

ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero della Transizione Ecologica



Ricerca di Sistema elettrico

Dimensionamento bobine di accoppiamento del V2H wireless e misura dei CEM da diverse sorgenti

R. Pinto, L. Ardoino, P. D'Atanasio, P. Zambotti

Report RdS/PTR(2020)/054

DIMENSIONAMENTO BOBINE DI ACCOPPIAMENTO DEL V2H WIRELESS E MISURA DEI CEM DA DIVERSE SORGENTI

R. Pinto, L. Ardoino, P. D'Atanasio, P. Zambotti

SSPT-TECS

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Mobilità

Linea di attività: L2.11 - *Dimensionamento bobine di accoppiamento e reti di compensazione della sezione bidirezionale del V2H wireless e misura dei CEM da diverse sorgenti*

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..... | 6 |
| 2.1 IMPIANTO NORMATIVO E METRICHE PROPOSTE PER LA VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE..... | 6 |
| 2.2 IMPIANTO DI TEST E STRUMENTAZIONE ADOTTATA..... | 7 |
| 2.3 STAZIONI DI RICARICA..... | 9 |
| 2.3.1 <i>Materiali e metodi delle misure sulle SRAP.....</i> | 9 |
| 2.3.2 <i>Risultati delle valutazioni di esposizione eseguite sulle due SRAP.....</i> | 11 |
| 2.3.3 <i>Procedura di misura per le stazioni di ricarica e conclusioni.....</i> | 15 |
| 2.4 AUTO ELETTRICHE..... | 16 |
| 2.4.1 <i>Materiali e metodi delle misure sui veicoli elettrici.....</i> | 17 |
| 2.4.2 <i>Risultati delle valutazioni di esposizione eseguite sui veicoli elettrici.....</i> | 19 |
| 2.4.3 <i>Procedura di misura per i veicoli elettrici e conclusioni.....</i> | 24 |
| 2.5 SISTEMI DI RICARICA SENZA CONTATTO (WIRELESS POWER TRANSFER, WPT)..... | 25 |
| 2.5.1 <i>Valutazione della conformità in merito agli effetti diretti.....</i> | 25 |
| 2.5.1.1 Valutazione dell'esposizione basata sul valore delle correnti delle bobine..... | 25 |
| 2.5.1.2 Valutazione dei campi incidenti in riferimento ai livelli di riferimento..... | 26 |
| 2.5.1.3 Valutazione dei campi incidenti in riferimento ai limiti di base..... | 26 |
| 2.5.1.4 Valutazione diretta dei campi elettrici o delle densità di corrente e/o del SAR indotti in riferimento ai limiti di base..... | 26 |
| 2.5.2 <i>Valutazione della conformità in merito agli effetti indiretti.....</i> | 26 |
| 2.6 DIMENSIONAMENTO DELLE BOBINE DI ACCOPPIAMENTO E DEL CIRCUITO DI COMPENSAZIONE PER IL V2H..... | 26 |
| 2.6.1 <i>Dimensionamento del filo di Litz e determinazione della distanza d.....</i> | 29 |
| 2.6.2 <i>Progetto delle bobine di accoppiamento e loro ottimizzazione.....</i> | 30 |
| 3 CONCLUSIONI..... | 33 |
| 4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... | 34 |

Sommario

La presenza di veicoli elettrici sempre più performanti, di stazioni di ricarica ad alta potenza e dei sistemi di ricarica senza contatto pone in evidenza la questione dell'esposizione della popolazione ai campi magnetici emessi da questo tipo di sorgenti.

In questo rapporto tecnico sono presentati le metodologie e i risultati di alcune campagne di misura effettuate su stazioni di ricarica ad alta potenza e su veicoli elettrici al fine di mettere a punto delle procedure di misura in condizioni di riferimento. Queste ultime si riferiscono a scenari di esposizione in cui la maggior parte dei parametri che possono influire sulla ripetibilità e riproducibilità del dato sperimentale possono essere controllati, pertanto offrono indubbi vantaggi nella messa a punto delle procedure di misura, in quanto permettono di focalizzare l'attenzione sulle problematiche che presenta lo scenario espositivo in esame.

In questo caso, abbiamo utilizzato l'impianto VeLA9 del JRC che è camera anecoica con rulli per la simulazione di guida dei veicoli. È stato inoltre possibile utilizzare diversi strumenti di misura di campo di induzione magnetica isotropi, in grado di fornire molteplici metriche per la definizione dell'esposizione. Tutto ciò ha permesso di fare confronti, riflessioni oltre che di individuare criticità per la messa a punto di procedure in grado di fornire risultati quanto più confrontabili e rappresentativi degli scenari espositivi considerati.

Queste procedure sono state poi impiegate per valutare l'esposizione ai campi magnetici emessi da due stazioni di ricarica ad alta potenza (max 350 kW) e presenti all'interno di due veicoli elettrici. Nel caso delle stazioni di ricarica è stato possibile definire delle distanze di rispetto per tutte le metriche adottate. È necessario notare che le distanze di rispetto sono state valutate con le stazioni di ricarica in esame operanti a una potenza pari a $\frac{1}{4}$ della massima potenza disponibile, pertanto in condizioni di massima carica è presumibile che le distanze di rispetto possano essere maggiori di quelle valutate in questa sede e che quindi per futuri scenari, dove più cabine e più auto possano essere utilizzati contemporaneamente sarà necessario progettare spazi e zone di rispetto adeguate per il soddisfacimento dei limiti di esposizione.

Nel caso dei veicoli elettrici, in nessun caso e per nessuna delle metriche adottate sono state evidenziate delle non conformità.

Per i sistemi di ricarica senza contatto sono stati descritti brevemente gli elementi principali del PAS (Publicly Available Specification) redatto dall'IEC di prossima pubblicazione, che costituisce il primo passo nella definizione di uno standard internazionale di misura per la valutazione dei campi magnetici emessi da questo tipo di dispositivi.

In questo rapporto sono inoltre descritte tutte le fasi che hanno condotto al progetto del sistema di bobine di accoppiamento e al dimensionamento delle reti di compensazione per il sistema V2H a partire dalle specifiche fornite dall'Università di Padova. Il progetto del sistema è stato fornito alla ditta costruttrice per la realizzazione del prototipo.

1 Introduzione

L'elettrificazione è considerata una delle opzioni chiave per ottenere un livello di decarbonizzazione significativo dei sistemi di trasporto su strada. In particolare, i veicoli elettrici e ibridi sono una concreta e già disponibile soluzione per ridurre le emissioni di CO₂ e le emissioni inquinanti dovuti ai veicoli. Sul mercato sono disponibili veicoli di diverse tipologie e potenze, ma ci sono ancora diverse questioni reali, potenziali o solo percepite che rappresentano dei fattori di limitazione per un incremento del mercato di questa tipologia di veicoli. I più menzionati sono il costo, l'autonomia chilometrica e i tempi di ricarica. Per questi ultimi la risposta è rappresentata dall'aumento delle capacità delle batterie e dalla disponibilità di una rete sempre più fitta di stazioni di ricarica ad alta potenza. Ad esempio un sistema di ricarica di 350 kW è in grado di ricaricare un pacco batterie di 35 kW in soli 10 min, potenze di questo livello però, sono più di 100 volte superiori alle usuali utenze domestiche. Sono inoltre allo studio diversi sistemi di ricarica senza contatto, con alcuni oggetti già sul mercato e dedicati ai modelli di veicolo elettrico più diffusi, che possono rappresentare una valida alternativa nell'ottica di una facilitazione delle operazioni di ricarica dei veicoli elettrici.

La presenza di veicoli elettrici sempre più performanti, di stazioni di ricarica ad alta potenza e dei sistemi di ricarica senza contatto pone in evidenza la questione dell'esposizione della popolazione ai campi magnetici emessi da questo tipo di sorgenti. L'impianto normativo a tutela della popolazione dall'esposizione ai campi elettromagnetici è stato descritto nel dettaglio in [1], ma al momento non esistono delle procedure di misura standardizzate per questo tipo di sorgenti e sono ancora molte le criticità che la comunità scientifica e comitati elettrotecnici internazionali stanno affrontando, per giungere a un impianto procedurale condiviso per le valutazioni di conformità di questa tipologia di dispositivi. Lo stato dell'arte su questa tematica descritto in [1] ha evidenziato sia la presenza di scenari complessi di esposizione, con segnali provenienti da più sorgenti a frequenze diverse tra di loro e segnali impulsivi, sia come la mancanza di standardizzazione delle procedure di misura e la non univocità nella scelta del parametro di esposizione rendano i lavori e i risultati scarsamente confrontabili tra di loro.

Nel 2019 l'IEC (International Electrotechnical Commission) ha pubblicato una specifica tecnica [2] dedicata alle misure dei campi magnetici generati dai dispositivi elettrici e elettronici all'interno dei veicoli. E' però necessario sottolineare che le specifiche tecniche sono simili a uno standard internazionale in termini di dettaglio e completezza, ma tuttavia non possono essere approvate come uno standard o perché non c'è ancora un consenso o perché la standardizzazione è considerata ancora prematura visto l'evolversi delle tecnologie e le criticità presenti.

Diverso è il caso dei sistemi di ricarica senza contatto per i quali i gruppi di lavoro internazionali WG9 e PT63184 del sottocomitato TC106 della IEC hanno elaborato un Publicly Available Specification (PAS) che sarà presumibilmente disponibile da aprile 2021 dal titolo 'Assessment methods of the human exposure to electric and magnetic fields from wireless power transfer systems - Models, instrumentation, measurement and numerical methods and procedures (Frequency range of 1 kHz to 30 MHz), in cui vengono descritte le metodologie di base per la valutazione degli effetti diretti e indiretti dell'esposizione ai sistemi di ricarica senza contatto e alcuni casi studio.

In questo lavoro saranno presentati le metodologie e i risultati di alcune campagne di misura effettuate su stazioni di ricarica ad alta potenza e su veicoli elettrici, al fine di mettere a punto delle procedure di misura in condizioni di riferimento controllate, per evidenziare le criticità e per fornire alla comunità scientifica elementi utili alla definizione e al perfezionamento dei futuri standard di misura. Questa attività è stata possibile grazie a una collaborazione molto proficua che ENEA ha instaurato con il Join Research Center (JRC) di Ispra, in cui sono state messe a fattor comune le competenze presenti nella divisione SSPT-TECS dell'ENEA e le infrastrutture disponibili presso il JRC (camera anecoica con rulli per la simulazione di guida dei veicoli). Per quanto riguarda i sistemi di ricarica senza contatto verranno mostrati brevemente gli elementi principali del PAS IEC in pubblicazione, che costituisce il primo passo in direzione di uno standard internazionale di misura per la valutazione dei campi magnetici emessi da questo tipo di dispositivi.

Un'altra attività del gruppo di lavoro SSPT-TECS ha riguardato il dimensionamento bobine di accoppiamento del V2H wireless e dei circuiti di compensazione a partire dalle specifiche fornite alla fine

del primo anno dall'Università di Padova. Attraverso l'utilizzo di un codice di calcolo FEM è stato possibile ottenere i parametri di progetto del sistema che sono stati forniti alla ditta costruttrice del prototipo.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Impianto normativo e metriche proposte per la valutazione dell'esposizione

La protezione della popolazione dagli effetti acuti legati all'esposizione dei campi elettromagnetici è stata affrontata dall'Unione Europea nel 1999 con una Raccomandazione [3] 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 che in Italia sono definite in [4 - 6]. La Raccomandazione Europea 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 [7], dove vengono definite le grandezze fisiche "dosimetriche" (grandezze di base) proprie dell'interazione tra i CEM e i sistemi biologici e i relativi limiti di base. La conformità ai limiti di base viene valutata per mezzo della misurazione delle grandezze fisiche, proprie dei CEM, direttamente misurabili nell'ambiente (intensità del campo elettrico (E, V/m), del campo magnetico (H, A/m) e del campo induzione magnetica (B, T)), per le quali vengono forniti i cosiddetti livelli di riferimento, che 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.

Nel caso delle sorgenti oggetto di questo studio, l'intervallo di frequenza da considerare è tra 0 Hz e 100 kHz: in Tabella 1 sono mostrati i livelli di riferimento (in valore efficace) 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: Livelli di riferimento fino a 100 kHz in [3,7]

| Frequenza | Intensità di campo E [V/m] | Intensità di campo H [A/m] | Campo B [μT] |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 0-1 Hz | | 3.2×10^4 | 4×10^4 |
| 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'.

Come è evidente, in questo intervallo di frequenza i livelli di riferimento cambiano al variare della frequenza. Per i segnali sinusoidali la valutazione di conformità viene fatta attraverso la misura diretta del campo B e del campo E e il confronto dei dati misurati con il livello di riferimento alla frequenza di interesse. Nel caso di scenari di esposizione complessi dove sono presenti segnali a frequenza diversa e/o segnali impulsivi, che per loro natura non hanno una singola portante, ma sono a larga banda, negli ultimi anni sono stati proposti due approcci diversi per la valutazione della conformità dell'esposizione. Il primo approccio è stato proposto in [7]: la valutazione di conformità viene fatta attraverso la valutazione spettrale del campo B e la valutazione dell'indice di esposizione (IE) definito nel seguente modo:

$$IE = \sum_{i=1Hz}^{i=100kHz} \frac{B_i}{B_{Li}} \leq 1$$

dove

B_i è la componente del campo B misurata alla frequenza i-esima

B_{Li} è il livello di riferimento del campo B alla frequenza i-esima

Se l'IE è inferiore o uguale a 1 l'esposizione è conforme.

Questo approccio risulta però molto conservativo e quindi non realistico nel caso, ad esempio, di segnali impulsivi. Per questo motivo nel 2003 ICNIRP ha proposto in [8] il metodo del picco ponderato, che tiene conto non solo delle ampiezze, ma anche delle fasi delle singole componenti frequenziali del segnale. Il metodo prevede la misura del campo B e la valutazione di un indice di picco ponderato (IPP) attraverso la seguente formula:

$$IPP = MAXIMUM \left\{ \left| \sum_i \frac{B_i}{B_{Li} * \sqrt{2}} * \cos(2\pi f_i + \theta_i + \varphi_i) \right| \right\} \leq 1$$

dove

B_i è il valore di picco del campo B alla frequenza f_i

B_{Li} è il livello di riferimento del campo B alla frequenza f_i

θ_i è la fase della componente spettrale B_i

φ_i è funzione della frequenza ed è definito in [8].

Anche in questo caso l'IPP deve essere inferiore o uguale a 1 per assicurare la conformità dell'esposizione.

Tale indice può essere valutato in due modi: nel dominio della frequenza, calcolando lo spettro del segnale misurato e applicando direttamente la formula data, oppure nel dominio del tempo, elaborando il segnale misurato attraverso una serie di filtri passa-basso a cascata, realizzati in modo tale da ottenere, per quanto possibile, una frequenza di trasferimento totale simile a quella fornita in [8].

Nella Raccomandazione Europea, antecedente a [8] la valutazione dell'IE è l'unico approccio proposto per la valutazione di conformità, ma negli ultimi anni il metodo del picco ponderato ha guadagnato importanza in quanto è in grado di fornire delle valutazioni di conformità più aderenti alla realtà, senza correre rischi di sovrastime che potrebbero limitare, senza alcuna ragione, la proposta di nuove applicazioni tecnologiche.

