



Valutazione dell'esposizione ai CEM emessi in scenari espositivi realistici

Rosanna Pinto, Lucia Ardoino, Paolo d'Atanasio,
Alessandro Zambotti

VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE AI CEM EMESSI IN SCENARI ESPOSITIVI REALISTICI

R. Pinto, L. Ardoino, P. d'Atanasio, A. Zambotti

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità 2021

Obiettivo: *Tecnologie*

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

Work package: Mobilità

Linea di attività: LA2.12 Collaudo e valutazione economica del SWV2H - Valutazione dell'esposizione ai CEM emessi in scenari espositivi realistici

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini ENEA

Indice

| | |
|--|----|
| SOMMARIO..... | 3 |
| INTRODUZIONE..... | 5 |
| 1 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI..... | 7 |
| 1.1 IMPIANTO NORMATIVO | 7 |
| 1.2 AUTO ELETTRICHE..... | 8 |
| 1.2.1 <i>Materiali e metodi per le misure sui veicoli elettrici</i> | 10 |
| 1.2.2 <i>Risultati</i> | 16 |
| 1.3 STAZIONI DI RICARICA..... | 26 |
| 1.3.1 <i>Materiali e metodi di misura delle stazioni di ricarica</i> | 27 |
| 1.3.2 <i>Risultati</i> | 30 |
| 1.4 DOSIMETRIA DEI SISTEMI DI RICARICA WPT | 36 |
| 1.4.1 <i>Dosimetria del sistema V2H</i> | 36 |
| 1.4.2 <i>Dosimetria del sistema WPT dinamico ottimizzato</i> | 39 |
| 2 CONCLUSIONI..... | 41 |
| RINGRAZIAMENTI | 44 |
| 3 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 45 |

Sommario

Come previsto nel PTR del progetto, sono stati ultimati lavori relativi alla LA2.12 per quel che riguarda la valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici in scenari di esposizione realistici legati alla mobilità elettrica: le auto elettriche, le cabine di ricarica veloce e i sistemi di wireless power transfer.

Per quanto riguarda la valutazione dell'esposizione a campi magnetici presenti all'interno dei veicoli elettrici, l'esperienza dello scorso anno [1] ci ha fatto riconsiderare e successivamente escludere l'ipotesi di effettuare misure durante la marcia dell'auto su strada; infatti la numerosità dei punti di misura (legata a una descrizione puntuale di uno scenario espositivo caratterizzato da elevati gradienti di campo di induzione magnetica B), l'impossibilità ad eseguire cicli di misura riproducibili e quindi utili a una valutazione eseguita su più punti e soprattutto la difficoltà di simulare scenari espositivi peggiori, quali l'accelerazione improvvisa o la brusca frenata, in sicurezza per gli operatori, hanno fatto riflettere sull'opportunità e soprattutto l'utilità di fare questo genere di valutazioni su strada. Inoltre, le valutazioni dello scorso anno [1] avevano evidenziato una serie di criticità, su cui è stato necessario effettuare un approfondimento propedeutico a tutte le attività che ENEA vorrà portare avanti in futuro in questo ambito. Pertanto si è deciso di continuare a lavorare con i veicoli elettrici in movimento sui banchi a rulli presenti presso l'impianto VELA9 del JRC di Ispra [1] e del centro ENEA Casaccia e di acquisire un nuovo strumento di misura. In questo modo è stato possibile giungere a conclusioni utili per la definizione un protocollo di misura in grado di fornire le informazioni utili alla caratterizzazione dello scenario di esposizione, non solo per la protezione della popolazione in genere, ma anche per quella dei portatori di dispositivi medici impiantabili, soggetti a malfunzionamenti se in presenza di esposizione ai campi elettromagnetici superiori a determinati limiti.

Nel caso delle cabine di ricarica ci sono state una serie di difficoltà ad accedere a stazioni di ricarica sul territorio, legate alla situazione pandemica e legate soprattutto al contatto formale con i gestori delle stazioni per la concessione dei permessi. L'adeguamento della camera semianecoica presente nei laboratori SSPT-TECS della Casaccia ha reso tuttavia possibile eseguire valutazioni di esposizione per questo tipo di sorgenti all'interno dei nostri laboratori, pertanto il protocollo messo a punto in [1-3] è stato applicato per eseguire una valutazione di esposizione di una stazione di ricarica veloce [4] utilizzata per la sperimentazione all'interno del Centro. In questo modo è stato possibile confermare la validità del protocollo di misura nel caratterizzare l'esposizione a questo tipo di sorgenti a protezione anche dei portatori di dispositivi medici impiantabili e a verificarne la fattibilità per questo tipo di sorgenti anche all'interno dei nostri laboratori del CR Casaccia.

