi tradizionali per la valutazione delle emissioni non sono validi per i veicoli elettrici e ibridi. Le misure sono state eseguite nell'intervallo di frequenza fra 9 kHz e 30 MHz su 2 veicoli elettrici, 2 veicoli ibridi, un furgone a celle a combustibile un bus elettrico, un motociclo elettrico e due veicoli convenzionali. Le misure sono state eseguite in una camera semi anecoica dotata di un banco a rulli. Una delle conclusioni di questo lavoro è che le emissioni dei veicoli elettrici/ibridi devono essere valutate in condizioni dinamiche, per tenere in conto le emissioni generate dalle componenti elettriche durante il movimento del veicolo.

In uno studio canadese [9], il campo B è stato misurato nelle zone passeggeri di diversi mezzi per il trasporto pubblico e privato con un misuratore triassiale con banda di frequenza compresa fra 30 e 100 Hz. I valori più elevati di campo B sono stati trovati nelle metropolitane (media 3  $\mu\text{T}$ , valori compresi fra 0.3  $\mu\text{T}$  e 10  $\mu\text{T}$ ). Nelle auto (10 in totale, misure durante la marcia), il valore medio trovato è stato di 3  $\mu\text{T}$ , con valori compresi fra 0.2  $\mu\text{T}$  e 10  $\mu\text{T}$ .

Il modello ibrido della Toyota Prius è stato valutato dal punto di vista dei campi B emessi in [10]. In questo caso le misure sono state effettuate con un sensore isotropo di campo B, con banda passante compresa fra 5 Hz e 2 kHz, in diversi punti dell'auto durante la marcia. Il campo B misurato è risultato consistentemente più elevato sui sedili posteriori, rispetto a quelli anteriori. E' il primo lavoro in cui si ipotizza che i campi B più elevati si misurino quando il motore termico ed elettrico lavorano contemporaneamente: questo avviene quando l'auto accelera oppure si riscalda, esegue salite di pendenza elevata o, infine, ricarica la batteria. Nei momenti di massima accelerazione il campo B misurato può arrivare a circa 1  $\mu\text{T}$  nella posizione del sedile posteriore.

Uno studio australiano [11] presenta i risultati delle misure di campo B effettuate su 100 treni e tram e su un'unica auto ibrida. Anche in questo caso il sensore era isotropo, operativo nella banda di frequenza 40-800 Hz. Le misure sono state eseguite durante una fase iniziale ad auto ferma, durante la marcia e poi da auto di nuovo ferma: il monitoraggio dei valori di campo B è stato eseguito con un tempo di campionamento pari a 3 s. Si sono considerate 11 posizioni diverse, all'interno dell'abitacolo. Il campo B aumentava e diminuiva durante le fasi di accelerazione e decelerazione. Questa auto aveva le batterie e la circuiteria posizionata sotto il sedile posteriore, pertanto i valori di campo B massimo sono stati trovati in questa posizione (2.4  $\mu\text{T}$ ).

In [12] i valori di campo B emessi da un totale di 14 veicoli (2 elettrici, 6 ibridi e 6 a motore termico a benzina) sono stati misurati nell'intervallo di frequenza 40 – 1000 Hz. Durante le misure i veicoli erano

guidati in un circuito di test di circa 16 km, e sono stati utilizzati contemporaneamente sei sensori all'interno del veicolo. I valori di campo erano memorizzati dagli strumenti durante tutto il periodo di prova, con un tempo di campionamento di 4 s. Considerando l'intero set di dati (18318 misure) ottenuto su tutte le auto elettriche/ibride, la media geometrica è risultata pari a 0.095  $\mu\text{T}$  con una deviazione standard geometrica pari a 2.66, analogamente, sulle auto convenzionali (9301 misure complessive), la media geometrica ottenuta è risultata uguale a 0.051  $\mu\text{T}$  con una deviazione geometrica standard pari a 2.11. Confrontando le versioni ibrida e convenzionale di uno stesso modello di veicolo, la media geometrica dei valori del campo B misurati sui veicoli ibridi risultava essere sempre maggiore rispetto a quelli misurati sul veicolo convenzionale (0.059  $\mu\text{T}$  vs 0.049  $\mu\text{T}$  per il primo modello, 0.126  $\mu\text{T}$  vs 0.055  $\mu\text{T}$  per il secondo e 0.146  $\mu\text{T}$  vs 0.088  $\mu\text{T}$  per il terzo modello). In conclusione tutti i valori di campo B misurati sui 14 veicoli risultano molto inferiori ai limiti stabiliti in [1] e [2].

Dieci diversi modelli di veicoli (3 diesel, 4 a benzina e 3 ibride) sono stati considerati, invece, in [13]. Le misure di campo B sono state effettuate durante due situazioni di standby e due di guida (alla velocità approssimativamente costante di 40 km/h e 80 km/h). Il tratto di strada scelto era sempre lo stesso, con nessuna sorgente di campo magnetico esterna (elettrorodotti, sottostazioni elettriche etc...) e poco frequentato, in modo tale da mantenere le condizioni sperimentali il più ripetibili possibile durante le fasi di prova. Su ogni auto viaggiavano il guidatore e tre passeggeri, ognuno equipaggiato con un sensore isotropo di campo B, operativo nella banda di frequenza 40-800 Hz. Il campo B veniva monitorato con un tempo di campionamento pari a 1.5 s. Le medie geometriche dei campi B misurati si sono rivelate più alte nelle auto ibride (0.09  $\mu\text{T}$  contro gli 0.05  $\mu\text{T}$  delle auto a benzina e gli 0.02  $\mu\text{T}$  delle auto a diesel). Le auto ibride erano anche i veicoli che avevano la più alta percentuale di misure superiore a 0.2  $\mu\text{T}$ . Inoltre, anche in questo caso, l'influenza della velocità sui valori di campo B era più incisiva nelle auto ibride rispetto a quelle con il motore a combustibile.

In [14] il campo B emesso da 13 veicoli (3 elettriche, 6 ibride e 4 a benzina) è stato misurato con un sensore isotropo nelle bande di frequenza 120 Hz - 10 kHz e 1.2 - 100 kHz durante la guida su percorsi cittadini e sulle autostrade. Anche in questo caso i valori misurati sono stati molto bassi, con un valore medio di 3.5  $\mu\text{T}$  misurato nei veicoli elettrici/ibridi e di 0.6  $\mu\text{T}$  nelle auto a benzina. Anche se i valori medi sono più alti nei veicoli elettrici/ibridi, la variabilità dei dati non rende significativa la differenza fra i valori di campo misurati nei veicoli elettrici rispetto a quelli misurati nei veicoli a benzina.

In un lavoro cinese [15] sono stati misurati i valori di campo B nell'abitacolo di tre veicoli elettrici (potenza massima 160 kW). Le misure sono state eseguite con un sensore isotropo nella banda di frequenza 1 Hz - 100 kHz, in due posizioni (sedile posteriore ed anteriore) per un periodo di 30 s comprendente una fase di standby, una di accelerazione (2.2  $\text{m/s}^2$ , da 0 a 40 km/h) e una a velocità costante (circa 40 km/h). Le misure hanno evidenziato, come in questo caso il segnale misurato non abbia componenti superiori ai 2 kHz. Anche in questo caso il percorso scelto è stato sempre lo stesso, poco trafficato, per garantire la reperibilità delle misure. La particolarità di questo lavoro è che è l'unico, tra quelli esaminati, che ripete le valutazioni sulle auto in tempi diversi nell'arco di due anni, periodo in cui le auto sono state utilizzate e regolarmente mantenute: uno dei veicoli aveva dovuto sostituire delle componenti dei mozzi a seguito di un incidente. I valori di campo misurati nelle tre auto si sono rivelati piuttosto contenuti (un valore massimo di  $1.58 \pm 0.11 \mu\text{T}$ ), ma la cosa interessante è che la regolare manutenzione dei veicoli non comporta differenze di esposizione nell'arco del tempo, al contrario le riparazioni, se non eseguite a regola d'arte, con componenti adeguati può comportare un aumento significativo, seppur contenuto dell'esposizione.

Due articoli valutano l'esposizione dei passeggeri all'interno dell'abitacolo di veicoli ibridi/elettrici in accordo con gli indici di esposizione definiti in Eq.1 e Eq.2 [16], [6].

In [16] i livelli di campo B sono stati misurati all'interno di 6 auto ibride (tre di tecnologia full-hybrid e tre di tecnologia mild-hybrid), in diverse posizioni e altezze in quattro condizioni di moto diverse (standby, 30-40 km/h, 80-100 km/h, > 120 km/h), utilizzando un sensore isotropo nella banda di frequenza 5 Hz - 32 kHz. L'indice di esposizione considerato è quello definito in Eq.1 applicato ai livelli di riferimento definiti in [1] e [2]. I valori di campo misurati sono dipendenti dalla velocità. Si arriva a misurare un indice dell'80% durante le fasi di rapide accelerazioni e decelerazioni (frenata rigenerativa) nelle posizioni più vicine ai cavi e alla batteria. In questo lavoro, gli autori sottolineano quanto la ripetibilità delle misure sia affetta non solo dal

percorso effettuato durante i test, ma anche dal fattore umano rappresentato, in questo caso, dal guidatore, che non era sempre lo stesso durante i test.

L'indice definito nell'Eq.2 e implementato secondo i nuovi limiti ICNIRP del 2010 [17], definiti per la protezione della popolazione, è stato utilizzato per la valutazione dell'esposizione al campo B all'interno dell'abitacolo di 11 veicoli (5 elettrici, 2 ibridi, 1 a celle a combustibile, 2 benzina e 1 diesel). Sono stati usati due sensori isotropi, uno con banda passante pari a 0 – 3 kHz e l'altro con banda passante 5Hz – 100 kHz. I sensori sono stati posti sul un manichino posto sul sedile del passeggero e in diverse posizioni. Le misure sono state eseguite durante la guida su strada che comprendeva anche forti accelerazioni e decelerazioni.