2.2 Impianto di test e strumentazione adottata

Le campagne di misura sono state eseguite presso l'impianto VeLA9 (Vehicle electric LABORatory 9) del JRC di Ispra. VeLA9 è una camera semi anecoica di ampie dimensioni (21m x 15.6m x 8m, Figura 1) per valutazioni di compatibilità e immunità elettromagnetica di ogni tipo di veicolo. È progettata per operare nell'intervallo di frequenze di 14 kHz – 18 GHz e al suo interno è annullata la presenza di qualsiasi segnale elettromagnetico che non sia quello delle sorgenti, pertanto è possibile eseguire misure senza nessuna interferenza.

È equipaggiata di un banco a rulli per veicoli, completamente immune ai campi elettromagnetici e in grado di raggiungere velocità fino ai 120 km/h con accelerazione e frenata rigenerativa massime fino a 10 m/s². Il banco a rulli è posizionato su una tavola rotante a 360° di diametro pari a 11 m, che permette la rotazione mentre il veicolo è guidato sul banco a rulli. In questo modo è possibile fare test di emissioni, immunità e compatibilità sul veicolo durante la guida senza muovere le antenne di test.

Durante queste campagne di misura sono stati utilizzati due tipologie di misuratori di campo B con caratteristiche leggermente diverse che hanno permesso di fare una serie di considerazioni sul loro utilizzo per questo genere di valutazioni.

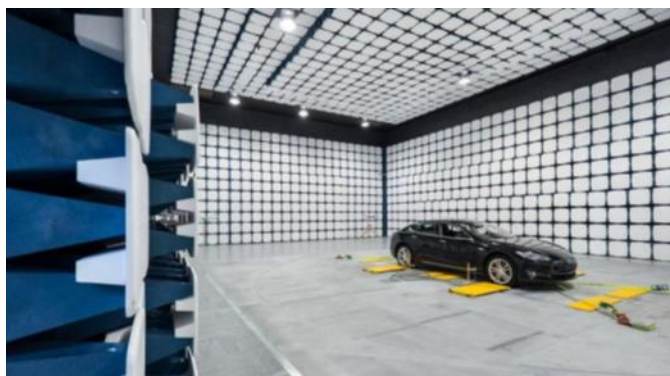


Figura 1: impianto VeLA 9 presso il JRC di Ispra

Il primo sensore è l'analizzatore di campo B e campo E EHP 50 G (Narda Safety Test Solutions, Cisano sul Nave, Savona, Italia, Figura 2a). L'EHP 50 G è dotato di una sonda isotropica (92mm x 92mm x 109mm) con una risoluzione dichiarata di 1 nT per le misure del campo B nell'intervallo di frequenza 1 Hz – 400 kHz. Il dispositivo è dotato di un software che fornisce, tra le tante, le seguenti valutazioni:

1. Un grafico dello spettro in frequenza del campo B, in un intervallo di frequenza (span) selezionato dall'operatore e un valore istantaneo del campo B nello span selezionato;
2. Un valore dell'IE secondo i livelli di riferimento riportati in Tabella 1, all'interno dello span selezionato ed espresso in percentuale nel tempo;
3. Un valore di IPP valutato nel dominio del tempo per mezzo di un filtro digitale interno, dimensionato secondo i livelli di riferimento riportati in Tabella 1 e valido su tutta la banda dello strumento. Anche l'IPP è riportato in percentuale nel tempo.

Durante le campagne di misura sono stati utilizzati due EHP 50G, uno in dotazione al JRC e uno in dotazione dell'ENEA. La loro incertezza espansa (con fattore di copertura pari a 2, per un livello di confidenza pari al 95%) è pari al 19.2% e 18.3% rispettivamente.

Il secondo sensore è l'ELT 400 (Narda Safety Test Solution, Pfullingen, Germany) un sensore isotropico di campo B, nell'intervallo di frequenza 1 Hz – 400 kHz, dotato di una sonda approssimativamente sferica di diametro pari circa a 10 cm (Figura 2b).

Il sensore è equipaggiato con due detector, 'Peak' e 'RMS' e fornisce una valore di campo B su tutta la banda di lavoro con una risoluzione pari alo 0.001%. Ha 4 differenti fondo scala (32 µT, 320 µT, 800 µT and 8 mT) impostabili manualmente dall'operatore. La sua incertezza espansa (con fattore di copertura pari a 2, per un livello di confidenza pari al 95%) è pari all'8%.

Durante le campagne di misura, tutti gli strumenti utilizzati avevano un certificato di calibrazione valido.



Figura 2: a) EHP 50G, b) ELT 400

2.3 Stazioni di ricarica

La tecnologia delle stazioni di ricarica ad alta potenza (SRAP) garantisce la ricarica veloce in corrente continua (CC) con potenze fino a 350 kW, anche se al momento sul mercato ci sono pochi veicoli in grado di sostenere una potenza tale. La differenza sostanziale rispetto alle colonnine di ricarica standard, che sono in grado di arrivare fino a 50 kW, consta nella modularità delle cabine di potenza che fornisce la possibilità di adattare gli scenari di ricarica in accordo con le diverse esigenze. Infatti il trasformatore e la circuiteria di rettificazione sono fisicamente posti in un'unità di potenza separata dalla unità di interfaccia con l'utente che è la parte che poi rifornisce la vettura.

In Figura 3 è mostrato uno scenario di ricarica di questo tipo.



Figura 3: SRAP con due unità di potenza e un'unità di interfaccia con l'utente

L'unità di interfaccia con l'utente è dotata di connettori appositi e cavi di ricarica flessibili forniti di un sistema di raffreddamento liquido per evitare i possibili surriscaldamenti dovuti al passaggio delle correnti piuttosto elevate: caricare con 150 kW, con una singola unità di potenza, una batteria da 400 V significa avere correnti pari a 375 A, mentre due unità di potenza quando lavorano contemporaneamente per ricaricare due veicoli possono fornire correnti fino a 500 A. Utilizzando questo tipo di dispositivi si può ingrandire un'infrastruttura di ricarica aggiungendo più unità di interfaccia, inoltre la gestione dinamica delle potenze di uscita contribuisce alla diminuzione dei costi, ottimizzando la connessione alla rete elettrica.

2.3.1 Materiali e metodi delle misure sulle SRAP

Per questo lavoro sono state utilizzate due diverse SRAP le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 2. Le SRAP erano collegate alla rete elettrica del JRC in grado di fornire una tensione (V_{ac}) di 440 V e una corrente massima di 200 A. Le misure sono state eseguite collegando le SRAP a un veicolo elettrico con una capacità di ricarica dichiarata pari a 100 kW. Le distanze fra l'auto, le due unità di potenze e l'unità di interfaccia erano rispettivamente pari a 3 m e 1 m. Contestualmente alle misure di campo B, sono state misurate le correnti, le tensioni e le potenze dalla rete elettrica alle SRAP e da queste verso il veicolo, utilizzando due analizzatori di potenza (WT 1800, Yokogawa Italia srl, Sirius-PWR_MCTS2, Dewesoft srl). Per entrambe le SRAP è stata identificata una griglia di punti che è stata poi marcata con nastro adesivo. In Tabella 3 sono elencati i numeri di punti delle griglie di misura sulle due SRAP. In Figura 4 è mostrata la griglia adottata per il SRAP1.

Per queste misure è stato utilizzato uno dei due EHP 50G, impostato con uno span compreso tra 25 Hz e 2 kHz per le misure del campo B a larga banda e le misure dell'IE in accordo con i limiti di [3] e riportati in Tabella 1. Durante tutte le misure il centro del sensore è stato posto a 10 cm dalle superfici delle SRAP utilizzando un distanziatore di polistirolo.

Tabella 2: Caratteristiche principali delle due SRAP analizzate

| SRAP | Specifiche elettriche | Efficienza e fattore di potenza | Peso e dimensioni | Temperature operative |
|------|---|-----------------------------------|--|-----------------------|
| 1 | 400 V _{ac} ± 10% 50 Hz 277 A nominali @ 400 V _{ac} 160 kW Uscita CC: 500 A 150 – 920 V (fino a 350 kW) | ≥ 94% a pieno carico FP ≥ 0.97 | 2 cabine di potenza (1340 kg; 2030 x 1170 x 770 mm ³) Unità interfaccia (250 kg; 2390 x 620 x 440 mm ³) | -35 – +55 °C |
| 2 | 400 V _{ac} ± 10% 50 Hz 248 A @ 172 kVA Uscita CC: 500 A fino a 640 V 322 kW @ 920 V | ≥ 95% a pieno carico FP ≥ 0.98 | 2 cabine di potenza (1110 kg; 1000 x 800 x 1800 mm ³) Unità interfaccia (260 kg; 600 x 300 x 2400 mm ³) | -35 – +50 °C |

Tabella 3: Punti di misura definiti su SRAP1 e SRAP2

| SRAP1 | | | | SRAP2 | | | |
|----------------------------------|-------------|---------------------|-------------|----------------------------------|-------------|---------------------|-------------|
| Master e slave | | Unità d’interfaccia | | Master e slave | | Unità d’interfaccia | |
| Facce A e C | Facce B e D | Facce A e C | Facce B e D | Facce A e C | Facce B e D | Facce A e C | Facce B e D |
| 15 | 10 | 10 | 5 | 15 | 15 | 10 | 5 |
| Totale punti di misura 80 | | | | Totale punti di misura 90 | | | |

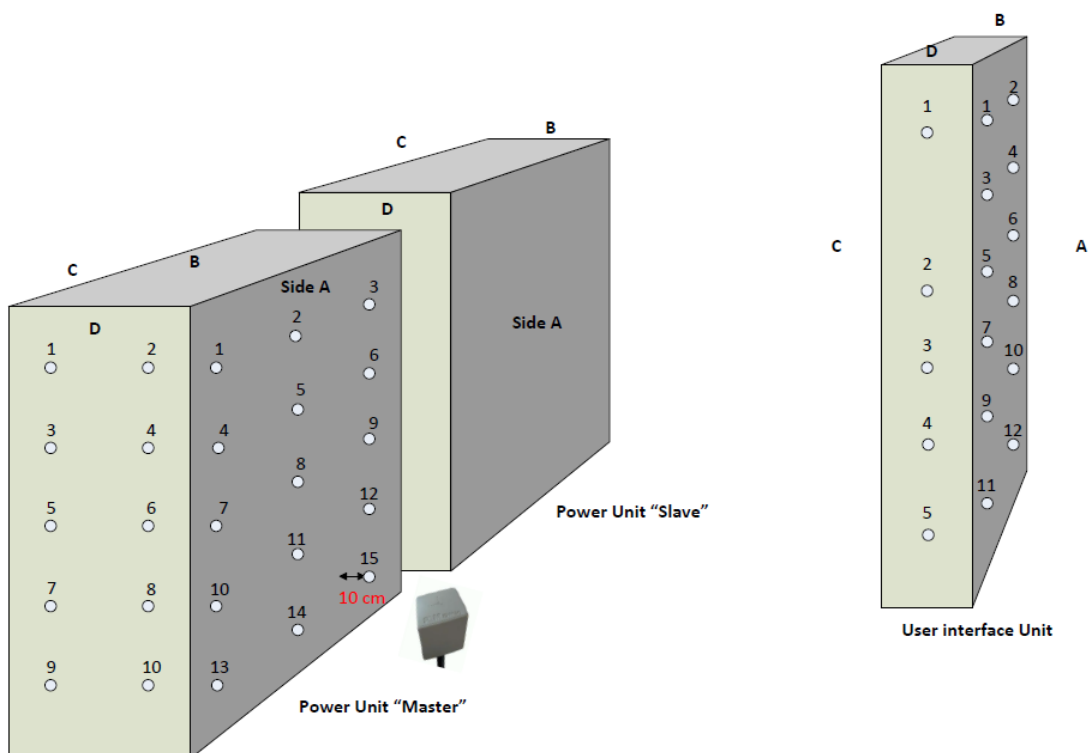


Figura 4: Griglia di misura usata per la SRAP1

Inoltre il sensore era posizionato sempre nello stesso orientamento assiale, per garantire la ripetibilità e la consistenza delle misure effettuate.

Dopo la scansione della griglia sono state eseguite delle valutazioni su una griglia più fitta in corrispondenza della posizione in cui è stato trovato il valore massimo per IE, in modo tale da identificare la posizione di massima esposizione dove sono state eseguite le seguenti valutazioni: misura di IPP e valutazione della distanza di conformità dalla sorgente per entrambi gli indici utilizzati.

2.3.2 Risultati delle valutazioni di esposizione eseguite sulle due SRAP.

Grazie alle misure di tensione, corrente e potenza effettuate durante la ricarica del veicolo, è stato possibile identificare diversi comportamenti delle due SRAP nella distribuzione della potenza tra le due unità di potenza (di seguito denominate ‘master’ e ‘slave’).

Per la SRAP1 la potenza poteva essere concentrata in una sola unità di potenza o equamente condivisa tra le due unità di potenza. Secondo il produttore della SRAP1, per ricariche superiori a 50 kW, la distribuzione di potenza tra le due unità dipende da algoritmi interni, dipendenti da diverse variabili come ore di servizio, temperatura, ecc. e non facilmente prevedibile. La Figura 5 mostra la potenza e la corrente misurate sul lato CA e CC dello slave SRAP1 durante una ricarica che portava lo stato di ricarica del veicolo dal 10% al 57%. I valori della corrente in alternata erano compresi tra 127 A e 132 A, mentre la corrente in continua era stabile vicino a 200 A. Pertanto, ricaricare il veicolo dal 10% al 50% della sua capacità (circa 20 min complessivi di ricarica) manteneva i valori di corrente stabili e di conseguenza stabili, presumibilmente, anche i valori di campo B, vista la sua dipendenza dalla corrente presente nel circuito. Per questo motivo, tutte le misure sono state eseguite entro questo intervallo di tempo di 20 minuti, mantenendo stabile la corrente in alternata entro l'intervallo 127 A-132 A e la potenza erogata superiore a 80 kW (non i 100 kW nominali, dichiarati dal produttore).

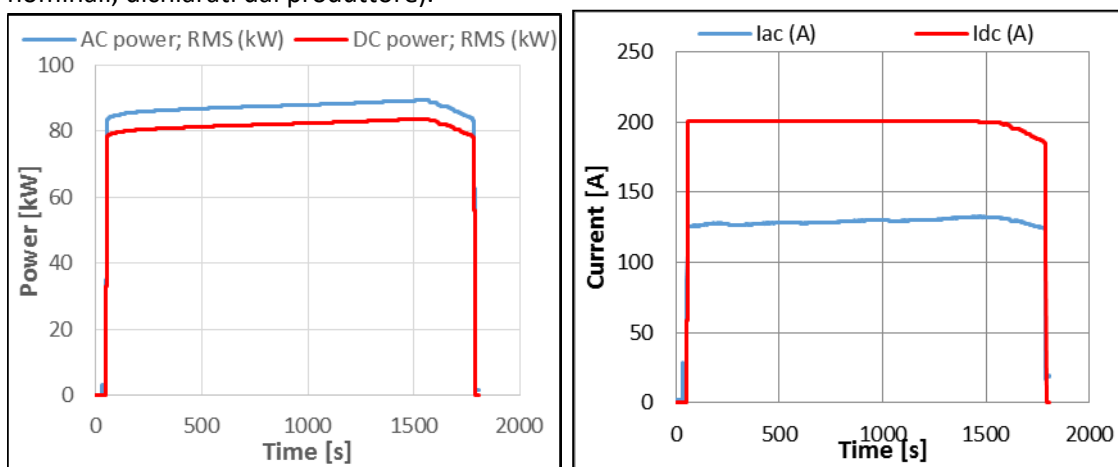


Figura 5: Potenza e correnti continue e alternate misurate sullo slave di SRAP1 durante le operazioni di ricarica

Per SRAP2, l'alimentazione in corrente alternata dalla rete è risultata, invece, equamente distribuita tra le due unità di alimentazione, e quindi convertita e trasferita all'unità dell'interfaccia utente. Anche in questo caso il periodo di tempo utile per fare le misure di campo B a potenza costante è risultato di circa 20 min e pari a una ricarica del veicolo dal 10% al 50 % della sua capacità. La potenza nominale di trasferimento della SRAP2 è risultata essere pari a 83 kW.