Per quanto riguarda i sistemi di wireless power transfer durante le scorse annualità [1,5] sono stati ottimizzati i modelli numerici di due sistemi: il sistema V2H [6] e il sistema per il WPT dinamico. Il primo

modello è stato validato con misure sperimentali di impedenza del sistema, eseguite sul prototipo consegnato in primavera [6], il secondo modello è stato validato per mezzo del confronto dei dati sperimentali con misure di campo B [5]. Su questi modelli ottimizzati sono state fatte delle valutazioni dosimetriche utilizzando un codice di calcolo per la simulazione elettromagnetica 3D.

I dati hanno confermato che, a fronte di un superamento dei livelli di riferimento stabiliti dalla Raccomandazione Europea sulla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz [7], i limiti di base, forniti in termini di grandezze dosimetriche e quindi interne al soggetto esposto, non vengono superati, assicurando così la conformità dell'esposizione.

Introduzione

Nel corso di questa terza e ultima annualità si sono completati i lavori relativi alla linea tematica LA2.12. Il progetto durante questa annualità prevedeva la valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici (CEM) emessi da varie sorgenti quali stazioni di ricarica, auto elettriche, sistemi WPT in condizioni di uso realistico. Purtroppo, le vicende legate alla pandemia e la contingentazione degli spazi, dei laboratori e del personale all'interno e all'esterno del centro hanno reso difficile mettere in atto le azioni per poter svolgere alcune questa attività, di fatto quasi interamente sperimentali. Purtroppo, alla fine della scorsa annualità ci si era resi conto che era necessario approfondire quanto fatto lo scorso anno con nuove campagne di misura con la finalità di risolvere, con ulteriori dati sperimentali alla mano, le criticità emerse dalle attività dello scorso anno [1]. Nello specifico:

- Per quanto riguarda i veicoli elettrici le criticità evidenziate erano diverse e nascevano soprattutto dalla strumentazione e dalle tre metriche (campo di induzione magnetica B, indice di esposizione e indice di picco ponderato) utilizzate per descrivere lo scenario di esposizione all'interno dei veicoli. Per cercare di chiarire le diverse questioni aperte, si è acquisito un nuovo sensore di campo magnetico isotropo in grado di misurare sia il campo B, con modalità diverse da quelle dello strumento utilizzato lo scorso anno, che l'indice di picco ponderato con modalità analoghe a quelle dell'altro strumento. Applicando il protocollo messo a punto in [1], sono state eseguite due campagne di misura: una all'impianto VELA 9 del JRC e una all'impianto del banco a rulli presente nei laboratori di TERIN-PSU-STMS. Quest'ultimo è un impianto molto meno costoso di VELA 9 e studiare la fattibilità del suo utilizzo per questo tipo di valutazioni è un passo importante nella definizione dei requisiti che deve avere un impianto da poter utilizzare per queste finalità.
- Per quanto riguarda le stazioni di ricarica ad alta potenza, abbiamo utilizzato la camera semi-anechoica presente nei laboratori SSPT-TECS della Casaccia, dopo un suo upgrade che l'ha resa adatta ad eseguire valutazioni di esposizione anche per questo tipo di sorgenti all'interno dei nostri laboratori. Per verificare la fattibilità dell'intero sistema di misura, abbiamo applicato il protocollo di misura messo a punto in [1-3] sulla stazione di ricarica veloce (EQC – 50 prodotta da Circutor in grado di ricaricare con potenze pari a 42 kW in DC), già analizzata con un altro protocollo nello scorso triennio [4].

Questo approfondimento è stato necessario e propedeutico a tutte le attività che in futuro si vorranno portare avanti in questo ambito in ENEA.

Il programma prevedeva inoltre valutazioni di esposizione dei sistemi di Wireless Power Transfer in condizioni realistiche a partire dai modelli numerici di sistemi WPT ottimizzati durante le scorse annualità [1, 2] ed eventualmente validati da dati sperimentali. Per quanto riguarda il sistema V2H

messo a punto alla fine di questa annualità sono fatte delle valutazioni preliminari di dosimetria numerica successive alla validazione del modello numerico ottimizzato tramite misure sperimentali di impedenza del sistema, eseguite sul prototipo consegnato in primavera [6]. Per quanto riguarda il sistema WPT dinamico [2], per una serie di ragioni tecniche non è stato possibile montare il sistema sull'auto per eseguire le misure nel caso realistico. Anche in questo caso sono state eseguite delle valutazioni dosimetriche utilizzando il modello ottimizzato e validato con misure sperimentali durante la prima annualità [5].

1 Descrizione delle attività svolte e risultati

1.1 Impianto normativo

L'impianto normativo e le metriche proposte per la valutazione dell'esposizione alle sorgenti in bassa frequenza sono state approfonditamente descritte in [1].