I principali risultati sono: i) i valori di indice più elevati (18%) si sono trovati su un'auto elettrica durante l'accensione; ii) per qualsiasi auto elettrica gli indici più elevati si sono trovati vicino alla batteria o ai piedi del passeggero o del guidatore; iii) l'indice di valore più elevato in corrispondenza della testa è stato pari a 1.5%.

Alcuni articoli presentano delle valutazioni di esposizione al campo B emesso da singoli elementi delle auto elettriche, quali ad esempio inverter [18], batterie [19], oppure da assemblaggi semplici di parte di auto [20] e [21].

Lo stesso gruppo spagnolo ha realizzato modelli numerici di un inverter [18] e di una batteria [19] ed ha analizzato il CM emesso da questi dispositivi con simulazioni agli elementi finiti. I modelli sono stati validati attraverso misure di laboratorio. In [18] l'inverter è stato modellizzato tenendo conto della corrente continua di input (116 A, 0 Hz), la corrente a bassa frequenza in uscita ( $192 A_{rms}$ , 100 Hz) e la corrente impulsata ad alta frequenza dei semiconduttori ( $136 A_{rms}$ , 5.4 kHz). I valori simulati a 20 cm dall'inverter sono di  $1.69 \mu T$  a  $f=0$  Hz,  $18 \mu T$  a  $f= 100$  Hz e  $0.37 \mu T$  a 5.4 kHz, con un ottimo accordo con le misure. Pur avendo trovato valori di campo B inferiori ai livelli di riferimento identificati in [1] e [2], gli autori di [18] inseriscono comunque delle raccomandazioni costruttive per la mitigazione dei campi magnetici a bordo dei veicoli elettrici secondo il criterio protezionistico definito come ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Anche in [19] il modello numerico di batteria è stato validato con misure sperimentali, per poi eseguire delle stime del campo emesso da un pacco completo di batterie. I risultati ottenuti sul singolo modulo e sull'intero pacco di batterie sono ancora inferiori ai livelli di riferimento definiti in [17].

Il lavoro [22] è l'unico che si occupa della possibile interazione tra i campi magnetici presenti nell'abitacolo di un'auto elettrica e i dispositivi medici impiantabili attivi. Tre dispositivi medici impiantabili attivi sono stati posizionati, di volta in volta, all'interno di un fantoccio umano (di fatto una scatola chiusa riempita di soluzione salina). Il dispositivo era poi collegato a un oscilloscopio per la verifica di eventuali malfunzionamenti. L'intero sistema è stato posto su 10 auto elettriche diverse, nella posizione dove era stata verificata precedentemente l'esposizione peggiore. Non si è verificato nessun malfunzionamento in nessun dispositivo medico e per nessuna delle auto provate. Comunque, durante le fasi di accelerazione e decelerazione dei veicoli è stato osservato un lieve incremento della frequenza dell'impulso fornito dai dispositivi, ma assolutamente prevedibile.

### 2.3 CEM e stazioni di ricarica

A conoscenza degli autori, al momento non esistono lavori scientifici riguardanti la valutazione dell'esposizione ai CEM emessi dalle stazioni di ricarica convenzionali. Diverso il caso della ricarica wireless applicata ai veicoli elettrici. Sono stati considerati 16 lavori, per la maggior parte giapponesi [23, 24, 26, 31, 35 e 37], cinesi [32, 34 e 36] e italiani [25, 27, 28, 29, 30, 38]. Sono stati presi in considerazione soltanto i lavori strettamente inerenti alla valutazione dell'esposizione, con metodi numerici e/o sperimentali, in presenza di sistemi WPT su veicoli elettrici. Non sono stati considerati lavori sulla valutazione dell'esposizione a sistemi WPT indoor per ricarica dispositivi, reviews e/o confronti di carattere generale, estesi ad un ampio intervallo di frequenze o studi di ottimizzazione dei sistemi WPT, anche se includevano misure di campi elettrici e magnetici, confrontate coi valori di riferimento delle raccomandazioni internazionali. Un lavoro è stato escluso perché in caratteri cinesi anche se sono chiare le conclusioni.

Nonostante le apparenti similitudini, l'analisi critica dei lavori selezionati è stata piuttosto complessa. Infatti i lavori considerati, in prima istanza, presentano delle caratteristiche comuni e simili, in termini di frequenza, potenze trasferite, modellizzazione del sistema WPT (coppie di avvolgimenti planari affacciati,

risonanti a 85 kHz), modello umano, standard di riferimento, etc, che li fanno apparire facilmente classificabili e confrontabili.

Ad un'analisi più approfondita, invece, essi risultano molto differenziati nel dettaglio degli obiettivi e nelle metodologie, la comparabilità risulta quindi piuttosto critica e si riduce al confronto delle conclusioni in termini di verifica del rispetto delle restrizioni di base secondo le linee guida ICNIRP [2, 17].

Le principali cause di ciò, come riportato in alcuni degli stessi lavori e in alcune reviews, risiedono nella mancanza di una procedura specifica e definita per queste situazioni espositive e, in buona parte, nel fatto che i sistemi auto elettrica-WPT sono ancora sperimentali o comunque estremamente limitati; ciò si traduce nella difficoltà di definire degli scenari rappresentativi e di riferimento. Naturalmente, anche il fatto che si tratta di condizioni di campo elettrico e magnetico altamente disomogenei fa sì che, scenari apparentemente simili, forniscano valori di campo magnetico generato dalle bobine e di campo elettrico indotto, molto diversi.

Per questo, molti dei lavori considerati, al di là di risultati finali confrontati con gli standard internazionali di riferimento, sono lavori essenzialmente metodologici nei quali si cerca di definire uno o più scenari rappresentativi delle condizioni di esposizione più significative attraverso comparazioni riguardanti sia l'assetto del sistema WPT a bordo del veicolo o l'impiego di schermature o materiali particolari, sia la posizione e la postura del modello umano.

La maggior parte dei lavori sono di dosimetria numerica: viene utilizzata l'approssimazione quasi-statica per la determinazione del campo magnetico "circostante" e poi codici di calcolo in alta frequenza, generalmente commerciali, che contengono il solutore Magneto Quasi-statico, per la determinazione del campo elettrico indotto (HFSS, FDTD, ANSYS, CST Microwave Studio).

Pochi sono i lavori sperimentali, generalmente utilizzati per validare i risultati della dosimetria numerica [25, 30, 31, 33], oppure per la determinazione del campo magnetico da utilizzare come "sorgente" nella dosimetria numerica [31]. Le prove sperimentali sono effettuate a valle della realizzazione di un prototipo da banco del sistema di bobine [25, 31, 35], analogo a quello montato su un'auto elettrica, con misure di campo magnetico ed elettrico a 85 kHz. Quasi nessuno dei lavori analizzati sino ad ora fornisce misure effettuate in situazioni reali di sistema WPT montato su un'auto elettrica in funzione.

Di seguito alcuni di questi lavori, più interessanti sono descritti nel dettaglio.

Negli studi di Laakso e Shimamoto [23, 24] vengono presentati i risultati di alcune modellizzazioni del campo magnetico prodotto dal sistema WPT e utilizzato come potenziale vettore (magnetico) per determinare il campo elettrico (CE) indotto in un modello umano. La frequenza è di 85 kHz (come nella maggior parte dei lavori considerati), la potenza trasferita di 7 kW; per la determinazione della potenza trasferita viene utilizzata l'approssimazione quasi-statica e per la determinazione dei livelli di CE indotto e la loro distribuzione, il codice di calcolo HFSS. In [23] vengono confrontati i valori del CE indotto in diversi modelli anatomici (piuttosto standardizzati ormai e utilizzati comunemente in dosimetria numerica, in questo caso sono impiegati Taro, Norman e Thelonious), che risultano compatibili con le restrizioni di base dell'ICNIRP [17] anche se il campo B esterno eccede i livelli di riferimento definiti in [17]. In [24], invece, vengono confrontati i valori del CE indotto in diverse posture e diverse posizioni del modello numerico umano. Anche in questo caso, il CE indotto risulta compatibile con le restrizioni di base anche se il campo B, nelle aree corrispondenti, eccede i livelli di riferimento.

In Watanabe 2016 [26], lavoro svolto all'interno dei Laboratori di Ricerca e Sviluppo di Toyota, vengono confrontate diverse configurazioni del sistema WPT relativamente alla posizione degli avvolgimenti lungo l'asse del veicolo (parte anteriore, centrale e posteriore), ai fini della valutazione dell'esposizione e del CE indotto nel modello umano. Mentre, in Watanabe 2019 [37] viene valutato, nello spazio tra le due auto, il livello del campo magnetico generato da due veicoli elettrici in carica simultaneamente, che risulta minore di quello prodotto da una sola auto in carica, ed il corrispondente CE indotto nel modello umano ivi posizionato. Watanabe, come molti altri autori [33], nella modellizzazione della sorgente (avvolgimenti planari, n spire), considera la situazione di "disallineamento" (centri degli avvolgimenti non allineati) come "caso peggiore" per l'esposizione, in quanto è riconosciuto che in tale configurazione si hanno livelli di campo disperso molto più elevati.

In Campi et al [28, 29, 29] vengono confrontati gli effetti di diversi materiali (fibra di carbonio, ferro, acciaio) utilizzati per la realizzazione dello "chassis" dell'auto elettrica, in termini di CE indotto, con diverse posizioni e posture del modello numerico umano. Ne risulta che l'unico materiale penalizzante, in quanto a CE indotto nei modelli dislocati all'interno dell'auto elettrica, che eccede le restrizioni di base definite in [17], è la fibra di carbonio. In De Santis et al. [28] questo aspetto viene ancora più approfondito.

Il lavoro di Park 2018 [33] è abbastanza completo: viene implementato un nuovo metodo computazionale che è una sorta di un ibrido tra diversi codici, viene realizzato un modellino di sistema WPT per effettuare misure finalizzate a validare il modello numerico prima di utilizzarlo per la dosimetria.

Wang et al. [32, 36] propone diversi scenari con diversi modelli (uomo, bambino e anche il gatto), in molte posizioni, alla ricerca di criticità di cui tener conto nella definizione di una metodologia condivisa (standard).