Nelle Tabelle 4, 5, 6, 7 sono riportati tutti i valori di campo B e di IE misurati in corrispondenza dei punti della griglia identificati sulle due unità di potenza (master e slave) delle due SRAP a una distanza di 10 cm dai dispositivi. In grassetto sono evidenziati i punti della griglia dove sono stati valutati valori di IE superiori al 100%. Da un esame degli spettri del segnale, che sono una delle uscite dell'EHP 50G, si è potuto notare come la componente con i valori di picco più elevati è quella a 50 Hz, eppure in nessuno dei punti misurati il valore di campo B nella banda 25 Hz – 2 kHz ha superato il valore limite di 100 μ T che rappresenta il livello di riferimento a 50 Hz stabilito in [3]. Dall'esame dei dati nelle tabelle, si può evidenziare come, in molti casi non c'è corrispondenza tra i punti dove si misurano i valori più alti di campo B e valori dell'IE superiori al

100% (e.g. in Tabella 5 faccia C, posizione 7, max B = 64.6 μ T, IE = 308.5%; posizione 10 max IE = 578.2, B = 56.8 μ T).

Tabella 4: Campo B e IE misurati nell'unità master della SRAP1

| Faccia | A | | B | | C | | D | |
|-----------|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|
| Posizione | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % |
| 1 | 3.5 | 20.33 | 4.2 | 40.5 | 4.9 | 27.6 | 3.4 | 15.5 |
| 2 | 4.0 | 22.24 | 5.3 | 45.4 | 4.7 | 25.8 | 3.9 | 16.7 |
| 3 | 4.2 | 22.99 | 10.1 | 61.0 | 4.7 | 27.3 | 6.9 | 26.5 |
| 4 | 10.1 | 54.63 | 17.1 | 77.2 | 14.7 | 63.6 | 7.6 | 26.6 |
| 5 | 11.3 | 73.22 | 30.6 | 138.2 | 13.5 | 51.5 | 23.1 | 64.1 |
| 6 | 11.1 | 69.30 | 57.1 | 218.4 | 12.3 | 56.6 | 23.1 | 64.0 |
| 7 | 26.7 | 202.9 | 28.7 | 153.5 | 75.3 | 309.4 | 24.6 | 118.9 |
| 8 | 43.9 | 383.4 | 35.9 | 200.5 | 70.5 | 258.6 | 23.5 | 114.1 |
| 9 | 25.3 | 318.6 | 44.1 | 158.8 | 33.1 | 219.2 | 35.1 | 136.0 |
| 10 | 39.4 | 418.2 | 49.5 | 201.5 | 64.1 | 551.6 | 21.4 | 110.9 |
| 11 | 45.9 | 382.8 | | | 52.1 | 455.8 | | |
| 12 | 39.7 | 454.2 | | | 43.3 | 400.4 | | |
| 13 | 34.5 | 255.0 | | | 64.4 | 326.0 | | |
| 14 | 36.3 | 205.6 | | | 83.8 | 312.6 | | |
| 15 | 28.0 | 215.5 | | | 49.9 | 440.9 | | |

Tabella 5: Campo B e IE misurati nell'unità slave della SRAP1

| Faccia | A | | B | | C | | D | |
|-----------|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|
| Posizione | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % |
| 1 | 3.4 | 19.9 | 4.6 | 36.1 | 4.6 | 21.1 | 4.2 | 13.8 |
| 2 | 3.4 | 19.2 | 5.8 | 40.3 | 4.5 | 19.9 | 4.4 | 13.0 |
| 3 | 4.1 | 22.7 | 8.4 | 57.8 | 4.7 | 23.8 | 9.0 | 26.2 |
| 4 | 7.1 | 36.1 | 13.0 | 77.6 | 14.5 | 59.2 | 9.5 | 25.9 |
| 5 | 6.3 | 38.6 | 23.0 | 121.6 | 12.5 | 46.6 | 20.9 | 61.2 |
| 6 | 7.8 | 42.4 | 46.3 | 213.9 | 10.6 | 51.7 | 21.3 | 67.4 |
| 7 | 21.1 | 150.9 | 26.1 | 162.5 | 64.6 | 308.5 | 27.6 | 132.2 |
| 8 | 31.4 | 269.8 | 38.3 | 305.5 | 61.9 | 251.0 | 27.2 | 122.5 |
| 9 | 26.5 | 208.3 | 31.2 | 128.3 | 33.2 | 230 | 39.9 | 146.2 |
| 10 | 28.8 | 313.2 | 34.2 | 159.9 | 56.8 | 578.2 | 28.8 | 98.9 |
| 11 | 48.7 | 382.6 | | | 44.8 | 390.2 | | |
| 12 | 30.1 | 351.4 | | | 37.0 | 464.4 | | |
| 13 | 39.2 | 240.9 | | | 61.2 | 322.5 | | |
| 14 | 58.8 | 237.2 | | | 60.5 | 244.4 | | |
| 15 | 24.7 | 176.4 | | | 46.0 | 404.2 | | |

Tabella 6: Campo B e IE misurati nell'unità master della SRAP2

| Faccia | A | | B | | C | | D | |
|-----------|------------------------------|------|------------------------------|------|------------------------------|--------------|------------------------------|------|
| Posizione | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % |
| 1 | 2.6 | 10.5 | 1.6 | 6.7 | 2.2 | 7.0 | 1.4 | 5.3 |
| 2 | 1.5 | 6.8 | 1.4 | 6.3 | 1.9 | 5.5 | 2.0 | 6.9 |
| 3 | 1.8 | 7.3 | 1.5 | 7.9 | 2.5 | 10.6 | 2.4 | 7.8 |
| 4 | 2.7 | 13.0 | 3.1 | 9.9 | 4.2 | 13.8 | 3.2 | 17.5 |
| 5 | 2.9 | 11.6 | 2.2 | 6.0 | 3.4 | 10.3 | 6.9 | 22.8 |
| 6 | 3.4 | 10.6 | 2.8 | 10.4 | 3.9 | 15.5 | 4.1 | 14.3 |
| 7 | 3.4 | 8.7 | 6.4 | 19.3 | 20.3 | 57.2 | 11.1 | 42.4 |
| 8 | 8.4 | 24.7 | 8.8 | 16.5 | 20.5 | 53.1 | 9.2 | 54.7 |
| 9 | 9.1 | 24.9 | 8.8 | 26.9 | 22.6 | 73.1 | 7.4 | 29.3 |
| 10 | 20.4 | 60.7 | 13.1 | 30.5 | 38.1 | 93.0 | 20.5 | 54.9 |
| 11 | 16.3 | 44.0 | 40.1 | 72.2 | 28.4 | 57.6 | 25.7 | 68.6 |
| 12 | 12.6 | 40.4 | 30.1 | 77.5 | 30.7 | 80.9 | 15.2 | 34.3 |
| 13 | 14.9 | 56.4 | 16.9 | 40.0 | 35.3 | 92.6 | 13.9 | 37.8 |
| 14 | 18.2 | 63.6 | 26.7 | 53.8 | 48.6 | 115.3 | 29.3 | 69.5 |
| 15 | 14.5 | 49.6 | 25.9 | 70.8 | 44.8 | 130.9 | 15.4 | 49.7 |

Tabella 7: Campo B e IP misurati nell'unità slave della SRAP2

| Faccia | A | | B | | C | | D | |
|-----------|------------------------------|------|------------------------------|------|------------------------------|--------------|------------------------------|------|
| Posizione | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % | B (μ T) Wide band | IE % |
| 1 | 1.9 | 8.6 | 1.8 | 6.1 | 2.2 | 6.2 | 1.3 | 9.4 |
| 2 | 1.3 | 6.3 | 1.6 | 6.2 | 1.8 | 5.1 | 2.4 | 11.7 |
| 3 | 1.6 | 5.7 | 1.5 | 7.6 | 2.0 | 6.5 | 1.7 | 7.1 |
| 4 | 2.8 | 12.5 | 4.0 | 11.5 | 4.0 | 12.5 | 2.9 | 13.9 |
| 5 | 3.4 | 12.2 | 3.1 | 7.8 | 3.5 | 8.9 | 4.8 | 15.4 |
| 6 | 3.7 | 9.6 | 4.0 | 15.3 | 3.5 | 11.3 | 3.3 | 11.7 |
| 7 | 17.5 | 43.2 | 9.9 | 24.1 | 17.8 | 51.8 | 10.9 | 36.8 |
| 8 | 11.4 | 28.5 | 11.7 | 21.2 | 17.2 | 45.0 | 9.8 | 54.9 |
| 9 | 10.4 | 23.9 | 12.0 | 36.7 | 21.8 | 60.7 | 9.8 | 31.2 |
| 10 | 13.8 | 41.3 | 12.8 | 29.0 | 28.0 | 74.1 | 23.9 | 60.2 |
| 11 | 12.67 | 36.9 | 34.6 | 68.0 | 20.0 | 56.4 | 19.1 | 42.9 |
| 12 | 11.5 | 28.8 | 23.5 | 71.3 | 26.5 | 72.4 | 12.1 | 40.4 |
| 13 | 7.8 | 35.1 | 15.6 | 39.1 | 46.9 | 123.3 | 28.6 | 81.3 |
| 14 | 8.9 | 31.9 | 38.0 | 79.0 | 34.0 | 101.5 | 31.9 | 73.7 |
| 15 | 9.0 | 32.1 | 35.1 | 83.0 | 35.0 | 117.0 | 12.3 | 47.1 |

In Tabella 8 sono mostrate delle misure aggiuntive di IPP eseguite sull'unità master della SRAP1 nei punti in cui gli IE superavano il 100%.

Tabella 8: Analisi aggiuntive eseguite nell'unità master della SRAP1

| Faccia | A | | | B | | | C | | | D | | |
|--------|--------------|--------------|--------|--------------|-------|--------|--------------|--------------|--------|--------------|-------|--------|
| Pos | IE % | IPP % | IE/IPP | IE % | IPP % | IE/IPP | IE % | IPP % | IE/IPP | IE % | IPP % | IE/IPP |
| 5 | | | | 138.2 | 67.5 | 2.1 | | | | | | |
| 6 | | | | 218.4 | 98.8 | 2.2 | | | | | | |
| 7 | 202.9 | 92.6 | 2.2 | 153.5 | 75.3 | 2.0 | 309.4 | 153.8 | 2.0 | 118.9 | 68.0 | 1.8 |
| 8 | 383.4 | 201.2 | 1.9 | 200.5 | 96.3 | 2.1 | 258.6 | 106.0 | 2.4 | 114.1 | 55.1 | 2.1 |
| 9 | 318.6 | 168.8 | 1.9 | 158.8 | 77.8 | 2.0 | 219.2 | 97.7 | 2.2 | 136.0 | 91.2 | 1.5 |
| 10 | 418.2 | 291.6 | 1.4 | 201.5 | 93.1 | 2.2 | 551.6 | 319.8 | 1.7 | 110.9 | 50.2 | 2.2 |
| 11 | 382.8 | 160.4 | 2.4 | | | | 455.8 | 263.9 | 1.7 | | | |
| 12 | 454.2 | 288.9 | 1.6 | | | | 400.4 | 185.6 | 2.2 | | | |
| 13 | 255.0 | 152.5 | 1.7 | | | | 326.0 | 153.7 | 2.1 | | | |
| 14 | 205.6 | 113.0 | 1.8 | | | | 312.6 | 139.2 | 2.3 | | | |
| 15 | 215.5 | 148.1 | 1.5 | | | | 440.9 | 226.3 | 2.0 | | | |

Dall'analisi della Tabella 8 si evince che, per tutti i punti, i valori dell'IPP sono sempre inferiori ai valori dell'IE (evidenziato dai rapporti IE/IPP sempre maggiori di 1). Si conferma così, che l'approccio dell'IE proposto in [3] rimane piuttosto conservativo. In alcuni casi (e.g faccia B e faccia D), gli IE sono superiori a 100, mentre gli IPP sono sempre inferiori a 100. Tuttavia in altri punti entrambi gli indici sono superiori a 100, confermando la necessità di indagini più approfondite. In Tabella 9 sono mostrati tutti i dati di campo B, IE e IPP valutati nel punto di massimo (trovato dopo l'infittimento della griglia intorno al punto di esposizione maggiore identificato durante la prima scansione sulla griglia meno fitta) a 10 e a 20 cm di distanza dai dispositivi.

Tabella 9: Analisi sul punto di massimo identificato sulle unità master e slave delle due SRAP

| Unità di potenza | Distanza | B (µT) Wide band | IE % | IPP % |
|--------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------|--------------|
| Unità master SRAP1 | 10 cm | 64.7 | 576.9 | 346.9 |
| | 10 cm (con potenza divisa equamente) | 37.0 | 347.1 | 197.2 |
| | 20 cm | 24.7 | 220.6 | 110.2 |
| Unità slave SRAP1 | 10 cm | 57.5 | 611.2 | 381.5 |
| | 10 cm (con potenza divisa equamente) | 34.1 | 325.5 | 186.1 |
| | 20 cm | 29.3 | 255.6 | 174.2 |
| Unità master SRAP2 | 10 cm | 55.1 | 127.2 | 73.9 |
| | 20 cm | 16.2 | 44.8 | 32.0 |
| Unità slave SRAP2 | 10 cm | 45.6 | 108.3 | 65.5 |
| | 20 cm | 16.2 | 49.7 | 32.7 |

Nel caso della SRAP1, il punto di massima emissione è posizionato a sinistra in basso nei dintorni del punto 10 della faccia C sia sul master che sullo slave. Nel caso in cui il sistema di ricarica funzioni dividendo equamente la potenza tra le due unità, sia i valori di campo che i valori degli indici decrescono sensibilmente, anche se gli indici sono ancora superiori al 100%. Nel caso della SRAP2 il punto di massimo identificato è in prossimità della posizione 15 della faccia C, sia per il master che per lo slave. In questo caso l'IPP è sempre inferiore al 100%, ma a 20 cm di distanza anche l'IE è inferiore al limite.

Nella Tabella 10 sono indicate le distanze di conformità dalle unità di potenza dei due sistemi per le quali entrambi gli indici di esposizione sono inferiori a 100.

Tabella 10: Distanze di conformità dalle unità di potenza delle due SRAP per entrambi gli indici di esposizione

| | Unità di potenza | Distanza di conformità (cm) | |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------|------|
| | | WPI | EI |
| SRAP1 | Master | 23.0 | 31.0 |
| | Slave | 22.5 | 31.5 |
| | Master (power equally shared) | 14.0 | 26.0 |
| | Slave (power equally shared) | 10.0 | 23.0 |
| SRAP2 | Master | <10 | 13.0 |
| | Slave | <10 | 14.0 |

Queste distanze sono affette da un'incertezza legata all'incertezza dello strumento utilizzato e alle sue dimensioni, sfortunatamente non è possibile quantificare questa incertezza a meno di fare molte misure per calcolarne il valore. Questa non è però una strada percorribile dato il fattore tempo che, soprattutto in condizioni reali di misura, potrebbe essere un elemento limitante. Per questo motivo, ai fini di una eventuale zonizzazione dell'area intorno alle stazioni di ricarica, è possibile pensare a un margine di sicurezza di qualche centimetro per essere sicuri di limitare l'accesso a zone non conformi.