Brevemente, la protezione della popolazione dagli effetti acuti legati all'esposizione dei campi elettromagnetici è stata affrontata dall'Unione Europea nel 1999 con una Raccomandazione [7] 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 [8-10]. 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 [11], 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 di 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 [mT] |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 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 [11]: la valutazione di conformità viene fatta attraverso la valutazione spettrale del campo B e la valutazione di un indice di esposizione (IE), definito in [1], che tiene conto di tutte le componenti spettrali del segnale misurato, opportunamente pesate con i limiti di esposizione. Questo è un approccio conservativo che considera tutte le componenti spettrali del segnale misurato in fase tra di loro. Nel caso dei segnali multi-sorgente o complessi questa eventualità raramente accade, pertanto nel 2003 [12] ICNIRP ha introdotto un altro indice, denominato indice di picco ponderato (IPP) e definito in [1], che tiene conto anche delle fasi del segnale misurato e che pertanto fornisce una valutazione dell'esposizione più realistica nel caso di scenari espositivi complessi.

Come detto, se la conformità ai livelli di riferimento non è rispettata (in termini di campo B o di IE o di IPP) si rende necessario fare delle analisi dosimetriche, numeriche o sperimentali per l'accertamento della conformità ai limiti di base. I limiti di base sono dati in termini di grandezze fisiche "dosimetriche" (grandezze di base) proprie dell'interazione tra i campi e i sistemi biologici. Nella banda di frequenza in cui è allocata la frequenza di lavoro dei sistemi Wireless Power Transfer (WPT) destinati all'automotive l'interazione dei campi con il soggetto esposto si esplica nell'induzione di correnti; e in [11] si è definito come grandezza di base la densità di corrente J (A/m^2) indotta in situ. Ad 85 kHz il limite di base è impostato a $0.17 A/m^2$ (valore efficace, ovvero $0.24 A/m^2$ in termini di valore di picco). Mentre i livelli di riferimento possono essere superati, la conformità ai limiti di base deve essere sempre assicurata.

Per quanto riguarda i portatori di dispositivi medici si ritiene che questi funzionino correttamente, qualora non siano superati i livelli di esposizione stabiliti per la popolazione [7] (senza includere alcuna media temporale) quando impiantati e programmati conformemente alla buone pratiche mediche (approccio derivato da EN 45502-2-1), pertanto se le esposizioni ai campi magnetici sono conformi a quanto stabilito in [7] i portatori di dispositivi medici sono ritenuti protetti da qualsiasi malfunzionamento.

1.2 Auto elettriche

Durante la seconda annualità è [1] stato proposto un protocollo di misura per la valutazione dell'esposizione ai campi di induzione magnetica presenti all'interno dei veicoli elettrici in condizioni di riferimento, vale a dire quando si ha a disposizione almeno un banco a rulli su cui eseguire con il veicolo dei percorsi fissi e standardizzati, senza le problematiche legate alla guida su strada che inficiano in maniera

determinante la ripetibilità e la riproducibilità della valutazione. Il protocollo viene riportato in questo report per completezza:

- utilizzare strumentazione 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 [7] e dagli organismi internazionali [11-12], 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 locale è necessario effettuare la media sulle tre diverse posizioni (piedi, torace e testa) identificate per ogni passeggero in accordo a quanto stabilito in [13];
- se il superamento è confermato anche in questo caso è necessario provvedere a delle valutazioni dosimetriche.

Le valutazioni eseguite lo scorso anno hanno evidenziato anche una serie di criticità [1, 14] quali:

- la misura del campo di induzione magnetica B quale metrica esaustiva per la valutazione dell'esposizione all'interno dei veicoli elettrici;
- la non affidabilità degli IE calcolati con lo strumento EHP 50G a causa della scarsa capacità dello strumento di calcolare lo spettro per segnali di tipo impulsivo e in genere non sinusoidale;
- la necessità di effettuare le valutazioni delle misure di IPP con altra strumentazione;
- la ripetibilità delle misure nel caso di auto molto performanti;
- la possibilità di fare delle valutazioni con altri cicli di guida quale, ad esempio, la fase di massima accelerazione del veicolo;

- la possibilità di utilizzare set up meno dispendiosi di una camera semi anecoica, quale è VELA 9.

Inoltre, dopo le campagne di misura effettuate lo scorso anno abbiamo riflettuto molto se fosse utile, ai fini della valutazione dell'esposizione all'interno dei veicoli elettrici, ripetere quanto fatto sui banchi a rulli con prove su strada e ci sono stati alcuni elementi che hanno portato a escludere questa possibilità:

- dati gli elevati gradienti di campo magnetico all'interno del veicolo è necessario valutare molti punti di misura, questo comporta tempi lunghi da trascorre su strada per lo spostamento dei sensori all'interno del veicolo e per effettuare le misure;
- su strada è praticamente impossibile ottenere scenari riproducibili durante le misure nei punti definiti;
- all'interno del veicolo deve esserci un altro operatore, oltre il guidatore, per posizionare lo strumento, impostare lo strumento, acquisire i dati, inoltre l'operatore si deve spostare molte volte per fare spazio al sensore imponendo la necessità di molte fermate che e introducendo un ulteriore elemento di distrazione per il guidatore;
- su strada non è possibile valutare scenari peggiori di esposizione quali l'accelerazione improvvisa o la frenata brusca in condizioni di sicurezza per gli operatori.