In Hakuta e Watanabe [35] viene valutato l'effetto della variazione della distanza tra le bobine sul campo elettrico indotto: maggiore è la distanza tra gli avvolgimenti, minore è il campo elettrico indotto risultante.

Nonostante le criticità, comunque, nell'ottica di definire degli elementi che possano essere utili ai fini di una discussione per arrivare a una metodica condivisa, è stato possibile individuare dei punti, per così dire, comuni un po' a tutti i lavori o quasi:

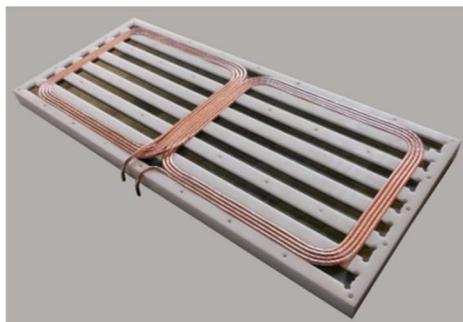
- tutti i lavori, per la valutazione dell'esposizione e della sua conformità fanno riferimento all'impianto normativo definito in [1, 2] o [17];
- i modelli numerici umani utilizzati, sono i modelli standard previsti dalle direttive (Norman, Taro, Thelonious, VHP);
- gli scenari, seppur con piccole differenze sulle dimensioni degli oggetti, sono dello stesso tipo;
- i codici di calcolo utilizzati sono generalmente codici commerciali.

La maggior parte dei lavori, inoltre, ha rilevato che, pur in presenza di punti in cui il campo magnetico eccede i livelli di riferimento previsti dalle linee guida, i valori del CE indotto in corrispondenza di tali situazioni, non eccedono le restrizioni di base.

## 2.4 *Ottimizzazione del modello numerico del sistema WPT dinamico*

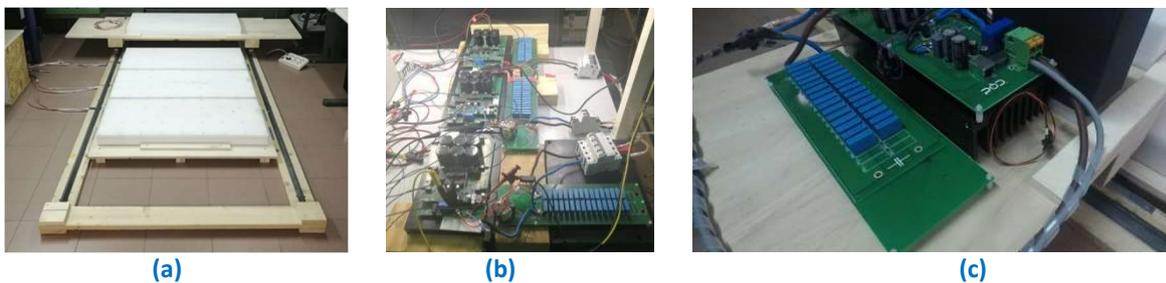
Nel corso del triennio precedente in ENEA è stato realizzato un sistema per la ricarica dinamica senza contatto (Dynamic Wireless Power Transfer, DWPT), destinato a una piccola auto elettrica.

Un sistema di questo genere è costituito da una bobina di pick-up montata sull'auto e una serie di bobine a terra (chiamate bobine di track): il trasferimento di potenza dal sistema a terra al sistema a bordo avviene per mezzo dell'accoppiamento magnetico induttivo alle frequenze intermedie (qualche decina di kHz) che avviene tra le due sistemi, quando l'auto transita sopra le bobine di track. Il sistema realizzato in ENEA è costituito da tre bobine a terra e una a bordo, opera alla frequenza di 85 kHz e è in grado di alimentare la batteria dell'auto con una potenza pari a 3 kW [39, 40]. Per le bobine è stata scelta la geometria DD (chiamate in seguito DD coil): una DD coil è costituita da due sotto-bobine a forma di D, connesse in serie, ma con la corrente che scorre in verso opposto nelle due sotto-bobine. In questo modo è possibile massimizzare il trasferimento di potenza e ridurre gli effetti del disallineamento tra le bobine sull'efficienza del sistema [39]. Nel nostro caso, ogni DD coil è stata realizzata con 4 avvolgimenti di filo di Litz, ha una dimensione di  $375 \times 900 \text{ mm}^2$  e un core di ferriti costituito da 7 barre su cui la bobina si appoggia. Sia le DD coil che le barre di ferrite sono state montate su un supporto realizzato ad hoc, dotato di un coperchio per proteggere l'intero sistema: le dimensioni finali della singola bobina sono pari a  $980 \times 420 \times 75 \text{ mm}^3$  (Fig. 1).



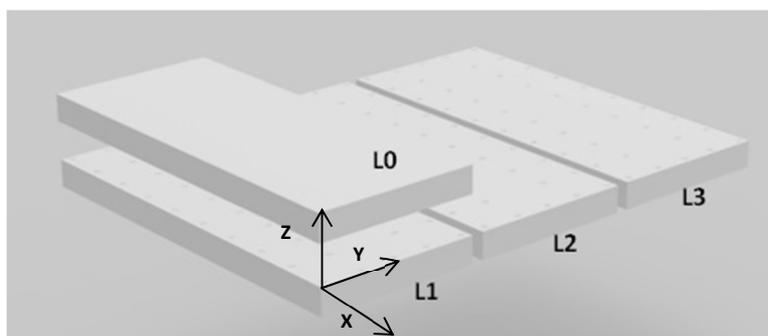
**Figura 1: Singola DD coil con supporto, ma senza coperchio**

Il sistema finale è stato realizzato con 3 bobine a terra uguali, poste a una distanza reciproca di 3 cm, ogni bobina è collegata a una unità trasmittente indipendente costituita da un inverter e da una unità di controllo elettronica (ECU). Il sistema a bordo ha la sua unità di ricezione. Il sistema è stato montato a terra su un banco di legno (Fig.2).



**Figura 2: (a) sistema completo sul banco di legno; (b) le tre unità trasmettenti; (c) l'unità ricevente.**

In Fig.3 è mostrato uno schema semplificato del sistema con il sistema di riferimento adottato per le misure di campo B e per le simulazioni. Secondo il sistema di riferimento adottato, il movimento della coil di pick-up avviene nella direzione Y.



**Figura 3: schema del sistema DWPT realizzato e il sistema di riferimento adottato. L1, L2, L3 sono le bobine di track, L0 è la bobina di pick-up.**

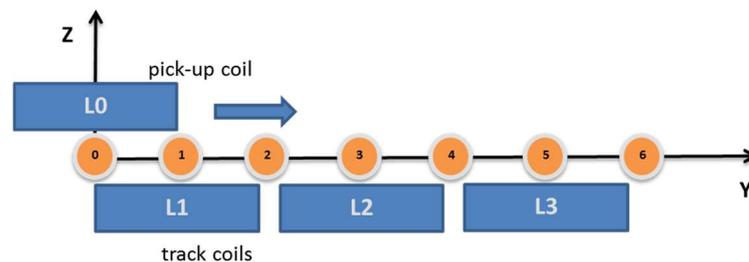
Le misure di campo B sono state eseguite con misuratore di campo B (ELT-400, Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, Germany) dotato di un sensore isotropo di 100-cm<sup>2</sup>. La banda passante di questo strumento è pari a 1 Hz – 400 kHz. Le impostazioni dello strumento sono state : i) modalità Field Strength; ii) rivelatore di valore efficace (root mean square, rms); iii) filtro passa basso 10 Hz. L'incertezza totale espansa dello strumento è pari a  $\pm 8\%$ , se si considera un fattore di copertura pari a 2 per un livello di confidenza del 95 %.

Con la prima misura si è valutata la distanza di conformità, nella direzione X, dalla coppia di bobine L0 e L1, perfettamente sovrapposte e alimentate con la corrente massima, tale, quindi, da fornire alla batteria i 3 kW previsti dalle specifiche. Questa valutazione è stata fatta con il sistema stazionario, vale a dire che le

bobine sono rimaste nella posizione descritta per tutto il tempo della misura. Il centro del sensore è stato posto al centro del gap di aria presente tra le bobine nella direzione Z e al centro delle bobine nella direzione Y. La distanza minima a cui sono state fatte le misure nella direzione X è stata pari a 23 cm a causa dell'ingombro del supporto di legno e del sensore. Gli altri punti di misura sono stati a 30, 40, 45, 50 cm dalla coppia di bobine. Durante queste misure le altre bobine di track erano spente.

La distanza di conformità è stata definita come quella distanza dalla coppia di bobine tale che il campo B misurato era inferiore a  $6.25 \mu\text{T}$  (rms), pari al livello di riferimento per la popolazione definito in [1] e [2].

Nella seconda fase di misura tutte le bobine di track erano accese. Il centro del sensore era sempre posto al centro del gap di aria nella direzione Z e a una distanza di 45 cm nella direzione X. Nella direzione Y il sensore è stato posto in sette posizioni diverse: posizioni 1, 3, 5 al centro delle bobine di track L1, L2, L3 rispettivamente, posizioni 0 e 6 alla fine del sistema a terra, posizioni 2 e 4 in corrispondenza del centro del gap tra le bobine a terra (Fig.4).



**Figura 4: schema dei punti di misura adottati per la valutazione del campo B a distanza fissa e durante il movimento della bobina L0 sulle bobine di terra.**

Per ogni posizione la bobina di pick-up è stata mossa in direzione Y a passi discreti di 10 cm da  $-20$  cm a  $+150$  cm. In questo modo è stato possibile simulare il movimento della bobina a bordo, anche se con questa modalità semi-stazionaria.

Contemporaneamente alle misure di campo B si sono misurati anche i valori efficaci delle correnti nelle 4 bobine durante lo spostamento della bobine L0 (corrente I0) sulle bobine L1, L2, L3, (correnti I1, I2, I3 rispettivamente).

Per le simulazioni si è utilizzato il solutore in bassa frequenza (EM Studio) del codice di calcolo elettromagnetico commerciale full-3D CST Microwave Studio (Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay Cedex, Francia). Il modello numerico realizzato è in Fig.5.