Nelle unità di interfaccia scorrono solo correnti continue e i valori di campo statico (non mostrati in questo rapporto) sono molto bassi.

In queste unità, il contributo all'esposizione legato alle componenti a frequenza maggiore è stato misurato con l'EHP 50G nei punti della griglia descritti in Tabella 3 e Figura 4 e sono molto bassi come si può vedere dai dati di esempio mostrati in Tabella 11.

Tabella 11: IE e IPP misurati sulla faccia C di SRAP1 e sulla faccia B di SRAP2

| Posizioni | SRAP1 Faccia C | | SRAP2 Faccia B | |
|-----------|----------------|-------|----------------|-------|
| | IE % | IPP % | IE % | IPP % |
| 1 | 0.4 | 1.4 | 1.0 | 7.8 |
| 2 | - | 1.2 | 1.6 | 7.3 |
| 3 | 3.4 | 2.8 | 0 | 2.0 |
| 4 | 1.1 | 2.8 | 1.7 | 2.0 |
| 5 | 5.4 | 3.5 | 1.0 | 1.8 |
| 6 | 8.7 | 5.4 | | |
| 7 | 14.6 | 7.2 | | |
| 8 | 22.7 | 12.9 | | |
| 9 | 21.2 | 6.3 | | |
| 10 | 15.8 | 8.9 | | |
| 11 | 3.5 | 3.2 | | |
| 12 | 0.4 | 3.9 | | |

2.3.3 Procedura di misura per le stazioni di ricarica e conclusioni

Le campagne di misura descritte hanno fornito una serie di informazioni utili alla stesura di un protocollo di misura finalizzato alla valutazione dell'esposizione ai campi di induzione magnetica per stazioni di ricarica in condizioni di riferimento. Il protocollo comprende i seguenti passi:

- La strumentazione utilizzata deve essere munita di sensori isotropi, di dimensione contenuta, di banda compresa fra 1 Hz e qualche centinaio di kHz. Le impostazioni dello strumento devono essere scelte in base alle caratteristiche della sorgente considerata e soprattutto delle componenti frequenziali in gioco. Questi strumenti devono essere in grado di poter misurare non solo il campo

B, ma anche valutare degli indici di esposizione previsti dalla Raccomandazione Europea [3] e dagli organismi internazionali [7], nel caso specifico l'IE e l'IPP;

- Identificare una griglia di punti su tutte le parti di cui è costituita la SRAP per poter eseguire una prima scansione di massima per la ricerca della zona di massimo;
- Le misure vanno eseguite con la batteria del veicolo scarica e non si deve arrivare al massimo della ricarica, perché, oltre una certa soglia (nel nostro caso il 50% di carica del veicolo), la potenza di ricarica diminuisce, di conseguenza diminuiscono le correnti in gioco e quindi il campo B, pertanto non si è più nella condizione di esposizione peggiore;
- Effettuare queste misure preliminari a una distanza costante dal sistema, magari aiutandosi con un distanziatore fisso posizionato sul sensore (in queste prove sono stati fissati 10 cm dal centro del sensore, che ha comportato l'utilizzo di un distanziatore di polistirolo di circa 5 cm di spessore);
- Su questa prima griglia eseguire misure di campo B e di IE, in tutti i punti, per la ricerca del punto di maggiore emissione (sono necessari entrambi i valori, in quanto questi test ci hanno mostrato che non sempre i punti dove il campo B e IE sono massimi coincidono);
- Identificato questo punto eseguire le stesse misure del punto precedente, ma su una griglia più fitta intorno ad esso per identificare il punto di emissione peggiore;
- Sul punto di emissione peggiore fare una valutazione anche dell'IPP;
- Nel caso di superamento dei valori di conformità (100% nel caso dei due indici IE e IPP) valutare la distanza di conformità dal sistema in esame, allontanandosi perpendicolarmente da esso fino a quando gli indici non risultano inferiori al 100%.

Abbiamo applicato questo protocollo di misura a due SRAP (350 kW) operanti a una potenza di ricarica massima di 83 kW. In queste condizioni abbiamo identificato delle distanze di conformità per SRAP1 pari a 23 cm quando si considera come indice di valutazione l'IPP e 31,5 cm quando si considera l'IE, per SRAP2 le distanze di conformità sono inferiori a 10 cm quando si considera come indice di valutazione l'IPP e 14 cm quando si considera l'IE. È necessario notare che queste distanze sono state valutate quando le stazioni di ricarica operavano a una potenza che è $\frac{1}{4}$ della massima potenza disponibile, pertanto in condizioni di massima carica è presumibile che queste distanze possano aumentare e che quindi, per futuri scenari dove più cabine e più auto possano essere utilizzati contemporaneamente, sarà necessario progettare spazi e zone di rispetto adeguate per il soddisfacimento dei limiti di esposizione.

2.4 Auto elettriche

All'interno di un'auto elettrica possono essere identificate diverse possibili sorgenti di campo magnetico [9]: il motore elettrico, i convertitori di potenza, i cavi che connettono le varie parti e alcune funzioni particolari come la frenata rigenerativa. Tutte queste sorgenti operano a frequenze diverse che vanno dalla continua (0 Hz) a qualche kHz. In definitiva, le auto elettriche sono uno di quei rari casi in cui sorgenti ad alta potenza o elevata corrente sono molto prossimi alle persone, inoltre ogni auto è uno scenario di esposizione unico, in quanto la posizione dei vari elementi può cambiare molto tra i vari modelli disponibili sul mercato. In anni recenti, ci sono stati diversi studi finalizzati alla valutazione dell'esposizione ai campi magnetici all'interno dei veicoli elettrici e ibridi [10 – 14], da cui non sono emerse evidenze che all'interno dei veicoli valutati ci siano dei superamenti dei livelli di riferimento delle linee guida internazionali, ma la diversità di metodologie, strumenti e metriche adottati rende i risultati difficilmente confrontabili tra di loro. Inoltre, sono emerse alcune criticità che inficiano soprattutto la riproducibilità e la ripetibilità dei risultati: molti test sono stati eseguiti con auto circolante su strada, urbana o extraurbana, e i valori di campo magnetico misurato risultavano fortemente dipendenti da molti fattori imponderabili, quali la situazione del traffico e il fattore umano. Inoltre, tutti gli autori hanno sottolineato come l'avvento di auto elettriche sempre più potenti e performanti rendono questa tematica della valutazione dell'esposizione all'interno dei veicoli elettrici sempre più attuale.

Come già detto non ci sono ancora degli standard forniti dall'IEC, al momento solo la Cina [15] e gli USA [16] si sono dotati di standard molto diversi tra di loro per procedure e metriche utilizzate.

Per tutti questi motivi si è deciso di utilizzare la struttura VeLA9 del JRC per cercare di mettere a punto una procedura ripetibile per questo tipo di valutazioni e per ricavare una serie di informazioni utili sulle metriche più rappresentative.

2.4.1 Materiali e metodi delle misure sui veicoli elettrici

Nelle campagne di misura descritte si sono considerati due veicoli elettrici le cui caratteristiche generali sono presentate in Tabella 12.

Tabella 12: Caratteristiche generali dei veicoli esaminati

| Veicolo | Capacità della batteria [kWh] | Potenza del motore [kW] | Tempo 0-100 km/h [s] | Peso [kg] |
|---------|-------------------------------|-------------------------|----------------------|-----------|
| VE#1 | 35.8 | 100 | 9.6 | 1853.25 |
| VE#2 | 90 | 294 | 4.8 | 2485.20 |

All'interno del veicolo sono stati identificati 19 punti di misura: 17 all'interno dell'abitacolo in corrispondenza della posizione dei piedi, del torace e della testa dei passeggeri più altre posizioni considerate interessanti, 2 sono stati identificati all'interno del bagagliaio posteriore dell'auto. In Tabella 13 sono presentati tutti i punti di misura (denominati in inglese), mostrati, come esempio iconografico, nella Figura 6. Tutti i punti di misura erano stati identificati con un nastro adesivo per consentire la ripetibilità del posizionamento dei sensori.

Tabella 13: Denominazione dei punti di misura considerati

| Acronym | Description |
|---------|------------------------|
| FFL | Front Feet Left |
| FFR | Front Feet Right |
| FTC | Front Thorax Central |
| FTL | Front Thorax Left |
| FTR | Front Thorax Right |
| FTC2 | Front Thorax Central 2 |
| FHR | Front Head Right |
| FHL | Front Head Left |
| RFC | Rear Feet Central |
| RTL | Rear Thorax Left |
| RTC | Rear Thorax Central |
| RTR | Rear Thorax Right |
| RHL | Rear Head Left |
| RHC | Rear Head Central |
| RHR | Rear Head Right |
| RFL | Rear Feet Left |
| RFR | Rear Feet Right |
| TL | Trunk Left |
| TR | Trunk Right |



Figura 6: Punti di misura all'interno del veicolo

Come detto, i fattori che inficiano in maggior misura la riproducibilità e la ripetibilità delle valutazioni di esposizione all'interno dei veicoli elettrici è la mancanza di un ciclo di guida ripetibile e la presenza del fattore umano. Per cercare di ridurre l'influenza di questi aspetti, abbiamo arbitrariamente deciso un ciclo di guida standard da eseguire sul banco a rulli presente in VeLA9. IL ciclo ha una durata di 130 s e prevede un periodo di 15 s a tre diverse velocità costanti (40, 80, 120 km/h) raggiunti in 15 s con tre diverse accelerazioni (0.74, 1.48, 2.22 m/s²). Il ciclo è mostrato in Figura 7.

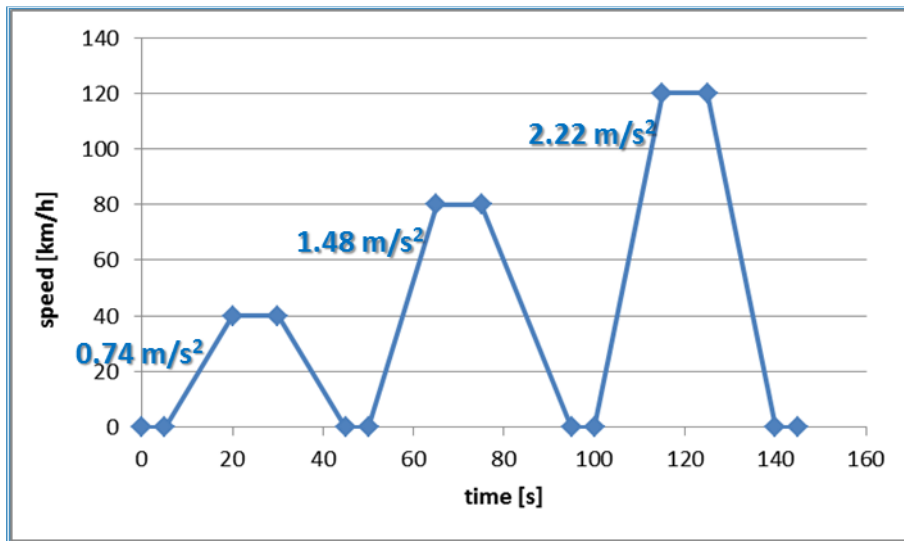


Figura 7: Ciclo di guida utilizzato durante i test

Durante le due campagne di misura (una su VE#1 e l'altra su VE#2) lo stesso guidatore ha eseguito il ciclo tutte le volte che è stato necessario.

Durante entrambe le campagne di misura sono stati utilizzati i due EHP 50G in dotazione di ENEA e JRC per eseguire le misure di seguito elencate in tutti i punti selezionati:

- Misura di campo B con uno span compreso fra 25 Hz e 2 kHz (con risoluzione spettrale disponibile di 5 Hz, autonomamente scelta dal software e impossibile da cambiare);
- Misura di IPP nel dominio del tempo in accordo con i livelli di riferimento definiti in [3, 7].

Durante un singolo ciclo di guida venivano utilizzati entrambi i misuratori, ma in punti diversi per dimezzare il tempo della campagna di misura: tutti i punti sono stati comunque valutati con entrambi gli strumenti per consentire un confronto.

Alla fine della prima campagna di misura sono emerse una serie di problematiche che verranno descritte nella sezione risultati e che hanno portato a utilizzare anche l'ELT 400 durante la seconda campagna di misura, eseguita su VE#2, per avere un ulteriore confronto.

Durante la seconda campagna le impostazioni dell'ELT erano le seguenti:

- Sensore di picco;
- Modalità 'Max Hold';
- Fondo scala a 32 μT o 320 μT in accordo con le ampiezze del segnale misurato
- Frequency cut a 1 Hz.

2.4.2 Risultati delle valutazioni di esposizione eseguite sui veicoli elettrici

In Tabella 14 sono presentati i valori di campo B e i valori di IPP misurati da entrambi gli EHP 50G in tutti i punti di misura. Gli stessi valori sono riportati nelle Figure 8 e 9, con le relative arre di errore per un confronto visivo.

Tabella 14: Campo B e IPP misurati su VE#1

| Posizione | B [μT] | | IPP [%] | |
|-----------|------------------------|------|------------|------|
| | JRC | ENEA | JRC | ENEA |
| FFL | 2.6 | 1.9 | 8.4 | 9.4 |
| FFR | 1.1 | 1.3 | 12.2 | 11.7 |
| FTC1 | 0.4 | 0.4 | 5.2 | 6.4 |
| FTL | 0.4 | 0.4 | 2.3 | 3.4 |
| FTC2 | 0.4 | - | 2.5 | - |
| FTR | 0.5 | 0.8 | 2.7 | 2.9 |
| FHL | 0.4 | 0.3 | 0.8 | 0.8 |
| FHR | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 0.4 |
| RFL | 0.9 | 1.1 | 16.9 | 12.8 |
| RFR | 1.1 | 1.5 | 4.9 | 8.5 |
| RFC | 0.7 | 0.7 | 6.8 | 6.7 |
| RTL | 3.7 | 3.0 | 7.1 | 5.8 |
| RTR | 2.2 | 3.1 | 3.5 | 3.9 |
| RTC | 0.9 | 0.8 | 2.6 | 2.7 |
| RHL | 1.0 | 1.0 | 1.3 | 1.3 |
| RHR | 1.2 | 1.4 | 1.3 | 1.3 |
| RHC | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 |
| TR | 2.4 | 2.4 | 2.8 | 2.7 |
| TL | 2.5 | 2.6 | 3.0 | 2.9 |