Lo scopo delle attività di quest'ultima annualità è stato quindi quello di analizzare nuovi elementi che potessero aiutare a fare luce su almeno alcune delle criticità evidenziate lo scorso; per fare questo si è utilizzato un altro sensore da confrontare con l'EHP 50G e un banco a rulli di laboratorio presente all'interno del centro Casaccia. E' stato possibile, inoltre, accedere di nuovo ai laboratori di VELA 9 del JRC di Ispra per le misure su un nuovo veicolo.

1.2.1 Materiali e metodi per le misure sui veicoli elettrici

In Tabella 2 sono presentate le caratteristiche delle sessioni di misura eseguite sui due veicoli elettrici valutati in questa annualità.

VE#1 è un SUV di elevate prestazioni, VE#2 è un veicolo piuttosto diffuso sul mercato e con prestazioni decisamente inferiori a VE#1.

Tabella 2: Caratteristiche delle sessioni di misura

| Veicolo | Capacità della batteria [kWh] | Potenza del motore [kW] | Tempo 0-100 km/h [s] | Laboratorio | Strumentazione |
|---------|-------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------|--|
| VE#1 | 76 | 198 | 3.7 | JRC | EHP 50G JRC EHP 50G ENEA ELT 400 sonda 10 cm ² ELT 400 sonda 3 cm ² |
| VE#2 | 50 | 80 | 11.9 | Casaccia | EHP50G ENEA ELT 400 sonda 10 cm ² ELT 400 sonda 3 cm ² |

L’impianto VELA 9 è una camera semi anecoica (21 x 15.6 x 8 m³, Figura 1) realizzata per valutazioni di compatibilità e immunità elettromagnetica di ogni tipo di veicolo nell’intervallo di frequenze 14 kHz – 18 GHz. È equipaggiata di un banco a rulli per veicoli, posizionato su una tavola rotante a 360° di diametro pari a 11 m, 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 inoltre possibile impostare il ciclo di marcia ed eseguirlo con pilota alla guida assistito dal programma di aiuto alla guida Driver Aid.

L’impianto presente nel laboratorio TERIN-PSU-STMS è un banco a rulli (Figura 2) su cui sono possibili prove di vetture a due ruote motrici sia a trazione anteriore che posteriore. La velocità massima è pari a 120 km/h, la massa ammissibile della vettura in prova da 800 kg a 3500 kg, la potenza massima frenata dalla dinamo 120 kW e la coppia massima erogabile dalla dinamo 1000 Nm.

Anche questo impianto ha un sistema per assistere il pilota alla guida a eseguire un ciclo di guida preimpostato.



Figura 1: VE#1 all’interno dell’impianto VELA9



Figura 2: VE#2 all'interno del laboratorio contenente il banco a rulli dell'ENEA

Per le misure sono stati utilizzati quattro strumenti.

I primi due sono gli EHP 50G di ENEA e JRC. L'EHP50G (Narda Safety Test Solutions, Cisano sul Nave, Savona, Italia, Figura 3) è dotato di una sonda isotropica ($92 \times 92 \times 109 \text{ mm}^3$) 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:

- 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;
- un valore dell'IE secondo i livelli di riferimento riportati in Tabella 1, all'interno dello span selezionato ed espresso in percentuale nel tempo;
- 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.

La loro incertezza espansa (con fattore di copertura pari a 2, per un livello di confidenza pari al 95%) è pari al 19.2% (JRC) e 18.3% (ENEA).

Per tutte le campagne di misura le impostazioni sull'EHP50G sono state le seguenti:

- Span compreso fra 25 Hz e 2 kHz per la misura di campo B massimo e la misura di IE massimo (quest'ultima fatta in accordo con i livelli di riferimento definiti per la popolazione in [3, 9];
- Misura di IPP massimo nel dominio del tempo in accordo con i livelli di riferimento definiti per la popolazione in [7, 11].

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.



Figura 3: EHP50G

Il terzo e quarto strumento è l'ELT 400 (Narda Safety Test Solution, Pfullingen, Germany) un sensore isotropico nell'intervallo di frequenza 1 Hz – 400 kHz (Figura 4). I due strumenti differiscono per la metrica in grado di valutare:

- il primo strumento è in grado di misurare il campo B a larga banda nell'intervallo di frequenza descritto;
- il secondo strumento, acquisito di recente, è in grado di misurare sia il campo B che fornire una valutazione istantanea di IPP nell'intervallo di frequenza descritto.

Entrambi gli strumenti sono equipaggiati con due detector, 'Peak' e 'RMS'.