Una prima approssimazione del modello è stata la definizione di una geometria rettangolare per le DD coil al posto di una geometria ellittica, più realistica, ma sicuramente più onerosa dal punto di vista della risoluzione spaziale del calcolo. Il filo di Litz è stato simulato come un singolo filo di conduttore elettrico perfetto (perfect electric conductor, PEC) con sezione rettangolare ( $5.74 \times 2.00 \text{ mm}^2$ ), i 4 avvolgimenti sono stati posti a una distanza reciproca di 2 mm per tenere conto dello spessore dell'involucro che riveste il filo di Litz. Le barre di ferrite sono sette, ugualmente distanziate, per ogni DD coil e hanno dimensione  $2.8 \times 93.0 \times 1.6 \text{ cm}^3$  (permeabilità magnetica,  $\mu$ , uguale a 2200). Il volume di calcolo è stato discretizzato con una serie di tetraedri di dimensione variabile.



Figura 5: modello della coppia di DD coil, con sistema di riferimento.

L'ottimizzazione del modello numerico è stata eseguita con il sistema stazionario (le bobine L0 e L1 perfettamente sovrapposte tra di loro), con la finalità di minimizzare lo scarto tra le misure eseguite in condizioni stazionarie e i valori di campo B valutati con le simulazioni e ottenuti come media dei valori in un volume pari al volume occupato dal sensore, con centro posizionato dove il centro del sensore era posizionato durante le misure, vale a dire 23, 30, 40, 45, 50 cm dal sistema, lungo la direzione X. Le correnti imposte alle bobine sono state pari a quelle misurate durante la prima fase delle misure con il sistema in modalità stazionaria, vale a dire  $I_{0_{rms}} = 39.7$  A e  $I_{1_{rms}} = 13$  A.

Per ottimizzare il modello si è intervenuto sulla dimensione del dominio di calcolo e la dimensione della discretizzazione spaziale. Particolare attenzione è stata dedicata al gap di aria tra le DD coil, in quanto questo rappresentava un punto piuttosto critico per l'accuratezza dei risultati numerici.

In Fig.6 è mostrato il modello ottimizzato (a) e uno schema del sistema di misura durante la prima fase (b). Il confronto fra dati misurati e dati valutati numericamente con modello ottimizzato è mostrato in Fig.7. Il modello ottimizzato è stato ottenuto ponendo le seguenti condizioni alla simulazione:

- Boundary conditions: 'open add space';
- Ampliamento del volume di calcolo: 800 mm oltre quanto stabilito automaticamente dal solutore;
- Posizionamento di un parallelepipedo di aria in corrispondenza del gap tra le due DD coil per poter controllare la discretizzazione del volume tra le bobine [Fig. 6a];
- Numero totale di tetraedri 1.406.021.

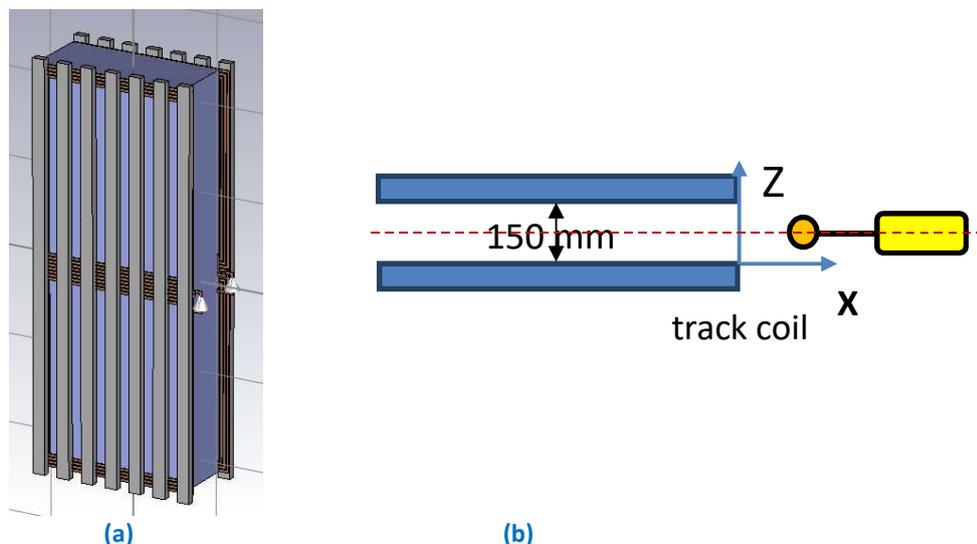


Figura 6: (a) modello ottimizzato della coppia di DD coil: in grigio è evidenziato il volume d'aria utilizzato per l'ottimizzazione della discretizzazione spaziale del gap di aria, (b) schema del setup di misura per le valutazioni della distanza di conformità (fase 1 delle misure).

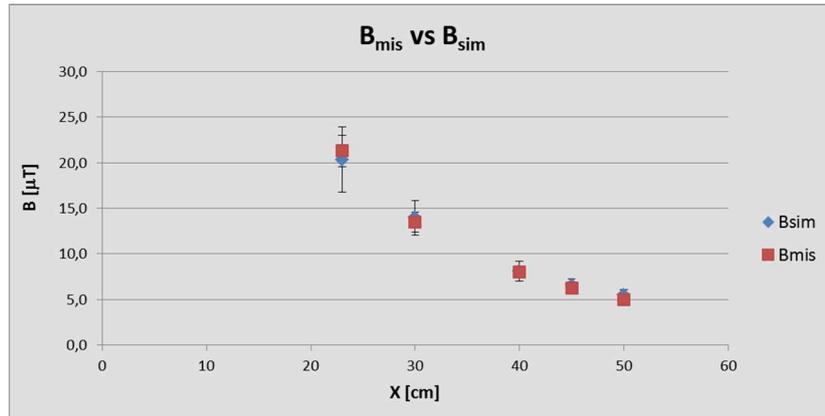


Figura 7: confronto tra dati sperimentali e numerici ottenuti con il modello ottimizzato

Come è evidente dall'analisi di Fig.7 l'accordo tra dati sperimentali e numerici è ottimo e si è quindi potuto procedere con il confronto successivo. Si è simulato il sistema completo, vale a dire le tre bobine a terra e quella a bordo: la bobina di pick-up è stata fatta scorrere in direzione Y, con passi discreti di 10 cm, analogamente a quanto fatto durante le misure e per ogni passo è stata eseguita una simulazione, per ognuna delle quali sono state impostate alle quattro bobine le correnti di volta in volta misurate (Tabella 3).

Tabella3: Correnti imposte alla bobina di pick-up (I0) e le bobine di track (I1, I2, I3) nelle simulazioni di scorrimento della bobina L0 sulle altre tre.

Passo nella direzione Y [cm]	I0 [A]	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
-20	22.3	4.6	1.6	1.6
-10	34.1	10.2	1.6	1.6
0	38.9	12.8	1.7	1.6
10	37.4	9.9	3.4	1.6
20	36.6	5.8	6.2	1.6
30	38.1	2.9	10	1.6
40	40.8	1.7	12.8	1.6
50	39.6	1.6	11.6	2.3
60	37.1	1.6	7.4	4.5
70	37.1	1.6	4.3	8.3
80	39.5	1.6	2.0	11.6
90	38.9	1.6	1.6	12.5

Il confronto dei risultati numerici (intesi sempre come media dei valori di campo B ottenuti su un volume pari al volume occupato dal sensore) con i dati misurati è stato fatto su un unico punto (posizione 1 del sensore nella Fig. 4), al variare della posizione della DD coil L0 sulle altre tre.

In Fig. 8 è presentata l'immagine del modello realizzato per simulare la bobina di pick-up (L0) perfettamente sovrapposta alla bobina di tack denominata L1: in questo caso la bobina L0 è in posizione Y=0 nel sistema di riferimento adottato.

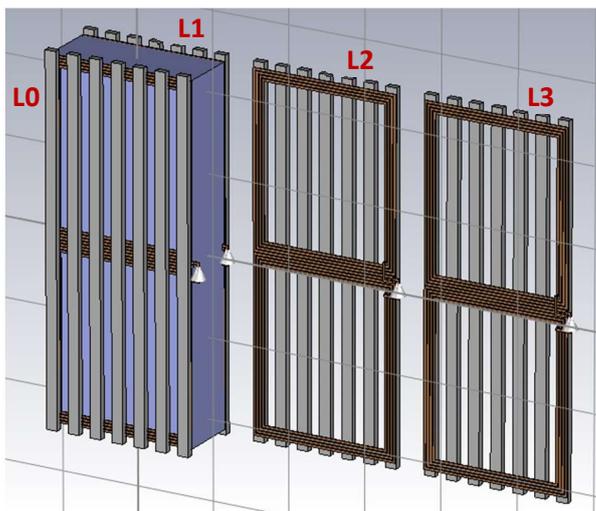


Figura 8: modello numerico del sistema completo quando la bobina L0 è perfettamente sovrapposta alla bobina L1 (posizione Y=0). Anche in questo caso è stato modellizzato il volume d’aria nelle zone di sovrapposizione tra la bobina L0 e le altre per il controllo della discretizzazione del gap di aria (volume grigio).

Il risultato del confronto è presentato in Fig.9. Come si può vedere, l’accordo tra dati sperimentali e dati misurati è ottimo nei punti in cui il calore di campo B è massimo. Questo accordo si perde quando i valori di campo misurati sono inferiori a 4  $\mu\text{T}$  (Posizione 60). Questa condizione rimane comunque accettabile, in quanto le valutazioni dosimetriche su un modello numerico umano andranno eseguite nelle condizioni di esposizione peggiore, dove l’accordo è ottimo.