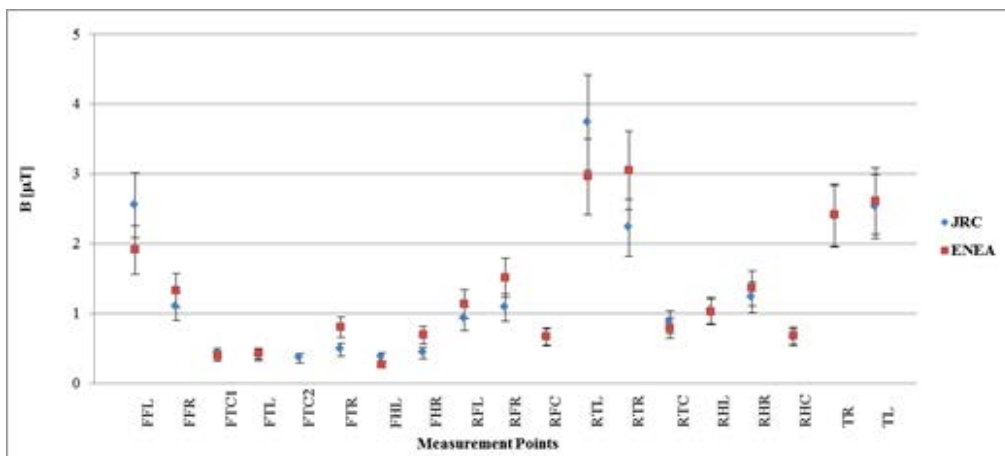


Figura 8: Campo B misurati su VE#1 con entrambi gli EHP 50G

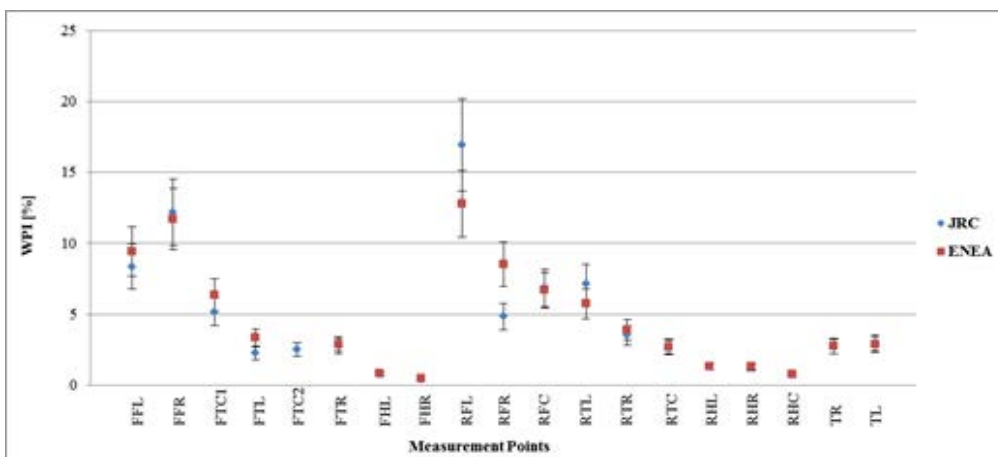


Figura 9: IPP misurati su VE#1 con entrambi gli EHP 50G

Dall’analisi delle Figure 8 e 9 possono discendere alcune considerazioni:

- Eccetto che per un caso (posizione RFR per la valutazione di IPP) c’è un buon accordo tra le misure eseguite con entrambi gli strumenti; questo conferma la riproducibilità dell’approccio seguito (posizioni di misura ben definite e ciclo di guida unico in tutti i casi) e questo è vieppiù vero, se si tiene conto del fatto che le misure sono state eseguite in tempi/giorni diversi;
- Il valore massimo del campo B e dell’IPP non si trovano nella stessa posizione, questo suggerisce che la misura del campo B da sola non è in grado di identificare il punto di esposizione peggiore e che quindi non è una metrica affidabile per questo genere di valutazioni in scenari complessi;
- Tutti i valori di IPP sono conformi.

Nel periodo intercorso tra le due campagne di misura è stato possibile fare alcune considerazioni a partire dai dati e dalla loro elaborazione. Lo scenario di esposizione presenta campi magnetici derivanti da sorgenti di tipo impulsivo (switch e altri) e la misura spettrale fornita dall’EHP 50G, da cui provengono la valutazione del campo B e dell’IE non sono molto affidabili in questo caso, come confermato dallo stesso produttore. Infatti il sensore elabora il segnale con una Fast Fourier Transformer (FFT) che, in presenza di segnali impulsivi, può produrre artefatti in grado di inficiare l’accuratezza delle misure. Inoltre, il campionamento di 5 Hz con cui il software di gestione fornisce i dati, è sicuramente troppo basso per lo span scelto e quindi non è possibile fare delle valutazioni off line con programmi fatti in casa per ulteriori verifiche. La misura

dell'IPP non è interessata da questo problema, in quanto si tratta di una elaborazione nel dominio del tempo.

Per questo motivo si è scelto di utilizzare anche l'ELT 400 nella seconda campagna di misura su VE#2 per fare degli ulteriori confronti in termini di campo B. Durante questa campagna sono state eseguite anche misure di IE con i due EHP 50G per valutare tutte le metriche disponibili.

In Tabella 15 sono presentati i valori di campo B misurati con l'ELT 400 alla fine di ogni rampa di accelerazione, mentre in Tabella 16 sono presentati i valori di campo B, degli IE valutati e gli IPP misurati con i due EHP 50G nel veicolo EV#2.

La loro trasposizione su grafico (Figura 10 e Figura 11) rende più immediate le considerazioni che seguono.

Tabella 15: Valori di campo B misurati con l'ELT 400 alla fine di ogni accelerazione in VE#2

| Posizione | B [μ T] | | | |
|-----------|-----------------|--------|--------|-------|
| | Acc. 1 | Acc. 2 | Acc. 3 | Range |
| FFL | 15.8 | 45.6 | 60.4 | 320 |
| FFR | 12.7 | 21.1 | 48.7 | 320 |
| FTC1 | 2.0 | 6.9 | 9.1 | 32 |
| FTL | 9.1 | 9.7 | 19.9 | 32 |
| FTC2 | 2.4 | 6.9 | 21.0 | 32 |
| FTR | 3.1 | 8.5 | 17 | 32 |
| FHL | 1.7 | 2.5 | 8.4 | 32 |
| FHR | 1.4 | 3.3 | 6.6 | 32 |
| RFL | 10.2 | 30.7 | 30.7 | 320 |
| RFR | 9.6 | 19.8 | 28.8 | 32 |
| RFC | 7.8 | 17.8 | 29.2 | 32 |
| RTL | 4.1 | 5.2 | 7.9 | 32 |
| RTR | 4.0 | 4.6 | 7.2 | 32 |
| RTC | 2.2 | 4.8 | 6.7 | 32 |
| RHL | 2.7 | 2.7 | 5.4 | 32 |
| RHR | 3.0 | 3.3 | 5.6 | 32 |
| RHC | 2.4 | 2.4 | 3.9 | 32 |
| TR | 7.7 | 8.9 | 18.6 | 32 |
| TL | 8.2 | 9.0 | 9.0 | 32 |

Tabella 16: Valori di campo B, IE e IPP misurati con i due EHP 50G in VE#2

| Posizione | B [μ T] | | IE [%] | | IPP [%] | |
|-----------|-----------------|------|-----------|------|------------|------|
| | JRC | ENEA | JRC | ENEA | JRC | ENEA |
| FFL | 0.5 | 0.5 | 6.1 | 6.3 | 23.7 | 39.5 |
| FFR | 0.6 | 0.5 | 5.1 | 5.7 | 53.9 | 23.0 |
| FTC1 | 0.8 | 0.8 | 4.2 | 6.4 | 12.6 | 11.6 |
| FTL | 0.2 | 0.2 | 1.7 | 1.4 | 8.6 | 9.6 |
| FTC2 | 3.0 | 0.23 | 7.8 | 2.0 | 8.3 | 3.4 |
| FTR | 0.3 | 0.3 | 2.9 | 2.8 | 12.5 | 2.8 |
| FHL | 0.1 | 0.1 | 0.7 | 0.6 | 6.7 | 2.3 |
| FHR | 1.4 | 1.7 | 2.6 | 4.1 | 7.3 | 1.9 |
| RFL | 0.4 | 0.3 | 3.1 | 3.3 | 24.8 | 5.6 |
| RFR | 0.7 | 0.7 | 8.5 | 7.8 | 33.7 | 34.0 |
| RFC | 0.9 | 0.7 | 9.2 | 8.2 | 38.2 | 11.8 |
| RTL | 1.0 | 1.0 | 2.5 | 2.3 | 1.6 | 2.8 |
| RTR | 1.5 | 1.2 | 11.9 | 8.5 | 30.0 | 45.0 |
| RTC | 0.7 | 0.6 | 2.9 | 3.4 | 24.5 | 2.8 |
| RHL | 0.7 | 0.5 | 1.4 | 1.3 | 17.0 | 2.8 |
| RHR | 0.7 | 0.5 | 2.9 | 2.6 | 20.0 | 18.8 |
| RHC | 0.5 | 0.4 | 1.8 | 1.9 | 3.0 | 2.6 |
| TR | 2.2 | 2.1 | 15.0 | 13.9 | 77.0 | 10.7 |
| TL | 3.0 | 1.8 | 4.6 | 4.8 | 4.2 | 71.9 |

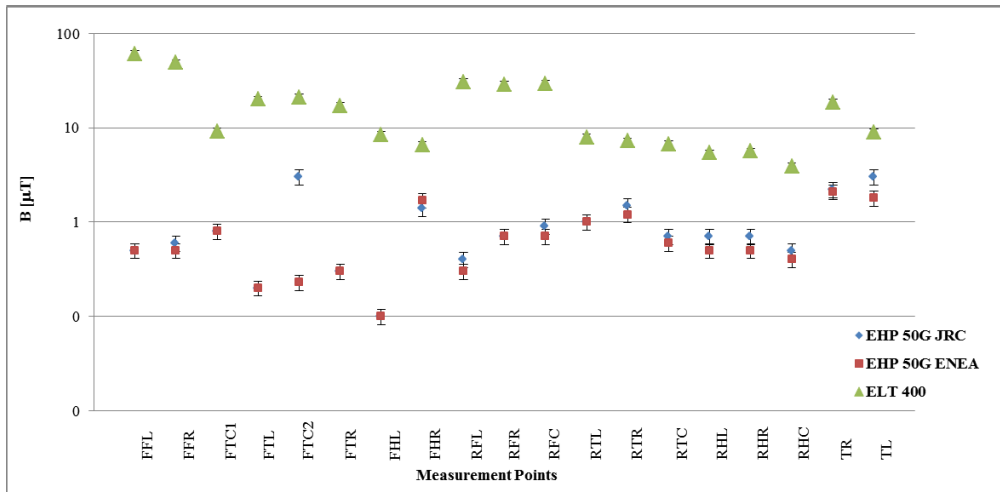


Figura 10: Valori di campo B misurati con i due EHP 50G e l'ELT 400 (per quest'ultimo sono stati riportati solo i dati misurati dopo l'ultima rampa per un confronto sui valori massimi misurati)

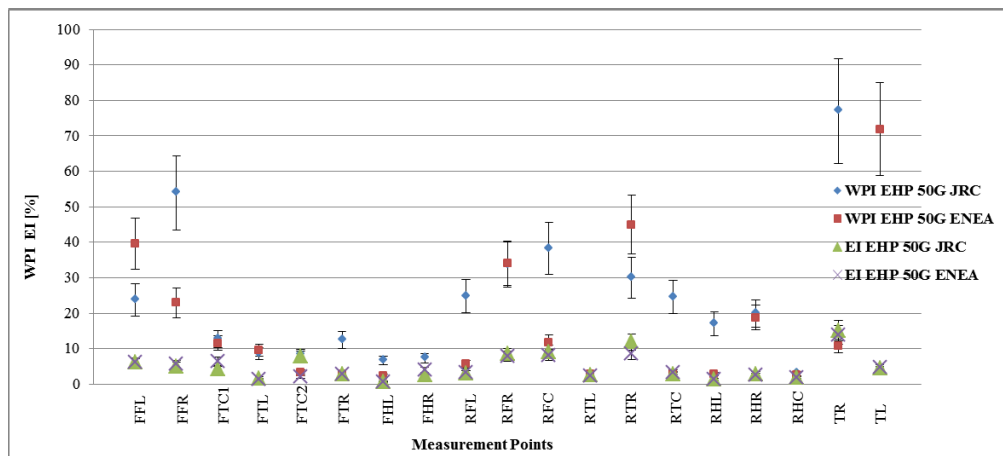


Figura 11: Valori degli IE e degli IPP misurati con i due EHP 50G

- Dai valori presentati in Tabella 15, si evince e si conferma che i valori di campo B dipendono dall'accelerazione del veicolo, in particolare che aumentano all'aumentare di quest'ultima;
- La Figura 10 conferma che, per lo scenario di esposizione rappresentato dai veicoli elettrici, l'analisi spettrale eseguita dall'EHP 50G non fornisce dati affidabili. Infatti tutti i valori massimi di campo B misurati con l'EHP 50G, seppur in accordo tra i due strumenti impiegati, sono sempre molto inferiori ai valori misurati con l'ELT 400;
- Questo dato è confermato anche dall'analisi della Figura 11 in cui i valori degli IE (provenienti dall'analisi spettrale eseguita dallo strumento) sono piuttosto in accordo tra di loro, ma differiscono notevolmente dai valori degli IPP, di cui rappresentano, nella grande maggioranza dei casi, una sottostima. Quest'ultimo aspetto contraddice quanto invece è noto della diversità dei metodi che conducono alla valutazione degli IE e degli IPP, da cui discende che, in realtà, gli IE rappresentano una metrica conservativa (a volte anche troppo) rispetto agli IPP;
- A differenza dei risultati ottenuti con VE#1, in questo caso la riproducibilità dei dati ottenuti con i due EHP 50G è stata confermata in una misura minore. Questo è dovuto al fatto che il VE#2 è un veicolo molto più performante del VE#1 ed ha un pedale dell'acceleratore molto più sensibile (vedi Tabella 12), per questo motivo è stato più difficile ripetere nello stesso modo i cicli di guida che sono stati necessari a eseguire tutte le misure. Questo è molto evidente nelle misure eseguite nel bagagliaio (Tabella 16); infatti le misure degli IPP in TR JRC (77.0%) e TL ENEA (72 %) sono state eseguite durante lo stesso ciclo di guida, così come le misure degli IPP in TL JRC (4.2 %) e TR ENEA

(10.7%) sono state eseguite durante un altro ciclo di guida: è evidente che durante il primo ciclo di guida un'accelerazione o decelerazione più marcata ha prodotto quei valori così alti;

- Gran parte dell'analisi degli indici viene fatta off line elaborando i files salvati durante le misure: per risparmiare tempo si era pensato di eseguire una prima scansione dei punti di misura con l'ELT 400 da cui derivare la misura del campo B al fine di identificare il punto di esposizione peggiore dove poi eseguire le analisi di conformità con gli indici, ma dal confronto dei dati in Tabella 15 e in Tabella 16 si vede come questo non sia possibile.

2.4.3 Procedura di misura per i veicoli elettrici e conclusioni

Anche in questo caso le campagne di misura descritte hanno fornito una serie di informazioni utili alla stesura di un protocollo di misura finalizzato alla valutazione dell'esposizione ai campi di induzione magnetica per i veicoli elettrici in condizioni di riferimento, vale a dire quando si ha a disposizione, se non una camera semi-anechoica e un apparato come VeLA9, almeno un banco a rulli. Il protocollo comprende i seguenti passi:

- La strumentazione utilizzata deve essere munita di sensori isotropi, di dimensione contenuta, di banda compresa fra 1 Hz e qualche centinaio di kHz. Le impostazioni dello strumento devono essere scelte in base alle caratteristiche della sorgente considerata e soprattutto delle componenti frequenziali in gioco. Questi strumenti devono essere in grado di poter misurare non solo il campo B, ma anche valutare degli indici di esposizione previsti dalla Raccomandazione Europea [3] e dagli organismi internazionali [7], nel caso specifico l'IE e l'IPP;
- Identificare una serie di punti identificativi della posizione dei passeggeri del veicolo e alcuni punti che possono essere sede dei cavi utilizzati per la trasmissione della corrente fra le varie parti del veicolo (in genere la parte centrale e la plancia dell'auto) e segnarli in modo da poter garantire la riproducibilità del posizionamento del sensore;
- Definire un ciclo di guida di test da eseguire durante tutte le misure e che comprenda diverse velocità e accelerazioni. In questo caso abbiamo avuto la possibilità di arrivare fino a 120 km/h, ma se si ha a disposizione un banco a rulli meno performante si può arrivare alla velocità massima consentita;
- Effettuare misure di campo B a larga banda e misura degli indici IE e IPP per l'identificazione del caso peggiore;
- Nel caso di superamento è necessario provvedere a delle valutazioni dosimetriche.