Agli strumenti è possibile inserire due diverse sonde:

- una sonda da 100 cm², dotata di quattro fondo scala (32 μT, 320 μT, 800 μT e 8 mT) impostabili manualmente dall'operatore, con sensibilità pari a 1 nT (con 32 μT di fondo scala) e incertezza espansa pari all'8% (con fattore di copertura pari a 2, per un livello di confidenza pari al 95%);
- una sonda da 3 cm², dotata di quattro fondo scala (300 μT, 3 mT, 7.5 mT, 75 mT) impostabili manualmente dall'operatore, con sensibilità pari a 1 nT (con 300 μT di fondo scala) e incertezza espansa pari al 12% (con fattore di copertura pari a 2, per un livello di confidenza pari al 95%).



Figura 4: ELT 400 e le due sonde da 100 cm² e 3 cm²

Anche in questo caso sono state eseguite misure di campo B (detector 'Peak' in 'Max hold') e di IPP ('Max hold') su tutta la banda, con entrambi i sensori.

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

Per entrambi i veicoli i punti di misura sono stati quelli definiti in [1] e riportati in Tabella 3 per comodità.

Tabella 3: Denominazione dei punti di misura considerati

| Acronimo | Descrizione |
|----------|------------------------|
| FFL | Front Feet Left |
| FFR | Front Feet Right |
| FTC1 | 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 |

Per le misure in VELA9 e in ENEA si è utilizzato il ciclo di guida definito in [1]: 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) per una durata totale di 130 s. Il ciclo è mostrato in Figura 5.

Presso il JRC, nel punto di massima esposizione si è fatta anche una misura con il profilo mostrato in Figura 6: 10 s a velocità 0 km/h, da 0 a 120 km/h in 10 s (con una accelerazione di 3.33 m/s², molto vicina alla massima accelerazione possibile di 3,7 m/s²), 30 s a velocità costante di 120 km/h e infine da 120 a 0 km/h in 15 s (decelerazione di -2.22 m/s²) per un totale di 50 s.

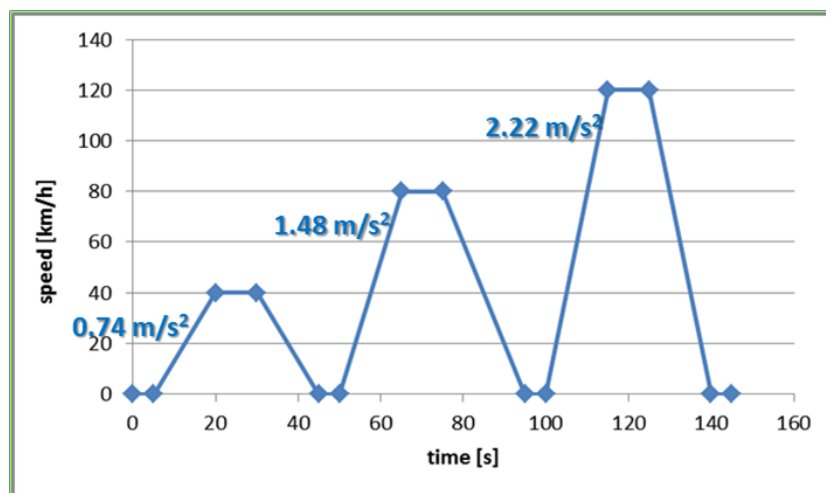


Figura 5: Ciclo di guida utilizzato durante i test al JRC e in ENEA

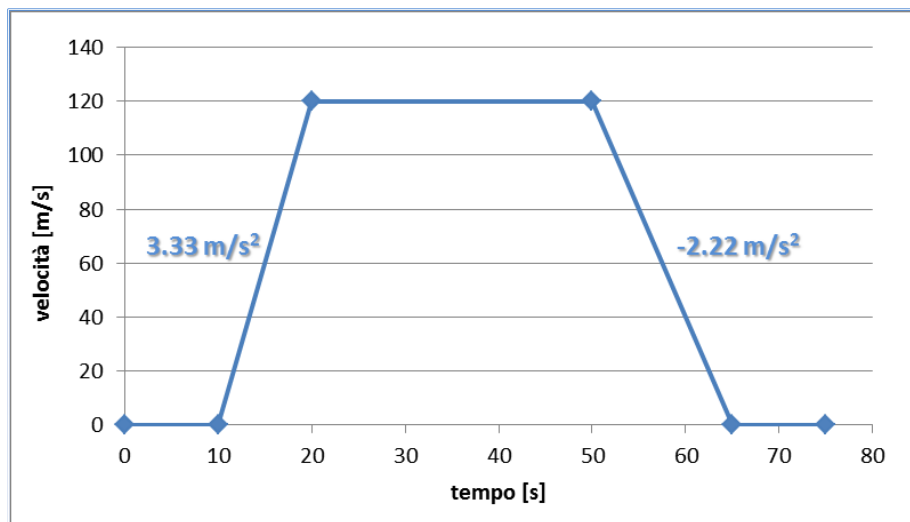


Figura 6: Ciclo di accelerazione utilizzato per valutazioni sul punto di massima esposizione presso il JRC

Questo ciclo è stato pensato per generare all'interno dell'abitacolo una sorta di scenario peggiore tra quelli possibili (confrontabile a quello di un sorpasso veloce) e valutare, quindi, le condizioni di massima esposizione. L'VE#2, date le sue prestazioni, non è riuscito a seguire il profilo del ciclo di accelerazione di Figura 6, che pertanto non è stato eseguito su questo veicolo.