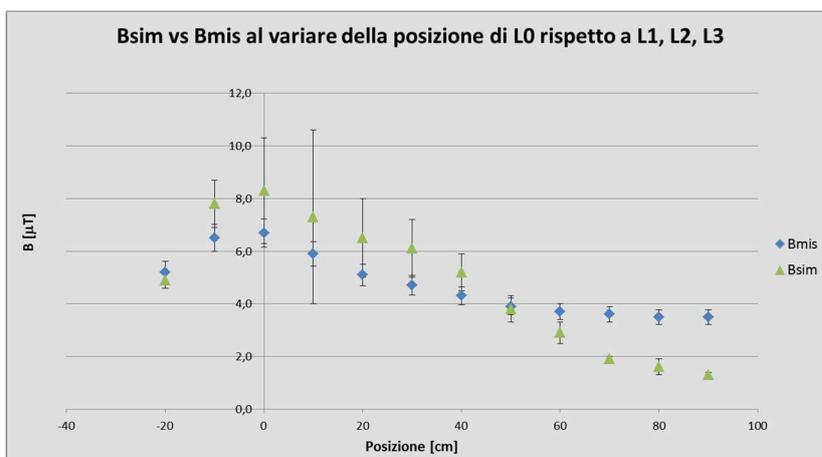


Figura 9: confronto tra dati sperimentali e numerici ottenuti con il modello ottimizzato

### 2.5 Prospettive applicative di mercato dei sistemi di ricarica wireless dinamica

I veicoli elettrici sono attesi divenire un elemento importante della mobilità nel prossimo decennio. Sebbene si presentino ancora ostacoli da superare per un pieno e completo utilizzo dei veicoli elettrici, non v’è dubbio che le politiche europee e nazionali puntino su un loro contributo, non più trascurabile, nella determinazione a ridurre le emissioni climalteranti e quelle imputate di avere impatto negativo sulla qualità dell’aria.

In termini generali rimane aperto il dibattito sulla capacità del sistema di produzione e distribuzione dell’energia elettrica a far fronte alle future richieste provenienti dalla elettrificazione della mobilità. Questo include temi come la potenzialità della generazione rinnovabile, la distribuzione temporale delle ricariche, la potenza di ricarica, la nuova visione della rete elettrica in chiave smart.

L’uso dei veicoli elettrici è dipendente dalla relazione tra taglia dell’accumulo e autonomia del veicolo. L’approccio lineare tra le due grandezze è basato sul modello comportamentale dell’utente della mobilità privata che negli ultimi 50 anni ha avuto a disposizione un vettore energetico ad alta densità energetica. La

linearità tra autonomia e taglia dell'accumulo si riflette sui costi del veicolo attraverso i maggiori oneri della batteria.

Un recente articolo di BloombergNEF del 3 dicembre 2019 (<https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/?sf113554299=1>) riporta che il costo unitario al kWh delle batterie è passato dai 1.100 \$/kWh del 2010 ai 156 \$/kWh del 2019, ed indica al 2023 il raggiungimento della soglia dei 100 \$/kWh<sup>1</sup>. Questi risultati sarebbero derivati da un insieme congiunto di fattori quali l'effetto scala del mercato e l'incremento della densità energetica. Un'ulteriore riduzione potrebbe giungere successivamente con il contributo del minor costo industriale. Si ritiene credibile il raggiungimento dei 61 \$/kWh al 2030 come costo ma rimane incertezza sulle modalità industriali di conseguire l'obiettivo. La riduzione del costo è quindi un target da perseguire per il mercato di massa anche se iniziano a diversificarsi gli obiettivi come ad esempio puntare ad un incremento del ciclo di vita per ridurre i tassi di sostituzione degli accumuli veicolari o considerare il ciclo di vita nelle valutazioni dei costi.

Tuttavia evidenziamo uno scollamento tra il costo industriale ed il costo al dettaglio o il costo reale dei piccoli produttori che non possiedono volumi produttivi elevati. Un articolo del SAE citava (<https://www.sae.org/news/2016/08/bmw-i3-battery-replacement-is-16000>) ad esempio che il costo di sostituzione di un pacco batterie per la BMW i3 vecchio modello (60 Ah-21 kWh) era di 16.000 \$ al 2016 pari a 760 \$/kWh. Il mercato al dettaglio appare essere maggiormente oneroso rispetto al mercato all'ingrosso ove i produttori possono spuntare prezzi maggiormente vantaggiosi. Ma spesso si tende a confondere il costo delle celle con quello delle batterie dimenticando che queste ultime sono sistemi maggiormente complessi che comprendono le celle elettrochimiche ma anche il sistema di controllo (BMS), il sistema di condizionamento della temperatura, il contenitore in sicurezza, i connettori ed il cablaggio. Quindi una disparità tra i costi annunciati e il costo della batteria può nascere dalla indicazione dei costi non meglio specificati.

Le scelte operate sulla taglia del sistema di accumulo si riflettono ulteriormente sulla dimensione e distribuzione della rete di ricarica ma anche sulla tipologia e tecnologia da adottare. Batterie più grandi richiedono potenze di ricarica maggiori nel tentativo di limitare i tempi di ripristino della carica elettrica e questo comporta l'uso di tecnologie di accumulo che soffrono meno nelle ricariche veloci, che siano sicure durante il processo di ricarica, che siano adeguatamente stabili in temperatura.

Quanto si debba puntare su accumuli di grande taglia rimane argomento di dibattito alla luce delle percorrenze reali giornalmente eseguite. 50 km di percorrenza giornaliera sono indicativamente intorno 7.5-10 kWh di energia consumata (in base al tipo di percorso ed agli ausiliari attivati): su un accumulo da 60 kWh rappresentano appena 1/6 della capacità di batteria. A meno dei viaggi più lunghi nel corso dell'anno potrebbe risultare sufficiente un accumulo di taglia ridotta ricaricabile a potenze minori durante le soste intermedie della giornata. Questa riduzione di taglia avrebbe l'effetto di ridurre il peso del veicolo di decine di kg a favore di un minor consumo e di una maggiore disponibilità di spazio. Diminuire di 20 kWh l'accumulo a bordo, a prezzi industriali, potrebbe essere pari ad un calo del costo di 3.000 \$ (circa 2800 €).

La taglia della batteria gioca un ruolo importante anche nella definizione della tipologia di ricarica e della taglia della stazione. Batterie da 60 kWh richiedono potenze superiori ai 120 kW per mantenere sotto i 30 minuti i tempi di ricarica e questo incrementa il livello di complessità della stazione che deve essere debitamente attrezzato con sistemi di ausilio o con interfacce di collegamento idonee per supportare correnti elevate. Ma stazioni di queste dimensioni spesso configurano con l'uso urbano del veicolo che potrebbe soddisfare le proprie esigenze energetiche con ricariche quotidiane durante le soste spesso abbastanza lunghe e con potenze di minor impatto.

I sistemi di ricarica a bassa potenza (per ricarica sino a 22 kW) richiedono costi di acquisto da 600 a 3000 € (wallbox) mentre le colonnine richiedono da 1500 a 7000 € cadauna. Diversamente la ricarica veloce (modo 4 in c.c.) con potenze da 50 kW prevede impegni finanziari maggiormente onerosi a partire da 25000 € sino a 35000 €. Occorre aggiungere i costi di installazione ed allaccio variabili in funzione della tipologia e della posizione ambientale.

---

<sup>1</sup> Valutazioni antecedenti la pandemia COVID19

I sistemi di ricarica wireless nascono inizialmente con l'intento di favorire l'utente nelle operazioni di ricarica, automatizzando il processo di trasferimento energetico durante le soste. A meno delle inevitabili perdite per accoppiamento i sistemi wireless stazionari hanno mostrato buone prestazioni anche sotto il profilo della sicurezza e della protezione delle persone. Il mercato offre soluzioni da 3 e 7 kW ed è interessante anche la possibilità di sviluppo aftermarket con kit disponibili per veicoli già venduti. A conferma dell'interesse del mercato l'industria ha sentito l'esigenza di coordinare e regolare il settore, anche attraverso l'intervento degli enti normatori internazionali (IEC e CENELEC), per definire gli aspetti essenziali e disciplinare il settore (IEC 61980-1,2,3). Non ultimo l'aspetto della interoperabilità della ricarica quando si è in presenza di dispositivi di accoppiamento diversi (bobine primarie e secondarie di forme ed accoppiamenti differenti). Ma proseguono le realizzazioni sperimentali per la concretizzazione di stazioni wireless da 120 kW (Oak Ridge National Lab) o superiori.

I sistemi di ricarica wireless dinamici (Dynamic Wireless Power Transfer, DWPT) sono costituiti da una continuità di bobine primarie allocate lungo la strada (track coils) che, alimentate durante il passaggio del veicolo, consentono il trasferimento di energia a una analoga bobina posta a bordo del mezzo, per consentire la ricarica della batteria durante il moto. In (Lorico, A., J. Taiber and T. Yanni (2011). "Inductive Power Technology System Integration for Battery-Electric Vehicles." Clemson University International Center for Automotive Research. Presented at International Conference on Sustainable Automotive Technologies, 2011) è stata determinata la potenzialità di tali sistemi nel mantenere l'autonomia dei veicoli riducendo la capacità dell'accumulo o nell'incrementarla mantenendo la medesima taglia della batteria. Lo studio riporta che la riduzione dei costi della batteria è valutata del 20% e del 39% per potenze dei sistemi DWPT pari a 20 e 40 kW rispettivamente. La Fig. 10 (tratta da Jasprit S. Gill et al. / Infrastructure Cost Issues Related to Inductively Coupled Power Transfer for Electric Vehicles -Procedia Computer Science 32 ( 2014 545 – 552)) riporta la relazione lineare tra potenza del sistema DWPT, costo batterie ed incremento dell'autonomia.