Questa campagna di misure ci ha permesso di evidenziare come la scelta di utilizzare un banco a rulli per la definizione di un ciclo di guida da utilizzare durante tutti i test può essere di grande aiuto per aumentare la riproducibilità delle misure, si sono però evidenziate altre criticità molto importanti che è necessario considerare.

Sebbene in molti esempi di letteratura il campo B sia molto utilizzato per descrivere l'esposizione ai campi presenti all'interno di un veicolo elettrico, abbiamo evidenziato come questo non rappresenti una metrica adeguata in questo scenario che vede la presenza di campi di tipo impulsivo e, in genere, non sinusoidale. In questo caso, l'indice di esposizione e l'indice di picco ponderato sono in grado di fornire delle informazioni più accurate in merito all'esposizione ai campi magnetici. Purtroppo, la conoscenza di come i sensori impiegati elaborano il segnale per ottenere gli indici è necessario al fine di ottenere una valutazione dell'esposizione che sia affidabile. Infatti, le campagne di misura descritte hanno permesso di stabilire che, in questo scenario, gli indici di esposizione ottenuti con l'EHP 50G non sono molto affidabili, perché provengono da un'analisi spettrale che non riesce a descrivere con sufficiente accuratezza lo spettro del segnale misurato. Sono molto più affidabili le misure di indice di picco ponderato, in quanto è una valutazione fatta direttamente nel tempo, su tutta la banda del sensore e senza passare dall'analisi spettrale.

Abbiamo visto come, nel caso di veicoli molto performanti, la riproducibilità delle misure diminuisce drasticamente a causa dell'elevata sensibilità dell'acceleratore. Inoltre sarebbe interessante eseguire test con altri cicli di guida, quali ad esempio il World Wide Harmonized Test Procedure oppure durante l'accelerazione massima possibile del veicolo.

2.5 Sistemi di ricarica senza contatto (Wireless Power Transfer, WPT)

In questo ultimo anno i gruppi di lavoro internazionali WG9 e PT63184 del sottocomitato TC106 della IEC, di cui uno dei membri è un collega ENEA e uno degli ospiti invitati in qualità di esperto è uno dei ricercatori di SSPT TECS, hanno elaborato un Publicly Available Specification (PAS) che sarà presumibilmente disponibile da aprile 2021 dal titolo 'Assessment methods of the human exposure to electric and magnetic fields from wireless power transfer systems - Models, instrumentation, measurement and numerical methods and procedures (Frequency range of 1 kHz to 30 MHz), in cui vengono descritte le metodologie di base per la valutazione degli effetti diretti e indiretti dell'esposizione ai sistemi di ricarica senza contatto e alcuni casi studio.

Questo documento presenta già una procedura per la valutazione dell'esposizione ai campi magnetici, elettrici ed elettromagnetici emessi dai sistemi WPT, che non è ancora uno standard, ma rappresenta sicuramente un passo avanti dell'IEC nella sua definizione.

Per il WPT applicato ai veicoli elettrici già esiste uno standard [17] elaborato dal TC 69, ma, dato il continuo evolversi di questa tecnologia e date le molteplici applicazioni che avrà nel prossimo futuro, il sottocomitato TC 106 (Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure), che si occupa di preparare gli standard sui metodi di misura e calcolo per la valutazione dell'esposizione umana ai campi elettrici, magnetici e elettromagnetici, ha deciso di occuparsene.

L'obiettivo di questo documento è specificare quali siano i metodi di valutazione della conformità dei sistemi WPT stazionari e dinamici ai limiti fissati dalle linee guida internazionali nell'intervallo di frequenza compreso fra 1 Hz e 30 MHz.

In generale la procedura di valutazione comprende i seguenti passi:

- Identificazione delle caratteristiche dell'oggetto in esame (potenza, corrente, frequenza, altro);
- Determinazione della posizione e della postura dell'utente;
- Determinazione del set di limiti a cui fare riferimento;
- Valutazione della conformità in merito agli effetti diretti (effetti biologici che sono conseguenza diretta dell'interazione dei campi elettromagnetici con le strutture biologiche, vale a dire induzione di correnti di stimolazione fino a 10 MHz, riscaldamento da 100 kHz a 30 MHz);
- Eventuale valutazione di conformità in merito agli effetti indiretti (effetti biologici che sono conseguenza dell'interazione indiretta dei campi elettromagnetici con le strutture biologiche, quali ad esempio micro-shock legati alle correnti di contatto).

2.5.1 Valutazione della conformità in merito agli effetti diretti

Può essere fatta sia in riferimento alle restrizioni di base (densità di corrente indotta e specific absorption rate, SAR, in [3]) che in riferimento ai limiti di esposizione (campo elettrico, campo magnetico, campo induzione magnetica).

Nel PAS sono indicati quattro approcci che possono essere indifferentemente utilizzati per la valutazione di conformità con le restrizioni di base e/o i limiti di riferimento, la scelta dell'approccio più praticabile dipende dallo scenario di esposizione.

2.5.1.1 Valutazione dell'esposizione basata sul valore delle correnti delle bobine

È il metodo più semplice: passa dalla valutazione della massima corrente delle bobine permessa (I_{lim}) fatta a partire dalla misura del campo B di una bobina circolare a una distanza fissa pari a 1 m e facendo il confronto con il livello di riferimento B_{lim} . Per una bobina circolare di raggio r, I_{lim} può essere calcolata con la seguente formula:

$$I_{lim} = \frac{2\pi d_0 B_{lim}}{\mu_0 n} e^{\frac{r_0}{r}}$$

Dove r è il raggio della bobina (> 50 mm), d_0 è la distanza fissa di 10 mm a cui il campo B è confrontato con B_{lim} , B_{lim} è il livello di riferimento alla frequenza di lavoro, μ_0 è la permeabilità magnetica nel vuoto, n è il numero di avvolgimenti della bobina, r_0 è una costante pari a 21.5 mm.

Ha una approssimazione migliore di 0.25 dB per il limite sul raggio della bobina fornito, è conservativa per qualsiasi forma della bobina se r è posto all'infinito.

2.5.1.2 Valutazione dei campi incidenti in riferimento ai livelli di riferimento

Si devono misurare e/o calcolare sia il campo E e il campo B a diverse distanze dall'oggetto da valutare e nelle direzioni dove l'oggetto può operare in prossimità di persone. Quando il campo è uniforme si possono confrontare i valori misurati e/o calcolati con i livelli di riferimento, se il campo non è uniforme i campi devono essere mediati nelle regioni occupate dal corpo.

2.5.1.3 Valutazione dei campi incidenti in riferimento ai limiti di base

I livelli di riferimento del campo elettrico, magnetico e elettromagnetico sono derivati dalle condizioni di massimo accoppiamento tra i campi e il corpo umano, vale a dire dalle quantità massime indotte nel corpo umano esposto a un campo uniforme. Nel caso di esposizione a campo vicino, come nel caso dei sistemi WPT, queste valutazioni possono essere molto conservative: per evitare delle sovrastime si possono applicare dei fattori di accoppiamento

$$QoI = k \times F$$

Dove QoI è la quantità di interesse da confrontare coi limiti di base, k è un generico fattore di accoppiamento che deriva dalla geometria delle bobine e dalle distanze dalla sorgente oppure da un modello di sorgente generica di gradiente di campo F che viene misurato nel punto occupato dall'utente.

Nel primo caso il fattore di accoppiamento k viene calcolato a partire dall'analisi degli scenari di esposizione localizzata, nel secondo caso viene utilizzato un metodo proposto in [18], per mitigare la sovrastima delle valutazioni di campo magnetico incidente, in scenari caratterizzati da grandi gradienti spaziali di campo, come nel caso dei sistemi WPT.

2.5.1.4 Valutazione diretta dei campi elettrici o delle densità di corrente e/o del SAR indotti in riferimento ai limiti di base.

A questo scopo si possono utilizzare le metodiche di dosimetria sperimentale per la misurazione diretta del SAR all'interno di opportuni fantocci e le metodiche di calcolo numerico per il calcolo del campo E, della densità di corrente e/o del SAR indotti dall'esposizione utilizzando modelli anatomici umani o metodi analitici.

2.5.2 Valutazione della conformità in merito agli effetti indiretti

In questo documento ci si occupa solo delle correnti di contatto che possono essere valutate o a partire dalle misure dei campi elettromagnetici incidenti o per mezzo di misure dirette. Queste ultime devono essere eseguite sia in condizioni cosiddette 'grounded' e 'ungrounded' vale a dire che i supporti metallici sopra ai quali devono essere fatte le misure devono essere collegati a terra (grounded) e non collegati a terra (ungrounded).

Il documento procede con la definizione dei metodi di misura, dei metodi di calcolo, dei metodi che vedono la combinazione delle metodologie numeriche e sperimentali e la valutazione dell'incertezza.

Infine, nell'Annex I sono presentati alcuni casi studio per la valutazione dell'esposizione a diversi sistemi WPT (utilizzati ad esempio per la ricarica di veicoli elettrici e droni), in riferimento ai limiti stabiliti dalle linee guida.

Come detto, questo documento, pur non essendo uno standard, presenta già molte informazioni e indicazioni utili riguardanti le possibili procedure di misura e calcolo per la valutazione di conformità dei sistemi WPT.

2.6 Dimensionamento delle bobine di accoppiamento e del circuito di compensazione per il V2H

Lo schema complessivo di un sistema WPT è mostrato in Figura 12.

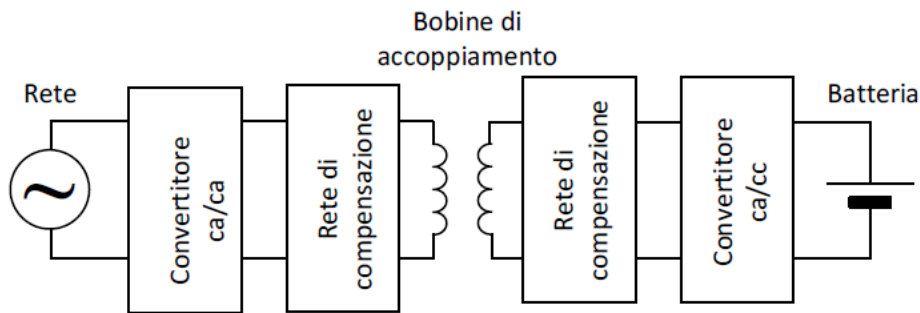


Figura 12: Schema complessivo di un sistema WPT

Il trasferimento di energia tra il sistema primario (alimentato dalla rete) e il sistema secondario (che, nel nostro caso, carica la batteria di un veicolo elettrico) avviene grazie all'induzione di tensione prodotta da campi magnetici variabili generati da bobine di accoppiamento. Affinché l'induzione avvenga, è necessario che la bobina a terra sia alimentata da una corrente alternata, in questo modo si induce una tensione ai capi dell'altra bobina che ha la stessa frequenza della corrente di alimentazione della bobina a terra. È possibile dimostrare che l'efficienza del trasferimento di potenza tra le due bobine aumenta all'aumentare della frequenza, per questo motivo la bobina di terra è collegata alla rete (frequenza operativa 50 Hz) attraverso un convertitore statico ca/ca, in grado di fornire alla bobina di terra una corrente con frequenza molto più elevata della frequenza di rete. Come detto, la corrente indotta nella bobina ricevente ha la stessa frequenza della corrente della bobina trasmittente, d'altro canto la batteria deve essere caricata con corrente continua: per questo motivo è necessario inserire un convertitore ca/cc tra la bobina a bordo e la batteria.

Per compensare in tutto o in parte la reattanza delle bobine di accoppiamento si inseriscono tra le bobine e i convertitori statici le cosiddette reti di compensazione, costituiti da circuiti passivi formati da elementi reattivi. Sono state studiate numerose topologie di reti di compensazione, progettate per scopi diversi: tra le topologie più semplici di reti di compensazione ci sono quelle serie e parallelo, che prevedono l'inserimento di un solo condensatore, connesso in serie oppure in parallelo alla relativa bobina e dimensionato per risuonare con l'induttanza della bobina stessa alla frequenza di alimentazione delle bobine, che in questo caso è stata scelta pari a 85 kHz, in ottemperanza con la "Recommended Practice" J2954 pubblicata dalla Society of Automotive Engineers (SAE) riguardo i caricabatteria wireless [19].

Data l'intrinseca simmetria del fenomeno dell'induzione magnetica, è possibile attuare un trasferimento di potenza anche in senso inverso, alimentando con corrente alternata la bobina a bordo del veicolo e collegando un carico alla bobina a terra. Questo è quanto succede con il sistema V2H progettato in collaborazione con l'Università di Padova.

Durante la prima annualità, l'Università di Padova ha eseguito un primo dimensionamento di tutto il sistema arrivando a uno schema del tipo mostrato in Figura 13 per il sistema V2H, per il quale è stato fatto il dimensionamento di tutte le potenze in gioco a partire dalla potenza di rete disponibile (3,3 kW) e dalle caratteristiche della batteria da ricaricare[20].

In Tabella 17 sono mostrati i valori delle potenze in gioco: $P_{i,N}$ è la potenza che viene presa (fase di carica) o fornita (fase di scarica) alla rete, $P_{IAF,N}$ è la potenza in uscita (fase di carica) o in ingresso (fase di scarica) al sistema costituito dal raddrizzatore attivo (RA) e dall'invertitore ad alta frequenza (IAF), $P_{RAF,N}$ è la potenza in ingresso (fase di carica) o in uscita (fase di scarica) al sistema costituito dal raddrizzatore ad alta frequenza (RAF) e dal convertitore cc/cc, $P_{o,N}$ è la potenza diretta alla batteria (fase di carica) o in uscita da essa (fase di scarica).

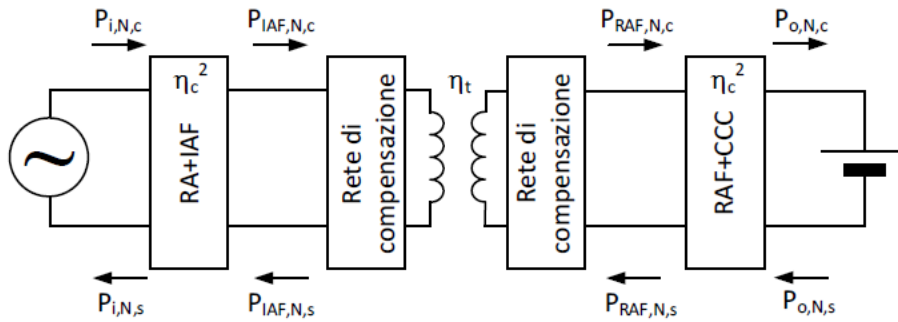


Figura 13: Schema del sistema V2H e potenze scambiate tra le diverse sezioni

Tabella 17: Potenze scambiate fra le diverse sezioni del sistema V2H durante la fase di carica e scarica

| | Rete | RA+IAF | RAF+CCC | Batteria |
|----------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Carica | $P_{i,N,c} = 3.3 \text{ kW}$ | $P_{IAF,N,c} = 3.17 \text{ kW}$ | $P_{RAF,N,c} = 2.92 \text{ kW}$ | $P_{o,N,c} = 2.80 \text{ kW}$ |
| Scarica | $P_{i,N,s} = 3.3 \text{ kW}$ | $P_{IAF,N,s} = 3.43 \text{ kW}$ | $P_{RAF,N,s} = 3.73 \text{ kW}$ | $P_{o,N,s} = 3.88 \text{ kW}$ |

Per quanto riguarda le reti di compensazione l’Università di Padova ha stabilito di impiegare delle reti di compensazione di tipo risonante serie, date le esperienze pregresse e data la necessità di avere un comportamento simmetrico sistema V2H per entrambe le direzioni del flusso di potenza (vedi Figura 14).