1.2.2 Risultati

EV#1 presso l'impianto VELA 9

In Tabella 4 sono mostrati i risultati ottenuti con i due sensori EHP50G all'interno del veicolo in termini di campo B, IE e IPP durante il ciclo di guida a tre velocità.

In Tabella 5 sono riportati i valori di campo B (Peak, Max hold) e i valori di IPP (massimo) all'interno del veicolo misurati con l'ELT 400 equipaggiato con le due sonde, durante il ciclo di guida a tre velocità.

In Tabella 6 sono riportati i valori di IPP valutati con i 4 strumenti/sensori per un confronto immediato.

Tabella 4: Valori di B massimo, IE massimo, IPP massimo ottenuti con i due EHP50G nei punti di misura in VE#1 durante il ciclo di guida a tre velocità

| Posizione | B [μ T] | | IE [%] | | IPP [%] | |
|-----------|-----------------|------|-----------|------|------------|------|
| | JRC | ENEA | JRC | ENEA | JRC | ENEA |
| FFL | 0.9 | 1.0 | 35.2 | 42.5 | 20.7 | 22.2 |
| FFR | 1.3 | 1.2 | 53.6 | 57.7 | 21.4 | 25.2 |
| FTC1 | 0.3 | 0.3 | 6.0 | 6.3 | 25.2 | 4.3 |
| FTL | 0.3 | 0.3 | 7.4 | 7.0 | 6.6 | 6.6 |
| FTC2 | 0.1 | 0.1 | 1.3 | 1.2 | 1.9 | 1.9 |
| FTR | 0.1 | 0.1 | 1.0 | 1.3 | 2.3 | 3.5 |
| FHL | 0.3 | 0.3 | 7.3 | 7.0 | 8.8 | 9.2 |
| FHR | 0.3 | 0.4 | 6.3 | 6.9 | 5.2 | 8.3 |
| RFL | 0.9 | 1.0 | 34.3 | 37.6 | 17.0 | 18.9 |
| RFR | 0.9 | 1.1 | 35.6 | 36.9 | 17.6 | 17.0 |
| RFC | 1.1 | 1.3 | 39.7 | 34.4 | 14.7 | 15.0 |
| RTL | 1.5 | 1.6 | 12.3 | 10.9 | 6.4 | 6.6 |
| RTR | 0.8 | 0.8 | 8.5 | 8.1 | 6.2 | 5.8 |
| RTC | 0.9 | 0.9 | 9.6 | 9.6 | 7.5 | 11.0 |
| RHL | 0.3 | 0.3 | 1.0 | 1.0 | 8.8 | 9.2 |
| RHR | 0.3 | 0.3 | 0.8 | 0.7 | 2.3 | 1.7 |
| RHC | 0.3 | 0.4 | 0.8 | 0.8 | 2.3 | 1.7 |
| TR | 0.6 | 0.7 | 1.1 | 1.1 | 1.8 | 2.3 |
| TL | 0.7 | 0.7 | 3.0 | 1.9 | 6.7 | 4.4 |

Tabella 5: Valori di B massimo, IPP massimo ottenuti con i due ELT 400 equipaggiati con le due sonde nei punti di misura in VE#1 durante il ciclo di guida a tre velocità

| Posizione | B [μ T] | | IPP [%] | |
|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| | 100 cm ² | 3 cm ² | 100 cm ² | 3 cm ² |
| FFL | 34.3 | 71.3 | 74.5 | 164.2 |
| FFR | 24.3 | 51.4 | 72.1 | 142.5 |
| FTC1 | 9.0 | 14.1 | 6.5 | 8.5 |
| FTL | 8.0 | 17.1 | 6.4 | 11.7 |
| FTC2 | 3.9 | 7.9 | 1.5 | 5.6 |
| FTR | 2.9 | 7.6 | 3.5 | 5.7 |
| FHL | 9.7 | 17.0 | 32.8 | 24.5 |
| FHR | 11.6 | 15.2 | 15.6 | 22.1 |
| RFL | 43.8 | 49.7 | 24.2 | 43.1 |
| RFR | 35.1 | 42.4 | 32.0 | 54.2 |
| RFC | 41.2 | 54.9 | 57.3 | 52.5 |
| RTL | 13.2 | 15.5 | 5.6 | 10.2 |
| RTR | 12.8 | 13.9 | 6.6 | 9.3 |
| RTC | 14.7 | 14.5 | 10.3 | 13.3 |
| RHL | 6.4 | 7.4 | 6.3 | 8.4 |
| RHR | 3.8 | 7.8 | 1.4 | 5.5 |
| RHC | 4.9 | 8.1 | 2.4 | 5.5 |
| TR | 4.0 | 8.8 | 5.7 | 8.2 |
| TL | 6.1 | 9.0 | 10.0 | 14.7 |