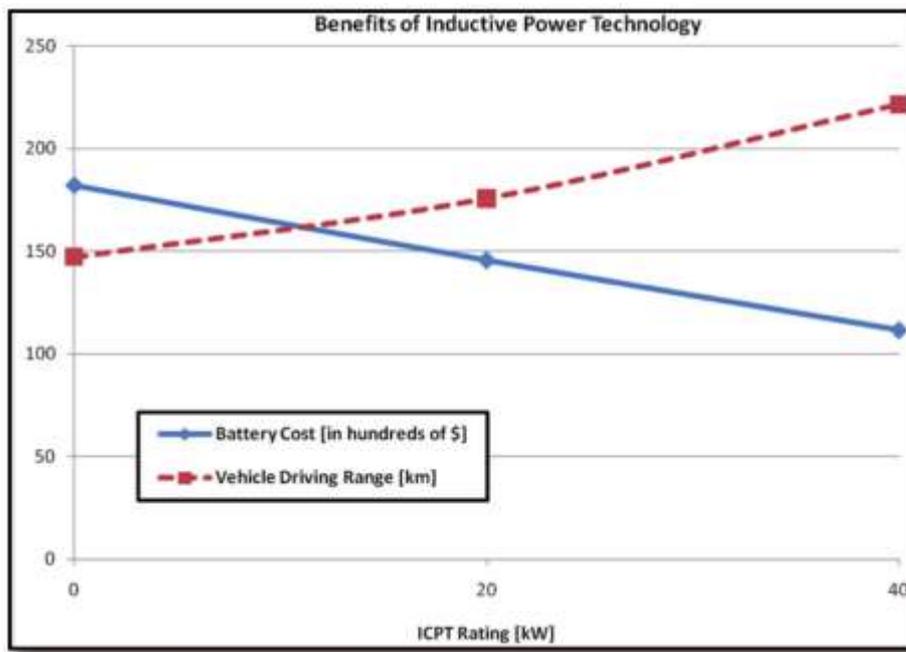


Figura 10: relazione tra potenza sistema DWPT , costi batteria veicolo ed autonomia

Di converso il sistema DWPT risulta dispendioso e richiede il coinvolgimento di molti soggetti per la realizzazione e gestione.

L'unione della tecnologia wireless con l'esigenza di ridurre il pacco batterie a bordo del veicolo ha condotto alla realizzazione sperimentale di soluzioni wireless dinamiche. Due esempi di realizzazione di impianti DWPT su scala di interesse anche commerciale sono il PRIMOVE della Bombardier, che trova applicazione in ambito del trasporto pubblico (tramvia senza catenaria) ed il sistema OLEV (OnLine Electric Vehicle) in

Corea del Sud, installato su due bus (impianto da 100 kW). Su taglie minori ed ambito sperimentale sono stati realizzati dei sistemi prototipali durante il Progetto europeo FABRIC finanziato dal VII Programma Quadro

Gli studi intrapresi hanno cercato di individuare i pregi ed i difetti della tecnologia DWPT, cercando di porre in evidenza anche i limiti tecnologici ed economici. La stima della penetrazione dei sistemi DWPT è indubbiamente legata alla diffusione del veicolo elettrico in generale. Maggiore sarà la quota di veicoli elettrici in circolazione, maggiore potrà essere la quota di veicoli che potranno utilizzare le strade elettrificate e quindi rendere maggiormente sostenibile l'investimento necessario per la realizzazione e la gestione del sistema. Come riferito, i costi delle batterie rappresentano una delle variabili che incideranno sulla diffusione dei veicoli elettrici e le previsioni di mercato indicano buone prospettive di vendita. Questo grazie a politiche di sostegno all'utente, politiche industriali per abbattere i costi di produzione ed una maggiore sensibilità verso temi di salvaguardia del pianeta. Il rapporto sui veicoli elettrici al 2020 redatto da Wood Mackenzie a Febbraio 2020 (<https://www.rinnovabili.it/mobilita/veicoli-ecologici/veicoli-elettrici-2020/>) indicava una quota di vendite globali del 14% al 2030 (scenario base) crescendo di quasi cinque volte rispetto al 2019<sup>2</sup>. Il medesimo report non trascura il DWPT indicando un peso maggiore di questa tecnologia a partire dal 2030 soprattutto per la riduzione dei pacchi batteria presenti sui veicoli: *“A differenza della ricarica fissa, un sistema dinamico può fare il pieno all'auto mentre questa si muove ad alta velocità annullando così l'ansia da autonomia. Questa tecnologia è un punto di svolta. Incoraggerà i produttori a fabbricare – e i clienti ad acquistare – veicoli con pacchi batteria molto più piccoli. Ciò attiverà un effetto valanga su costo, peso e portata”* (da Rinnovabili.it).

In “Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle” (Seungmin Jeong IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 30, NO. 11, NOVEMBER 2015) si riportano i risultati della sperimentazione del sistema DWPT OLEV realizzato in Corea del Sud. A fronte di un costo elevato di implementazione del sistema di bobine a terra, pari a circa 660.000 \$ per 7 bobine, i benefici risultanti sono tornati sotto forma di una minore taglia della batteria per il veicolo e di una maggiore vita della medesima. Infatti la DOD è minore nei cicli di lavoro e la vita della batteria ne beneficia allungandosi. Inoltre l'analisi di sensitività ha portato ad indicare come un maggior numero di bobine presenti sul tracciato migliori la vita della batteria e al contempo possa portare a una riduzione dei costi per via dei maggiori volumi di produzione richiesti.

La realizzazione delle strade elettrificate è un obiettivo futuribile che già vede tratti sperimentali in corso di test. L'elettrificazione stradale punta a sostenere il traffico pesante attraverso soluzioni di tipo conduttivo, tramite catenaria o contatto strisciante, ma anche con soluzioni DWPT. All'interno del progetto FABRIC (FABRIC D.5.4.1) è stata espletata una disamina delle potenzialità di sviluppo della tecnologia DWPT in differenti scenari: extraurbano veloce (autostrada o simile), sub-urbano e urbano con utenti specifici (ad esempio veicoli privati e trasporto pesante in e-corridor, veicoli per logistica e bus, bus urbani). Nel rapporto viene indicato che le e-ROAD (scenario extraurbano veloce) potranno avere una corsia dedicata alla elettrificazione (1 su tre/quattro per direzione), risparmiando sui costi di realizzazione della corsia aggiuntiva. Lo scenario prevede la realizzazione di tratti stradali di 25 km di lunghezza per incrementare la percorrenza sino al 20%. Diversa la situazione nello scenario sub-urbano e nell'urbano che vedono il TPL molto favorito con soluzioni di corridoi elettrificati da 10 km nel primo caso o con tratti brevi lunghi 25 metri nel secondo.

	2,030	2,040	2,050
Motorway	10	20	32
Periurban	80	200	400
Urban Bus	40	100	200
<b>Total</b>	<b>130</b>	<b>320</b>	<b>632</b>

**Figura 11: previsione di sistemi DWPT installati in Europa nei diversi scenari in FABRIC (report FABRIC D.5.4.1)**

La Fig. 11 mostra le indicazioni in FABRIC relative alla diffusione dei sistemi wireless dinamici nei paesi europei e nei diversi contesti. L'infrastruttura TEN-T, vista la sua importanza strategica per il trasporto di

<sup>2</sup> L'effetto del COVID19 ha ridotto le stime per il 2020 del 43%

persone e merci, è vista come punto di partenza per la realizzazione di corridoi stradali elettrificati con indicazione al 2030-2050.

La struttura del sistema DWPT presenta costi di realizzazione abbastanza elevati a causa dell'impatto sulla sede stradale. Valori stimati per la parte stradale che dovrebbe alloggiare la componentistica elettrica sono valutati intorno a 1.000.000 €/km a cui aggiungere il costo di manutenzione che porterebbe su un periodo di 20 anni ad una cifra di circa 2.600.000 €/km (FABRIC D.5.4.1). Per le spese in conto capitale la parte elettrica varia in base alla taglia delle singole sezioni e della potenza nominale di ricarica risultando in un valore di 450.000 €/km per una struttura da 50 kW con 500 coil/km.

A fronte degli elevati costi attuali, gli studi e la ricerca sui sistemi DWPT trovano supporto anche grazie allo sviluppo di soluzioni tecnologiche per la guida autonoma che offrirebbero vantaggi in termini di allineamento veicolo-track. L'efficienza di trasferimento sarebbe sempre mantenuta a livelli massimi grazie al corretto posizionamento geometrico che avverrebbe in modo automatico senza il ricorso all'intervento umano.

## *2.6 Rapporto sullo stato dell'arte delle norme tecniche sui sistemi WPT (aggiornamento al 31 gennaio 2020)*

### **2.6.1 Scopo**

Il presente rapporto fornisce lo stato dell'arte, aggiornato al 31 gennaio 2020, delle attività dei gruppi di lavoro attivi nei comitati tecnici normatori internazionali con riferimento allo sviluppo di norme tecniche (standardizzazione) per i sistemi wireless power transfer (WPT). In particolare, nel documento sono riassunte le attività all'interno dei comitati tecnici IEC, ISO, ITU ed ETSI. Inoltre, il presente rapporto fornisce un elenco delle norme tecniche relative ai sistemi WPT attualmente disponibili sul sito IEC Webstore (<https://webstore.iec.ch/>).

### **2.6.2 Gruppi di lavoro IEC attivi sulla standardizzazione dei sistemi WPT**

I seguenti gruppi di lavoro, appartenenti a diversi comitati tecnici di IEC, includono nello scopo i sistemi WPT:

1. IEC/ TC 47 – Semiconductor devices / WG 7 – Semiconductor devices for energy conversion and transfer.

Le attività del WG7 includono lo sviluppo di norme tecniche per i dispositivi a semiconduttore per la conversione dell'energia e le tecnologie di trasferimento, tra cui "Energy harvesting", "Wireless energy transfer", ecc. Le attività di questo WG includono la definizione delle specifiche a livello di sistema, dei metodi di valutazione e delle applicazioni relative ai dispositivi a semiconduttore.

2. IEC/ TC 69 – Electrical power/energy transfer systems for electrically propelled road vehicles and industrial trucks / WG 7 – Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems.

Le attività del WG7 includono la definizione dei requisiti generali (Part 1), dei requisiti specifici per la comunicazione tra il veicolo elettrico e l'infrastruttura con riferimento ai sistemi WPT (Part 2) e dei requisiti specifici per i sistemi WPT ad accoppiamento magnetico induttivo (Part 3).