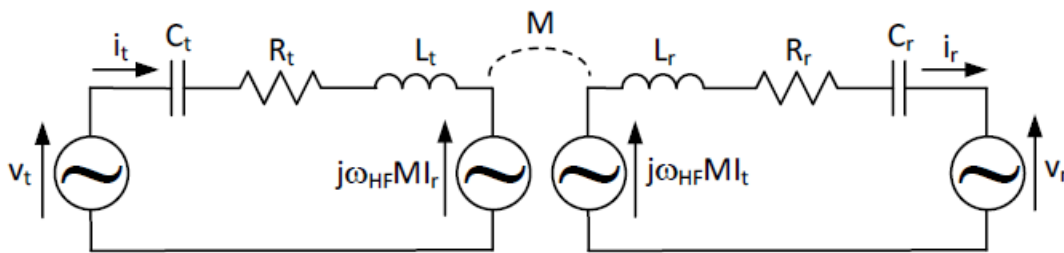


Figura 14: Schema di principio delle reti di compensazione e del sistema di bobine

Le resistenze R_t e R_r rappresentano le reistenze delle bobine di accoppiamento, le induttanze L_t e L_r sono le induttanze delle bobine di accoppiamento C_t e C_r sono le capacità dimensionate in modo tale da mandare il sistema in risonanza alla frequenza di 85 kHz.

Questo tipo di compensazione ha diversi effetti:

- forza la corrente nelle bobine ad assumere una forma d’onda praticamente sinusoidale cosicché anche le tensioni indotte risultano sinusoidali;
- viene annullata la caduta di tensione reattiva presente ai capi della serie formata dalla induttanza della bobina e dalla capacità risonante e di conseguenza le tensioni indotte ai capi delle bobine risultano idealmente uguali alla componente fondamentale delle tensioni presenti alla uscita dello IAF e del RAF, indicate con v_t e v_r ;
- le correnti i_t e i_r risultano rispettivamente in fase con tali tensioni indipendentemente dal carico equivalente e dalla direzione del flusso di potenza.
- è possibile semplificare la schematizzazione del sistema V2H rappresentando le tensioni all’uscita del IAF e all’ingresso del RAF mediante due generatori di tensione sinusoidale e usando due ulteriori generatori per rappresentare le tensioni indotte sulle bobine.

L’Univesità di Padova ha fornito le specifiche di progetto del sistema in termini di mutua induttanza M e di correnti che scorrono nella rete di compensazione nelle due fasi di carica e scarica [20].

M deve essere pari a 22.5 μT e la corrente massima è pari a 53.5 A. Questi sono i parametri più vincolanti, in quanto la corrente massima definisce la tipologia di filo di Litz da utilizzare senza danni al sistema e la mutua induttanza non deve superare il valore massimo previsto, perchè altrimenti la forza contro

elettromotrice indotta sarebbe troppo alta per potere lavorare alla massima corrente. Per M è stata definita una tolleranza massima del $\pm 10\%$. L'induttanza delle bobine non è un problema in quanto viene compensata dalla rete di compensazione, pertanto su quella c'è una maggiore libertà di manovra. Un altro vincolo è imposto dalla classificazione dei sistemi WPT fatta in [19] sulla distanza tra le bobine. In realtà questa classificazione è stata fatta secondo due parametri: la massima potenza apparente assorbita da rete e la distanza (D) tra il suolo e il punto più basso della bobina installata a bordo Figura 15.

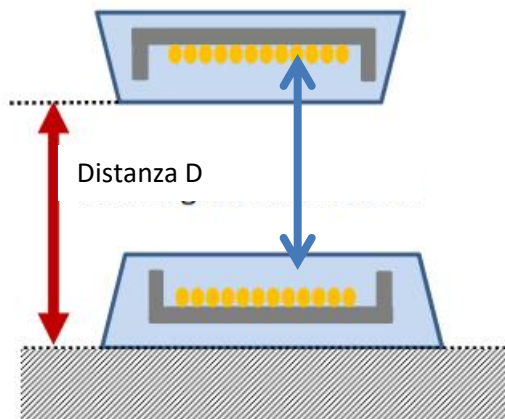


Figura 15: Definizione della distanza D in accordo con [19] e della distanza d

In [19] sono definite quattro classi di potenza denominate rispettivamente WPT1, WPT2, WPT3 e WPT4 alle quali corrispondono i valori massimi di potenza apparente di 3.7 kVA, 7.7 kVA, 11.1 kVA e 22 kVA. Le tre classi relative alla distanza da terra della bobina a bordo sono denominate Z1, Z2, Z3 e corrispondono a distanze comprese negli intervalli 100 mm-150 mm, 140 mm-210 mm e 170 mm-250 mm.

Il sistema V2H progettato ricade nella classe di potenza WPT1. Per quanto riguarda la classe relativa alla distanza D si è scelta la classe Z2 per permettere un uso realistico del veicolo in tutte le condizioni operative.

Il progetto delle bobine è stato fatto per mezzo del solutore FEM del codice di calcolo commerciale CST Microwave Studio (versione 2020). Per facilitare la progettazione della geometria del sistema si è definita la distanza d pari alla distanza tra le bobine.

2.6.1 Dimensionamento del filo di Litz e determinazione della distanza d

Come detto, il filo di Litz deve essere dimensionato in modo tale da poter sostenere una corrente pari a 53.5 A che è la corrente massima che scorre all'interno del sistema.

Come è noto, il filo di Litz è costituito da numerosi fili di rame isolati tra loro mediante smaltatura. Il diametro del singolo filo dipende dalla frequenza di lavoro: ad 85 kHz la sezione del filo deve essere almeno pari a 38 AWG (American Wire Gauge), che corrisponde a un diametro di 0.101 mm.

Il numero di fili da cui deve essere costituito il filo finale dipende dalla corrente massima che deve trasportare e dalle caratteristiche di realizzazione: la massima densità di corrente possibile all'interno di un filo di rame è pari a 4 A/mm^2 , ne consegue che per un singolo filo, avente sezione pari a 38 AWG, la massima corrente possibile sia pari a 0.0314 A, il numero di fili necessario per il passaggio di 53.5 A è quindi pari circa a 1700. Per avere una margine di flessibilità si è pertanto deciso di utilizzare un Filo di Litz del tipo 0.101 x 2000, dove il primo termine indica il diametro del singolo filo (38 AWG = 0.101 mm) e il secondo termine indica il numero di fili di cui è costituito.

Questo filo ha una sezione nominale di 15.708 mm^2 , pertanto lo spessore del filo di rame è pari a 4.472 mm. L'ingombro del filo è pari a 5.8008 mm, pertanto la distanza minima tra le spire di rame della bobina è pari a 1.33 mm.

Per quanto riguarda la distanza d si è tenuto conto di un contenitore del sistema bobine di altezza pari a 4 cm, pertanto si è prevista una variazione per d compresa fra 120 mm e 190 mm.

2.6.2 Progetto delle bobine di accoppiamento e loro ottimizzazione

Sono possibili diverse geometrie per le bobine di accoppiamento, quelle più utilizzate sono quelle quadrate e quelle a spirale per la facilità di realizzazione. Tutte le geometrie prevedono un core di ferrite per aumentare l'accoppiamento tra le bobine e diminuire l'intensità dei campi magnetici dispersi.

Le impostazioni del simulatore elettromagnetico sono state ottimizzate confrontando i dati di induttanza teorici di una bobina quadrata dalle seguenti caratteristiche:

- Numero di avvolgimenti pari a 20;
- Sezione del filo 4.472 mm;
- Spazio tra i fili 1.34 mm (il minimo possibile);
- Diametro esterno pari a 380 mm;
- Ferriti assenti.

In questo caso è stato possibile fare il confronto tra i valori di induttanza ottenuti sul sito https://www.circuits.dk/calculator_plana_coil_inductor.htm con quelli ottenuti variando nel codice di calcolo i seguenti parametri:

- Filo simulato con sezione circolare o sezione quadrata;
- Filo simulato come PEC (Perfect Electric Conductor) o come Rame;
- Maggiorazione del volume di calcolo rispetto a quanto stabilito dal calcolatore ponendo le condizioni al contorno come 'open'.

Il valore di induttanza ottenuto sul sito è compreso fra 132 μH e 142 μH a seconda del metodo utilizzato per il calcolo. La bobina simulata con i parametri seguenti:

- Sezione circolare;
- Filo di rame;
- Maggiorazione del volume di calcolo di default di 600 mm in tutte le direzioni

presenta un' induttanza pari a 135 μH , pertanto queste sono le impostazioni che sono state seguite per tutte le simulazioni successive.

Per quanto riguarda il core di ferrite, questo è stato simulato a partire dalle ferriti che abbiamo già utilizzato in passato, di forma quadrata e di dimensioni (100 x 100 x 6 mm³), la loro permeabilità magnetica è stata fissata pari a 2000.

Si è deciso anche di limitare le dimensioni esterne della bobina 400 x 400 mm², come buon compromesso fra le prestazioni del sistema e il suo peso. Infatti, aumentare molto la dimensione delle bobine avrebbe significato un aumento del peso a causa delle ferriti.

I primi tentativi di progetto sono stati fatti con delle bobine quadrate, ma, per quanto si variassero il numero di avvolgimenti e la distanza tra loro, i valori di mutua induttanza ottenuti erano sempre troppo elevati (> 35 μH) e al di fuori delle specifiche.

Ci si è spostati quindi sulla geometria circolare e si sono analizzate tre diversi tipi di bobine considerando 16, 14, 15 avvolgimenti. I parametri definiti qui di seguito sono rimasti identici: diametro esterno pari a 400 mm, spessore del filo 4,472 mm, spazio tra i fili pari a 2mm, mattonella unica di ferrite di dimensioni 400 x 400 x 6 mm³. La distanza d fra le bobine è stata fatta variare tra i 140 mm e i 190 mm con passi di 10 mm, dato che i 120 mm minimi previsti dalla catalogazione SAE in Z2 sono troppo pochi per l'auto che dovrà essere equipaggiata con questo sistema.

In Tabella 18 sono mostrati i risultati in termini di induttanza e mutua induttanza per i tre modelli al variare della distanza d. In rosso sono evidenziati i valori che appartengono all'intervallo di tolleranza per la mutua induttanza fissato pari a:

$$20 \mu\text{H} \leq M \leq 24 \mu\text{H}.$$

Dai risultati mostrati in Tabella 18 si è deciso di continuare a studiare la geometria con 14 avvolgimenti, in quanto è quella che garantisce la maggiore flessibilità per il parametro d.

Il passo successivo è stato il confronto con la ditta costruttrice del prototipo che si è detta in grado di soddisfare tutte le richieste tranne quella della distanza fra gli avvolgimenti di rame pari a 2 mm. Il minimo possibile per il costruttore era di 2 mm, ma considerando il filo con l'ingombro, pertanto con una distanza

effettiva fra gli avvolgimenti di rame pari a 3.33 mm. Tenuto conto di questo vincolo, si sono ripetute le simulazioni modificando la geometria e ottenendo i risultati di Tabella 19.

Tabella 18: Induttanze e Mutue induttanze fra le bobine di diversa geometria considerate

| d [mm] | 16 avvolgimenti | | 15 avvolgimenti | | 14 avvolgimenti | |
|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| | L [μH] | M [μH] | L [μH] | M [μH] | L [μH] | M [μH] |
| 140 | 129 | 37 | 122 | 35 | 115 | 33 |
| 150 | 128 | 33 | 122 | 31 | 114 | 29 |
| 160 | 128 | 30 | 121 | 28 | 113 | 26 |
| 170 | 126 | 27 | 120 | 25 | 113 | 24 |
| 180 | 127 | 24 | 120 | 23 | 113 | 22 |
| 190 | 126 | 22 | 120 | 21 | 112 | 20 |

Tabella 19: Induttanze e Mutue induttanze Resistenze e numero di celle di calcolo al variare della distanza fra le bobine che verranno realizzate

| d [mm] | 14 avvolgimenti | | | | # celle |
|-----------|-----------------|-------------|----------|--|---------|
| | L [μH] | M [μH] | R [Ω] | | |
| 140 | 115 | 32.8 | 0.3 | | 857049 |
| 150 | 114 | 29.4 | 0.3 | | 857359 |
| 160 | 114 | 26.4 | 0.3 | | 850680 |
| 170 | 113 | 23.8 | 0.3 | | 836338 |
| 180 | 113 | 21.5 | 0.3 | | 834326 |
| 190 | 113 | 19.5 | 0.3 | | 817145 |

Come si può vedere con le nuove specifiche la geometria fornisce ancora dei parametri accettabili, pertanto si è deciso di affidare il progetto alla ditta con queste specifiche. Il modello finale è mostrato in Figura 16.

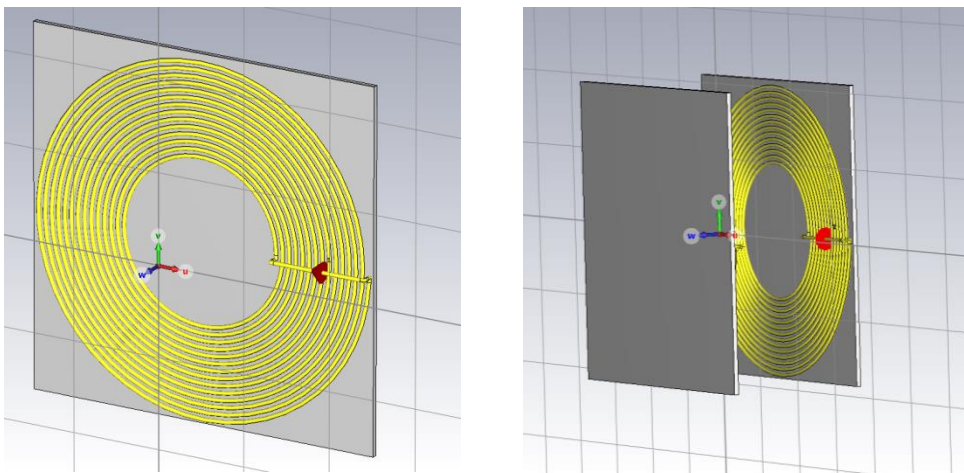


Figura 16: modello della versione finale della singola bobina e delle bobine accoppiate

In Tabella 19 sono indicati anche altri parametri quali la resistenza delle singole bobine (vedi circuito equivalente in Figura 14) e il numero di celle di mesh (tetraedri per il codice FEM considerato) di cui è costituito il modello.

Si è continuato a cercare di ottimizzare il modello infittendo il numero di celle di mesh nel gap di aria tra le bobine. A questo scopo si è realizzato un parallelepipedo di aria tra le bobine su cui è stato poi possibile infittire la mesh a piacere. Si sono fatti due tentativi: uno con mesh-step pari a 10 mm e l'altro con mesh-

step pari a 5 mm. Per questa finalità si sono utilizzati solo i modelli con d pari a 170, 180 e 190 mm (vedi Figura 17).