Tabella 6: Valori di IPP massimo ottenuti con i due EHP 50 G e con l'ELT 400 equipaggiato con le due sonde nei punti di misura in VE#1 durante il ciclo di guida a tre velocità

| Posizione | IPP EHP50G | | IPP ELT 400 [%] | |
|-----------|------------|------|---------------------|-------------------|
| | ENE A | JRC | 100 cm ² | 3 cm ² |
| FFL | 22.2 | 20.7 | 74.5 | 164.2 |
| FFR | 25.2 | 21.4 | 72.1 | 142.5 |
| FTC1 | 4.3 | 25.2 | 6.5 | 8.5 |
| FTL | 6.6 | 6.6 | 6.4 | 11.7 |
| FTC2 | 1.9 | 1.9 | 1.5 | 5.6 |
| FTR | 3.5 | 2.3 | 3.5 | 5.7 |
| FHL | 9.2 | 8.8 | 32.8 | 24.5 |
| FHR | 8.3 | 5.2 | 15.6 | 22.1 |
| RFL | 18.9 | 17.0 | 24.2 | 43.1 |
| RFR | 17.0 | 17.6 | 32.0 | 54.2 |
| RFC | 15.0 | 14.7 | 57.3 | 52.5 |
| RTL | 6.6 | 6.4 | 5.6 | 10.2 |
| RTR | 5.8 | 6.2 | 6.6 | 9.3 |
| RTC | 11.0 | 7.5 | 10.3 | 13.3 |
| RHL | 9.2 | 8.8 | 6.3 | 8.4 |
| RHR | 1.7 | 2.3 | 1.4 | 5.5 |
| RHC | 1.7 | 2.3 | 2.4 | 5.5 |
| TR | 2.3 | 1.8 | 5.7 | 8.2 |
| TL | 4.4 | 6.7 | 10.0 | 14.7 |

Nelle Figure 7, 8, 9 sono riportati gli stessi dati, con relative barre di errore, su grafici.