3. IEC/ TC 100 – Audio, video and multimedia systems and equipment / TA 15 – Wireless power transfer.

Le attività del TA 15 includono lo sviluppo di pubblicazioni internazionali relative ai sistemi e apparecchiature multimediali WPT, nonché alla interoperabilità delle funzioni di trasmissione e ricezione dei sistemi WPT. In particolare, lo scopo del TA 15 include:

- la definizione di una cornice normativa attraverso cui coordinare gli elementi comuni e specifici della tecnologia WPT;
- la definizione delle specifiche dei sistemi WPT, dei requisiti, delle architetture funzionali, delle interfacce e dei corrispondenti servizi, nonché dei protocolli di controllo e gestione della potenza per l'operatività a livello di dispositivo e di sistema;

- la definizione dei metodi di misura del consumo di potenza e dell'efficienza energetica dei dispositivi, apparecchiature e sistemi WPT. 4. IEC/ TC 106 – Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure / WG 9 – Addressing methods for assessment of Wireless Power Transfer (WPT) related to human exposures to electric, magnetic and electromagnetic fields. Lo scopo del gruppo di lavoro WG9 include: • l'identificazione delle attuali lacune di conoscenza sui sistemi WPT con riferimento all'esposizione umana ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e alle interazioni con i dispositivi medici impiantati;
- la definizione dei requisiti per i sistemi WPT con riferimento alla valutazione dell'esposizione, sia per l'intervallo di frequenze fino a 10 MHz relativo agli effetti di stimolazione sia per l'intervallo di frequenze a partire da 100 kHz relativo agli effetti termici; • la definizione dei possibili metodi applicabili per la valutazione dell'esposizione ai sistemi WPT; • la valutazione circa la necessità di sviluppare una nuova norma IEC o la possibilità di adeguare una norma IEC esistente con riferimento alla valutazione dell'esposizione umana ai sistemi WPT, nonché la preparazione di documenti adeguati allo scopo;
- la valutazione circa la possibilità di istituire collegamenti con altri gruppi di lavoro all'interno del TC 106 e di altri TC di IEC. 5. IEC/ TC 106 – Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure / PT 63184 – Human exposure to electric and magnetic fields from wireless power transfer systems Lo scopo del gruppo di lavoro PT 63184 consiste nello sviluppo di una norma tecnica di base che definisca i metodi per la valutazione dell'esposizione umana ai campi elettrici e magnetici generati dai sistemi WPT operanti nell'intervallo di frequenze compreso tra 1 kHz e 30 MHz. 6. IEC/ CISPR/ CIS/B – Interference relating to industrial, scientific and medical radio-frequency apparatus, to other (heavy) industrial equipment, to overhead power lines, to high voltage equipment and to electric traction / ahG 4 – WPT (Wireless Power Transfer) Lo scopo del gruppo di lavoro ad hoc ahG 4 consiste in:
  - verificare la possibilità di applicazione dei metodi di misura definiti dal CISPR (International Special Committee on Radio Interference) e dei limiti specificati dalla norma di prodotto CISPR 11 (Industrial, scientific and medical equipment (ISM) – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement) per le apparecchiature elettriche ad uso residenziale e industriale del gruppo 2 operanti nella banda di frequenze ISM compresa tra 150 kHz e 18 GHz, alle apparecchiature elettroniche WPT di potenza e, ove necessario, proporre e sviluppare adeguamenti ad hoc;
  - determinare i limiti per i disturbi irradiati e condotti prodotti dalle apparecchiature elettroniche WPT di potenza, operanti nella banda di frequenze compresa tra 9 kHz e 150 kHz, da includere nella futura edizione della norma CISPR 11;
  - studiare modalità pratiche di misura e tipologie di carichi artificiali da impiegare nelle prove di collaudo delle apparecchiature elettroniche WPT di potenza in siti di prova standardizzati, al fine della incorporazione nella futura edizione della norma CISPR 11.

2.6.3 Collegamenti (liaisons) tra i comitati tecnici IEC attivi sulla standardizzazione dei sistemi WPT IEC/TC 106 (esposizione umana) ha istituito un collegamento con IEC/TC 69 (veicoli elettrici) e IEC/TC 100 (sistemi multimediali).

2.6.4 Altri comitati tecnici attivi sulla standardizzazione dei sistemi WPT

1. ITU-R SG01 - Radiocommunication Sector/Study Group 1 - Spectrum Management;
2. ISO/IEC JTC 1/SC 6 - Telecommunications and information exchange between systems;
3. ISO/TC 22/SC 37 - Electrically propelled vehicles;

4. ETSI Technical Committee Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM). IEC/TC 106 ha istituito un collegamento con ITU-R SG01.

#### 2.6.5 Norme tecniche sui sistemi WPT o che includono i sistemi WPT disponibili sul sito web IEC Webstore (<https://webstore.iec.ch/>).

CISPR 11:2015+AMD1:2016+AMD2:2019 CSV Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement

IEC 60364-7-722:2018 RLV Low-voltage electrical installations - Part 7-722: Requirements for special installations or locations - Supplies for electric vehicles

IEC 61980-1:2015 Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements

IEC TS 61980-2:2019 Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 2: Specific requirements for communication between electric road vehicle (EV) and infrastructure

IEC TS 61980-3:2019 Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 3: Specific requirements for the magnetic field wireless power transfer systems

IEC/IEEE 62704-2:2017 Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz - Part 2: Specific requirements for finite difference time domain (FDTD) modelling of exposure from vehicle mounted antennas

IEC TS 62764-1:2019 Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical equipment in the automotive environment with respect to human exposure - Part 1: Low frequency magnetic fields

IEC 62827-1:2016 Wireless power transfer - Management - Part 1: Common components

IEC 62827-2:2017 Wireless power transfer - Management - Part 2: Multiple device control management

IEC 62827-3:2016 Wireless power transfer - Management - Part 3: Multiple source control management

IEC TR 62869:2013 Activities and considerations related to wireless power transfer (WPT) for audio, video and multimedia systems and equipment

IEC TR 62905:2018 Exposure assessment methods for wireless power transfer systems

IEC 63006:2019 Wireless power transfer (WPT) - Glossary of terms

IEC 63028:2017 Wireless power transfer - Airfuel alliance resonant baseline system specification (BSS)

IEC PAS 63095-1:2017 The Qi wireless power transfer system power class 0 specification - Parts 1 and 2: Interface definitions

IEC PAS 63095-2:2017 The Qi wireless power transfer system - Power class 0 specification - Part 2: Reference Designs Version.1.1.2

IEC TR 63170:2018 Measurement procedure for the evaluation of power density related to human exposure to radio frequency fields from wireless communication devices operating between 6 GHz and 100 GHz

IEC TR 63231:2019 Consideration of energy efficiency in wireless power transfer technology

ISO/IEC 15149:2011 Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- Magnetic field area network (MFAN)

ISO/IEC 15149-1:2014 Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Magnetic field area network (MFAN) - Part 1: Air interface

ISO/IEC 15149-2:2015 Information technology -- Telecommunications and information exchange between systems -- Magnetic field area network (MFAN) -- Part 2: In-band Control Protocol for Wireless Power Transfer

ISO/IEC TR 24704:2004 Information technology - Customer premises cabling for wireless access points

ISO 15118-1:2019 Road vehicles - Vehicle to grid communication interface - Part 1: General information and use case definition

ISO 15118-8:2018 Road vehicles - Vehicle to grid communication interface - Part 8: Physical layer and data link layer requirements for wireless communication.

### 3 Conclusioni

Il tema della ricerca del triennio in corso riguarda la valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici legati alla mobilità elettrica. Il problema presenta due aspetti distinti: uno legato all'esposizione ai campi elettromagnetici emessi nell'abitacolo di veicoli di elettrici/ibridi e l'altro legato all'esposizione dei campi elettromagnetici emessi dalle stazioni di ricarica cablate o wireless. Durante questa prima annualità si è eseguita un'analisi della letteratura su queste due tematiche con lo scopo di evidenziare eventuali lacune nella conoscenza e di porre le basi per le attività scientifiche del biennio successivo. Per quanto riguarda l'esposizione della popolazione di veicoli elettrici/ibridi si sono raccolti e analizzati 16 lavori pubblicati tra il 2003 e il 2019. In tutti i lavori è stata evidenziata la complessità dello scenario di esposizione, in quanto le sorgenti di campo magnetico accidentale nei veicoli elettrici e ibridi sono molteplici e di frequenza diversa (da 0 Hz a qualche kHz) e la necessità di eseguire le valutazioni di esposizione in condizioni di moto dell'auto. Pur nella diversità dei protocolli di misura e della strumentazione utilizzata, nessuno dei lavori analizzati evidenzia delle situazioni di sovraesposizione rispetto alle normative vigenti. I limiti dei lavori analizzati stanno nella mancanza di standardizzazione delle procedure di misura e nella non univocità nella scelta del parametro di esposizione, che rendono i lavori e i risultati scarsamente confrontabili tra di loro. La necessità è quindi, principalmente, di rendere le procedure di misura il più possibili ripetibili e indipendenti dal cosiddetto fattore umano: infatti la necessità di eseguire le valutazioni di esposizione durante la guida rende questo fattore piuttosto determinante per la ripetibilità dei dati misurati. Inoltre è possibile evidenziare che l'attuale sviluppo di auto elettriche sempre più potenti comporterà sempre più la necessità di eseguire questo tipo di valutazione per la protezione dei passeggeri dall'esposizione ai campi elettromagnetici accidentali.

Un solo lavoro, tra quelli analizzati si è occupato della possibile interazione tra i campi magnetici presenti nell'abitacolo di un'auto elettrica e i dispositivi medici impiantabili attivi: su nessuno dei tre dispositivi analizzati e in nessuna delle condizioni esaminate è stato confermato un malfunzionamento.