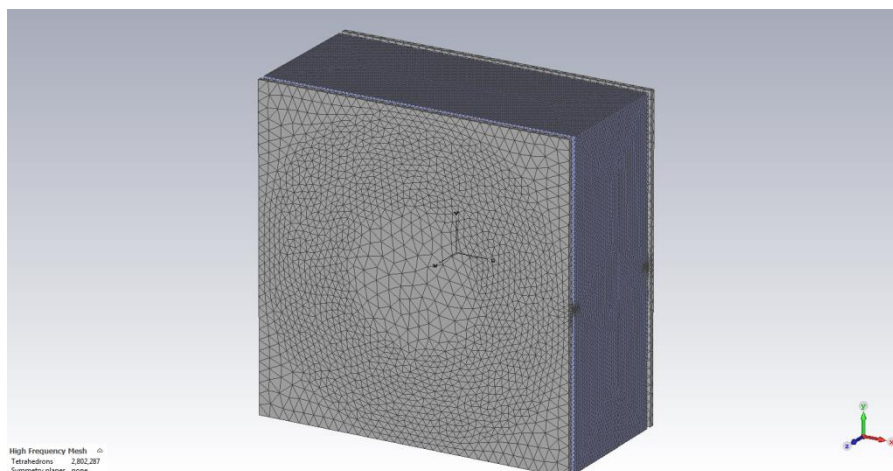


Figura 17: discretizzazione del volume occupato dalla coppia di bobine con gap di aria, utilizzato per infittire la discretizzazione del volume di calcolo tra le due bobine (mesh-step = 5 mm)

I risultati sono mostrati in Tabella 20

Tabella 20: Induttanza, mutua induttanza e numero di celle per il modello finale di bobina al variare della distanza d e del mesh-step

| d [mm] | Mesh-step = 10 mm | | | Mesh-step = 5 mm | | |
|-----------|-------------------|-----------|---------|------------------|-----------|---------|
| | L [μH] | M [μH] | # celle | L [μH] | M [μH] | # celle |
| 170 | 113 | 23.8 | 879475 | 113 | 23.8 | 2802287 |
| 180 | 112 | 21.5 | 896662 | 113 | 21.5 | 2939033 |
| 190 | 112 | 19.5 | 915497 | 112 | 19.5 | 3075377 |

Come si può vedere dal confronto tra la Tabella 19 e la Tabella 20 è evidente come l’infittimento del mesh tra le bobine non sortisce effetti macroscopici sui valori delle induttanze e delle mutue induttanze delle stesse. Consideriamo quindi come valido il modello ottenuto con mesh-step pari a 10 mm.

A questo punto è stato possibile progettare, almeno in via teorica le reti di di compensazione mostrate in Figura 14 per le bobine distanziate 170 mm e 180 mm.

$$R_t = R_r = 0.3 \Omega$$

$$L_t = L_r = 113 \mu T (d = 170 \text{ mm}) \text{ e } 112 \mu T (d = 180 \text{ mm})$$

$$M = 23.8 \mu T (d = 170 \text{ mm}) \text{ e } 21.5 \mu T (d = 180 \text{ mm})$$

$$C_r = C_t = 31.3 \text{ nF } (d = 170 \text{ mm}) \text{ e } 31.1 \text{ nF } (d = 180 \text{ mm}).$$

I valori di C_r e C_t sono stati ottenuti con la relazione

$$C_r = C_t = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{r/t}}$$

Che consente alle bobine di lavorare in condizioni di risonanza alla frequenza di 85 kHz.

In conclusione a partire dalle specifiche fornite dalla Università di Padova alla fine della scorsa annualità è stato possibile progettare il prototipo delle bobine ottimizzando il modello fino ad ottenere il progetto finale che è stato sottoposto a un’azienda artigiana per la sua realizzazione. Attraverso i parametri ottenuti con il calcolo è stato anche possibile dimensionare le reti di compensazione delle bobine.

3 Conclusioni

Durante questa annualità è stata portata a termine un'attività sperimentale finalizzata alla determinazione di procedure di misura per la valutazione dell'esposizione, in condizioni di riferimento, ai campi magnetici emessi dalle colonnine di ricarica ad alta potenza e presenti all'interno dei veicoli elettrici. Queste condizioni, per l'appunto, rappresentano scenari in cui la maggior parte dei parametri che possono influire sulla ripetibilità e riproducibilità del dato sperimentale possono essere controllati, pertanto sono distanti dagli scenari realistici di esposizione, ma offrono degli indubbi vantaggi nella messa a punto delle procedure di misura, in quanto permettono di focalizzare l'attenzione sulle problematiche che presenta lo scenario espositivo in esame.

In questo caso è stato possibile usufruire delle strutture presenti al JRC di Ispra e delle competenze dei suoi ricercatori. L'impianto VeLA9 al JRC è una camera semi anecoica di ampie dimensioni (21m x 15.6m x 8m) per valutazioni di compatibilità e immunità elettromagnetica di ogni tipo di veicolo. A parte le sue dimensioni ragguardevoli, l'altra particolarità di questa camera è che è equipaggiata di un banco a rulli per veicoli, completamente immune ai campi elettromagnetici e in grado di raggiungere velocità fino ai 120 km/h con accelerazione e frenata rigenerativa massime fino a 10 m/s². È stato inoltre possibile utilizzare diversi strumenti di misura di campo di induzione magnetica isotropi, in grado di fornire molteplici metriche per la definizione dell'esposizione. Tutto ciò ha permesso di fare confronti, riflessioni oltre che di individuare le criticità per la messa a punto di procedure in grado di fornire risultati quanto più confrontabili e rappresentativi degli scenari espositivi considerati.

Nel caso delle colonnine di ricarica (due stazioni diverse in grado di erogare una potenza di ricarica fino a 350 kW) abbiamo potuto vedere come un parametro fondamentale per il mantenimento nel tempo dello scenario espositivo peggiore (corrente massima di ricarica e quindi massimo campo B emesso) è lo stato di carica della batteria del veicolo. Infatti, quando lo stato di carica supera il 50%, ci sono dei sistemi di controllo dell'auto e della stazione di ricarica che diminuiscono progressivamente la corrente erogata, per non fare danni. Inoltre, le stazioni di ricarica possono essere molto diverse tra di loro in alcune caratteristiche di erogazione della potenza, pertanto è necessario conoscere quanto più possibile degli oggetti che si esaminano, per essere sicuri di considerare sempre il caso peggiore durante tutte le valutazioni che vengono eseguite. È stato possibile identificare un punto peggiore di emissione su una griglia pre-definita di punti di misura e determinare delle distanze di rispetto dalle stazioni esaminate, in base ai due indici indicati dalle normative attuali come metriche adeguate per la valutazione di conformità di scenari complessi di campo magnetico alle basse frequenze (fino a 100 kHz), che sono l'indice di esposizione e l'indice di picco ponderato. La necessità di usare questi indici invece che una semplice misura di campo B nasce dal fatto che in questo caso, come nel caso dei veicoli elettrici, si è in presenza di numerose sorgenti a diversa frequenza e di segnali impulsivi: il segnale misurato risultante presenta quindi molte componenti frequenziali che devono essere opportunamente pesate per una valutazione di conformità complessiva dello scenario di esposizione. È necessario notare che le distanze di rispetto sono state valutate con le stazioni di ricarica in esame operanti a una potenza pari a ¼ della massima potenza disponibile, pertanto in condizioni di massima carica è presumibile che queste distanze possano aumentare e che quindi per futuri scenari, dove più cabine e più auto possano essere utilizzati contemporaneamente sarà necessario progettare spazi e zone di rispetto adeguate per il soddisfacimento dei limiti di esposizione.

Nel caso dei veicoli elettrici, la disamina della letteratura fatta durante l'annualità precedente aveva evidenziato come i risultati ottenuti risultassero scarsamente confrontabili, a causa delle diversità nelle procedure, nella strumentazione e nelle metriche adottate. Non solo, ma a deteriorare ulteriormente la riproducibilità del dato sperimentale era il fatto che i veicoli fossero esaminati mentre erano in marcia su strada e quindi soggetti al traffico, alle differenze dei percorsi (urbano, extraurbano) e alle differenze di guida dei piloti. Quest'ultimo aspetto era stato definito il fattore umano e rappresentava un grosso problema per la riproducibilità e ripetibilità delle misure. In questo caso, la possibilità di utilizzare una struttura come VeLA9 è risultata certamente di aiuto. Infatti, la presenza di un banco a rulli ha permesso di utilizzare un ciclo di guida definito a priori e guidato sempre dallo stesso pilota per tutte le misure eseguite. In questo modo è stato possibile ridurre molto l'indeterminazione legata al percorso di guida e al pilota,

anche se abbiamo potuto verificare come, nel caso di auto molto performanti, mantenere il controllo del pedale dell'accelerazione e il controllo sul ciclo di guida sia risultato un po' più difficile rispetto alla situazione di un'auto di un'altra categoria. Nonostante ciò, abbiamo potuto fare una serie di considerazioni molto interessanti legate soprattutto alla adeguatezza della strumentazione impiegata e alle metriche di misura.

È però importante notare come in nessun caso e per nessuna delle metriche adottate siano state evidenziate delle non conformità negli scenari analizzati.

Grazie al contributo di un collega ENEA, rappresentante nazionale nel sottocomitato TC 106 dell'IEC è stato possibile avere notizie del risultato di una serie di riunioni tenutesi durante questa annualità dei gruppi di lavoro internazionali WG9 e PT63184 aventi lo scopo stilare uno standard per la valutazione degli effetti diretti e indiretti dell'esposizione ai sistemi di ricarica senza contatto. Durante la primavera del 2021 sarà pubblicato un Publicly Available Specification (PAS) dal titolo 'Assessment methods of the human exposure to electric and magnetic fields from wireless power transfer systems - Models, instrumentation, measurement and numerical methods and procedures (Frequency range of 1 kHz to 30 MHz), che non rappresenta uno standard, ma un primo passo nella sua definizione. In un capitolo di questo rapporto è stato descritto l'impianto di base di questo documento e descrittissima la procedura di valutazione proposta.

Un'altra attività importante ha riguardato la messa a punto del modello numerico ottimizzato per il sistema di bobine di accoppiamento che verrà utilizzato nel sistema V2H. Il modello è stato fatto a partire dalle specifiche fornite dall'Università di Padova alla fine della prima annualità e riguardanti i seguenti parametri: la mutua induttanza tra le bobine e le correnti massime circolanti nel circuito.

Dopo diversi tentativi con geometrie di vario tipo, è stata scelta una geometria a spirale con core di ferriti, il modello è stato ottimizzato in termini di numeri di spire e distanza tra gli avvolgimenti in modo tale da avere i parametri specificati con le tolleranze desiderate. Il modello è stato presentato ad una ditta artigiana per la sua realizzazione. Sono state inoltre dimensionate le reti di compensazione il cui scopo è di far operare le bobine di accoppiamento alla frequenza di risonanza di 85 kHz.

Durante la prossima annualità l'intenzione è di proseguire la collaborazione molto fruttuosa con il JRC, che ha visto in questa annualità la pubblicazione di due lavori [21, 22]. Vorremmo infatti ampliare la casistica di misura su veicoli elettrici e stazioni di ricarica, se le condizioni della pandemia permetteranno gli spostamenti.

Buona parte del lavoro verrà fatto però in Casaccia dove abbiamo intenzione di verificare la fattibilità della procedura di misura sui veicoli elettrici sul banco a rulli presente in Casaccia e poi eseguire misure su strada. Utilizzeremo di certo la Nissan Leaf in dotazione e se avremo l'opportunità di ampliare il numero di auto la coglieremo. Per quanto riguarda le stazioni di ricarica utilizzeremo quanto presente in Casaccia facendo dei confronti fra misure eseguite all'interno e all'esterno della camera anecoica disponibile nella divisione SSPT-TECS, per vedere se l'utilizzo di strutture così costose come una camera anecoica siano veramente necessarie per una valutazione dell'esposizione affidabile.

Per quanto riguarda il V2H si procederà alla realizzazione del prototipo finale, alle prime valutazioni di esposizione ai campi magnetici emessi e al confronto con il modello numerico per la messa a punto di un modello realistico da utilizzare per le valutazioni dosimetriche su un modello anatomico umano in programma.

4 Riferimenti bibliografici

1. R. Pinto, V. Lopresto, L. Ardoino, 'Campi elettromagnetici e e-mobility: introduzione alla tematica e stato dell'arte ' Rapporto tecnico nell'ambito del progetto 'Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali' dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità
2. 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
3. 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.

4. Legge 22 febbraio 2001 n. 36, “Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici”
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 ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz”, GU Serie Generale n.199 del 28-8-2003.
6. 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.
7. 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.
8. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines”, Health Phys, 84(3):383-7, 2003,
9. A. Vassilev, A. Ferber, C. Wehrmann, O. Pinaud, M. Schilling, A.R. Ruddle, “Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles”, IEEE Trans. Electromagn. Compat. 57:35–43, 2015, doi: 10.1109/TEM.2014.2359687.
10. R.A. Tell, G. Sias, J. Smith, J. Sahl, R. Kavet, “ELF magnetic fields in electric and gasoline-powered vehicles”, Bioelectromagnetics, 34(2):156-161, 2013, doi: 10.1002/bem.21730.
11. R. Hareuveny, M.N. Halgamuge, Y. Yaffe, Y. Tzabari, “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, 2015, doi: 10.3390/ijerph120201651.
12. R.A. Tell, R. Kavet, “Electric and Magnetic Fields < 100 kHz in Electric and Gasoline-powered Vehicles”, Radiat. Prot. Dosimetry, 172:541–546, 2016, doi: 10.1093/rpd/ncv533.
13. L Yang, M. Lu, J. Lin, C. Li, C. Zhang, Z. Lai, T. Wu, “Long-Term Monitoring of Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Electric Vehicles”, Int J Environ Res Public Health, Oct 7;16(19):3765, 2019, doi: 10.3390/ijerph16193765.
14. E. Karabetsos, E. Kalampaliki, D. Koutounidis, “Testing hybrid technology cars: Static and extremely low-frequency magnetic field measurements”, IEEE Veh. Technol. 9:34–39, 2014, doi: 10.1109/MVT.2014.2360651.
15. GB/T 37130-2018 "Measurement methods for electromagnetic fields of vehicle with regard to human exposure", China, December 2018
16. ETA HTP 09 "Measurement and Evaluation of Magnetic Fields (EMF) and Electromagnetic Radiation (EMI) generated by Hybrid Electric Vehicles
17. IEC 61980-1:2015, ‘Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements, Luglio 2015
18. I. Liorni, T. Lisewski , M.H. Capstick, S. Kuehn, E. Neufeld and N. Kuster, "Novel Method and Procedure for Evaluating Compliance of Sources With Strong Gradient Magnetic Fields Such as Wireless Power Transfer Systems," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, pp. 1-10, 2019
19. SAE “Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology J2954_201904” Recommended Practice SAE J2954, Aprile 2019.
20. M. Bertoluzzo, “V2H - Studio, progetto e sperimentazione di un sistema di ricarica wireless con funzionalità Vehicle to Home” Rapporto tecnico nell’ambito del progetto ‘Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali’ dell’Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità
21. G.Trentadue, R. Pinto, M. Zanni, H. Scholz, K. Pliakostathis, G. Martini , “Low frequency magnetic fields emitted by high-power charging systems” Energies, 13(7), 1594; 2020.
22. R. Pinto, G. Trentadue, M. Zanni, G. Martini, “Assessing Magnetic Fields in Electrified Vehicles: An Exploratory Campaign” SAE Technical Paper 2021-01-0152, 2021.