Per quanto riguarda i sistemi di ricarica, al momento non sono presenti in letteratura lavori sulle colonnine di ricarica convenzionali. Diverso è il caso dei sistemi di ricarica wireless applicati ai veicoli elettrici, per i quali sono stati revisionati 16 lavori. L'analisi critica dei lavori è risultata piuttosto complessa, infatti a fronte di alcune apparenti similitudini, la mancanza di una procedura specifica e definita per queste situazioni espositive, dovuta al fatto che i sistemi auto elettrica-WPT sono ancora sperimentali o comunque estremamente limitati rende il confronto tra i lavori piuttosto difficile, riducendolo, di fatto al confronto delle conclusioni in termini di verifica del rispetto delle restrizioni di base secondo le linee guida ICNIRP [2, 17]. Nei lavori in cui è stata rilevata una sovraesposizione rispetto ai livelli di riferimento definiti in [1, 2, 17], i valori delle grandezze di base, ottenuti con i codici di calcolo, non eccedono le restrizioni di base.

Purtuttavia dall'analisi della letteratura riguardante l'esposizione ai CEM emessi dai sistemi di WPT sono derivate indicazioni utili sulle metodiche di analisi implementate che hanno, da una parte confermato la validità di quanto fatto dal nostro gruppo di lavoro a riguardo nelle annualità precedenti e dall'altra fornito materiale e spunti di riflessione importanti per il proseguo delle attività.

Un'altra attività ha riguardato la realizzazione e ottimizzazione del modello numerico del sistema prototipale di WPT dinamico realizzato in ENEA durante il precedente triennio di ricerca. Il confronto tra i dati sperimentali e i dati numerici ottenuti sul modello numerico ottimizzato presenta un ottimo accordo, rendendo il modello numerico utile per le successive simulazioni di dosimetria. Si sono inoltre presentate le attività riguardanti la definizione e standardizzazione dei metodi e procedure di valutazione dell'esposizione umana ai campi elettrici e magnetici emessi dai sistemi WPT, che i gruppi di lavoro internazionali WG9 e PT63184 del sottocomitato TC106 della IEC (International Electrotechnical Commission) stanno elaborando per la redazione di una norma tecnica internazionale di base.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. Raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea 1999/519/CE del 12 luglio 1999, pubblicata nella G.U.C.E. n. 199 del 30 luglio 1999.

2. ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Phys.*, vol. 74, (1998), pp. 494–522.
3. Legge 22 febbraio 2001 n. 36, "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici"
4. DPCM 8 luglio 2003, "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 ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz", GU Serie Generale n.199 del 28-8-2003.
5. DPCM 8 luglio 2003 "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", GU Serie Generale n.200 del 29-8-2003.
6. Vassilev A., Ferber A., Wehrmann C., Pinaud O., Schilling M., Ruddle A.R. 2015. Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol.57, pp. 35–43.
7. Stankowski S., Kessi A., B'echairaz O., Meier-Engel K., Meie M. 2006. Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization. *Health Phys.*, vol. 90, no. 2, pp. 148–153.
8. Ruddle A.R., Topham D.A., Ward D.D. 2003. Investigation of electromagnetic emissions measurements practices for alternative powertrain road vehicles. 2003. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2, pp. 543-547.
9. Havas M., Shum S., Dhalla R. 2004. Passenger Exposure to Magnetic Fields on go- Trains and on Buses, Streetcars, and Subways run by the Toronto Transit Commission, Toronto, CANADA, in: *Biological Effects of EMFs*, 3rd International Workshop. pp. 1065–1071.
10. Electromagnetic Health Organization. 2008. EMF test of 2007 Toyota Prius hybrid. *Electromagn. Health*.
11. Halgamuge M.N., Abeyrathne C.D., Mendis P. 2010. Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars. *Radiation Protection Dosimetry*, 141 (3), art. no. ncq168, pp. 255-268.
12. Tell R.A., Sias G., Smith J., Sahl J., Kavet R. 2013. ELF magnetic fields in electric and gasoline-powered vehicles. *Bioelectromagnetics*, vol. 34 no. 2 pp. 156-161.
13. Hareuveny R., Halgamuge M.N., Yaffe Y., Tzabari Y. 2015. Characterization of Extremely Low Frequency Magnetic Fields from Diesel , Gasoline and Hybrid Cars under Controlled Conditions. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 12, 1651–1666.
14. Tell R.A., Kavet R. 2016. Electric and Magnetic Fields < 100 kHz in Electric and Gasoline-powered Vehicles. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 172, 541–546.
15. Yang L., Lu M., Lin J., Li C., Zhang C., Lai Z., Wu T. 2019. Long-Term Monitoring of Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Electric Vehicles. *Int J Environ Res Public Health*. 2019 Oct 7;16(19).
16. Karabetsos, E., Kalampaliki, E., Koutounidis, D., 2014. Testing hybrid technology cars: Static and extremely low-frequency magnetic field measurements. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 9, 34–39.
17. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. 2010. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz–100 kHz). *Health Phys.*, vol. 99, no. 6, pp. 818 – 836.
18. Concha Moreno-Torres P., Lourd J., Lafoz M., Arribas J.R. 2013. Evaluation of the magnetic field generated by the inverter of an electric vehicle. *IEEE Trans. Magn.* 49, 837–844.
19. Concha P.M., Member S., Velez P., Lafoz M., Arribas J.R. 2016. Passenger Exposure to Magnetic Fields due to the Batteries of an Electric Vehicle. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 65, 4564–4571.
20. Ruddle A.R., Low L., Armstrong R., Dawson L., Rowell A. 2014. Recommendations for mitigating low frequency magnetic field exposure in hybrid/electric vehicles. 2014 *Int. Conf. Connect. Veh. Expo, ICCVE 2014 - Proc.* 86–91.
21. Chiqovani G., Oganezova I., Gabriadze G., Kuehn, M., Messer M., Jobava R. 2019. Radiation of Low Frequency Magnetic Field from High Voltage Powertrain Systems of Electric Vehicles. *EMC Europe 2019 - 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, art. no. 8872132, pp. 968-971.

22. Nelson J. J., Clement W., Martel B., Kautz R. and Nelson K. H. 2008. Assessment of active implantable medical device interaction in hybrid electric vehicles. 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Detroit, MI, 2008, pp. 1-6.
23. Laakso I., Hirata A. 2013. Evaluation of the induced electric field and compliance procedure for a wireless power transfer system in an electrical vehicle. *Physics in Medicine and Biology*, 58 (21), pp. 7583-7593.
24. Shimamoto T., Laakso I., Hirata A. 2015. In-situ electric field in human body model in different postures for wireless power transfer system in an electrical vehicle. *Physics in Medicine and Biology*, 60 (1), art. no. 163, pp. 163-173.
25. Pinto R., Bertoluzzo M., Lopresto V., Mancini S., Merla C., Pede G., Genovese A., Buja G. 2015. Exposure assessment of stray electromagnetic fields generated by a wireless power transfer system. 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2015, art. no. 7228618.
26. Watanabe T., Ishida M. 2016. Study on the Influence of the Magnetic Field and the Induced Electrical Field in Human Bodies by EV/PHEV Wireless Charging Systems. *SAE Technical Papers*, 2016-April (April).
27. Campi, T., Cruciani, S., De Santis V., Maradei F., Feliziani M. 2017. Numerical characterization of the magnetic field in electric vehicles equipped with a WPT system. *Wireless Power Transfer*, 4 (2), pp. 78-87.
28. De Santis V., Campi T., Cruciani S., Laakso I., Feliziani M. 2018. Assessment of the induced electric fields in a carbon-fiber electrical vehicle equipped with a wireless power transfer system. *Energies*, 11 (3), art. no. 684.
29. Campi T. Cruciani S, Maradei F. Feliziani M. 2019. Magnetic Field during Wireless Charging in an Electric Vehicle According to Standard SAE J2954. *Energies*. 12. 1795.
30. Pinto R., Lopresto V., Genovese A. 2017. Human exposure to wireless power transfer systems: A numerical dosimetric study. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2017, art. no. 7928254, pp. 988-990.
31. Chakarothai J., Wake K., Arima T., Watanabe S., Uno T. 2018. Exposure Evaluation of an Actual Wireless Power Transfer System for an Electric Vehicle with Near-Field Measurement, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66 (3), pp. 1543-1552.
32. Wang Q., Li W., Kang J., Wang Y. 2017. Electromagnetic safety of magnetic resonant wireless charging system in electric vehicles. 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer, WoW 2017, art. no. 7959402.
33. Park S. 2018. Evaluation of electromagnetic exposure during 85 kHz wireless power transfer for electric vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54 (1), art. no. A2057.
34. Zhang K., Du L., Zhu Z., Song B., Xu D. 2018. A Normalization Method of Delimiting the Electromagnetic Hazard Region of a Wireless Power Transfer System. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 60 (4), art. no. 8063494, pp. 829-839.
35. Hakuta Y., Watanabe T. 2019. Evaluation of the Induced Electric Field in Human Body by Wireless Power Transfer System for EV/PHV. 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC 2018, art. no. 8639442.
36. Wang Q., Li W., Kang J., Wang Y. 2018. Electromagnetic Safety Evaluation and Protection Methods for a Wireless Charging System in an Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*.
37. Watanabe T., Hakuta Y. 2019. Evaluation of the magnetic field leakage from two wireless power transfer systems for EV/PHV driven simultaneously. *World Electric Vehicle Journal*, 10 (2), art. no. 41.
38. Zucca M., Bottauscio O., Harmon S., Guilizzoni R., Schilling F., Schmidt M., Ankarson P., Bergsten T., Tammi K., Sainio P., Bruna Romero J., Laporta Puyal E., Pichon L., Freschi F., Cirimele V., Bauer P., Dong J., Maffucci A., Ventre S., Femia N., Di Capua G., Kuster N., Liorni I. 2019. Metrology for inductive charging of electric vehicles (MICEV). 2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, AEIT AUTOMOTIVE 2019, art. no. 8804498.
39. Dashora H. K., Buja G., Bertoluzzo M., Pinto R. & Lopresto V. 2017. Analysis and design of DD coupler for dynamic wireless charging of electric vehicles. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32(2), pp. 170 - 189.

40. Pinto R., Lopresto V., Genovese A. 2018. A numerical study for the design of a new DD coil prototype for dynamic wireless charging of electric vehicles. IET Conference Publications Volume 2018, Issue CP741, 2018 12th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2018; London; United Kingdom; 9 April 2018 through 13 April 2018; Code 142197.