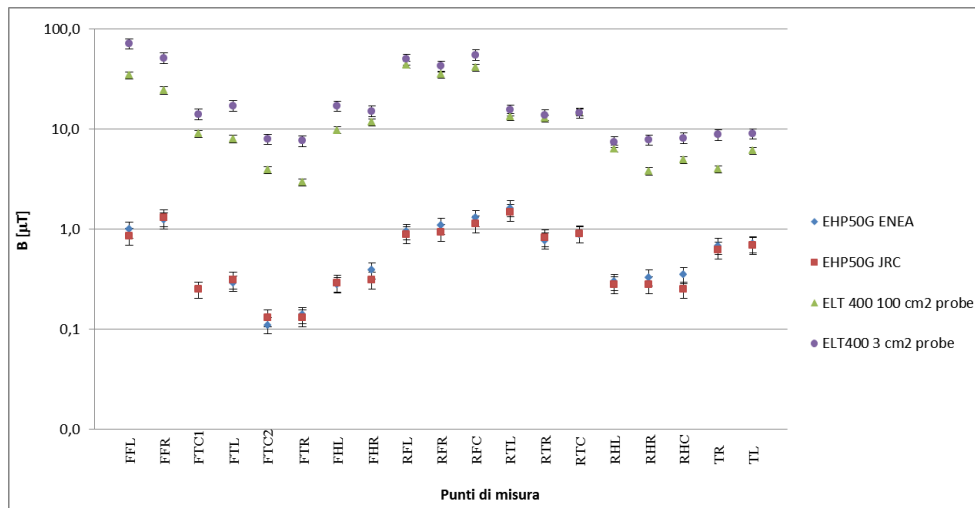


Figura 7: Confronto fra le misure di campo B ottenute in VE #1 con i 4 sensori

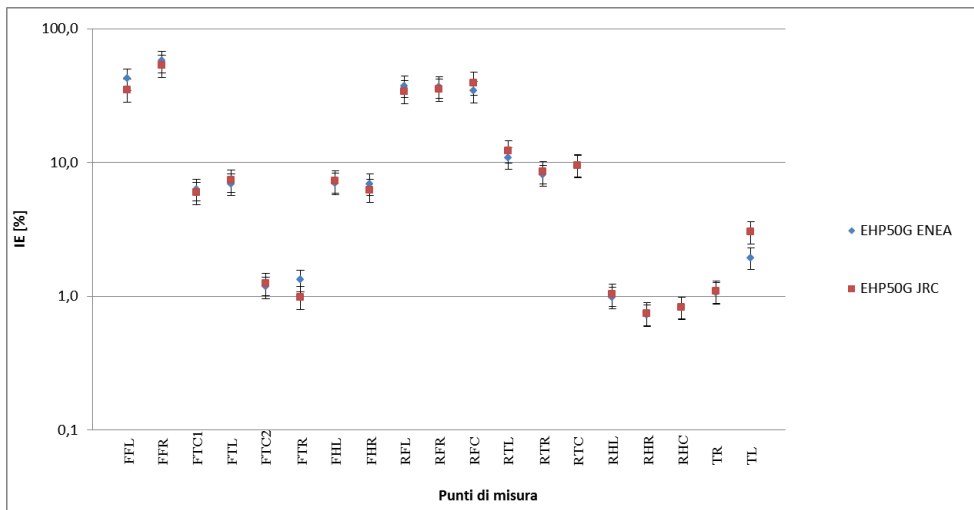


Figura 8: Confronto fra le misure di IE ottenuti in VE#1 con i due EHP50G

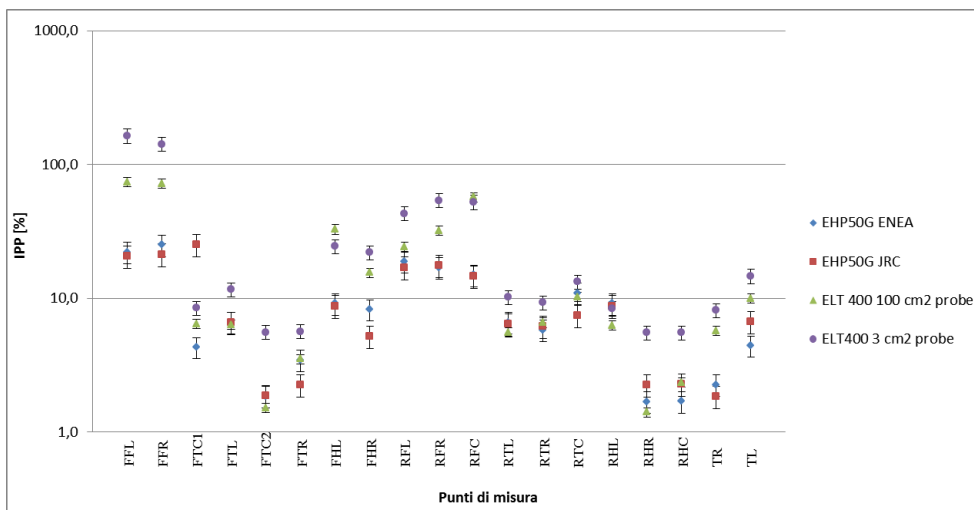


Figura 9: Confronto fra le misure di IPP ottenute in VE#1 con i 4 sensori

Dal confronto di queste misure ottenute con lo stesso ciclo di guida, utilizzando diverse metriche e strumenti è possibile trarre delle informazioni molto interessanti:

- innanzitutto la grande variabilità (fino a più di un ordine di grandezza) dei valori ottenuti all'interno dell'abitacolo. Questo vale per tutte le metriche e per tutti i sensori utilizzati. Questo conferma la complessità dello scenario di esposizione, che vede la presenza di segnali multi-sorgente e non sinusoidali e di gradienti spaziali di campo considerevoli;
- dall'analisi della Figura 7 si conferma che i valori di campo B misurati con l'EHP50G non sono affidabili in questo tipo di scenario. La scarsa risoluzione frequenziale (5Hz) con cui viene fornito lo spettro del segnale misurato non permette di valutare il valore di campo B in modo accurato. Infatti, per quanto i due risultati ottenuti con i due sensori EHP50G siano molto simili tra di loro (vedi Tabella 4), confermando la ripetibilità delle misure ottenuta grazie all'utilizzo di un banco a

rulli e di un ciclo di guida predefinito, i valori di campo B sono molto più bassi dei valori ottenuti con l'ELT 400;

- i valori di campo B ottenuti con l'ELT 400 equipaggiato con il sensore da 3 cm² sono sempre più elevati (fino a quasi il doppio in alcuni casi) dei valori ottenuti con il sensore di 100 cm² (Tabella 5) : questo dato indica che la presenza di gradienti spaziali di campo significativi rende necessario l'utilizzo di sensori piccoli per avere misure più puntuali e una caratterizzazione più accurata dell'esposizione;
- i valori dell'IE ottenuti con i due EHP50G (vedi Tabella 4 e Figura 9) sono molto simili tra di loro, con differenze all'interno dell'intervallo di incertezza (con l'esclusione del dato in TR), ma anche questa volta è confermata la loro scarsa accuratezza, dato che nella maggior parte dei casi (11 su 19) sono inferiori agli IPP misurati con lo stesso strumento. Questa eventualità va contro il fatto che l'IE è una metrica, di fatto, conservativa rispetto a l'IPP nel caso di scenari complessi, quindi l'ipotesi che le misure spettrali effettuate dall'EHP 50G, da cui la valutazione dell'IE deriva, non siano affidabili nel caso di scenari complessi viene confermata anche questa volta;
- i valori di IPP misurati con i due EHP 50G sono confrontabili tra di loro eccetto che in un punto (FTC1 in Tabella 6, ma in prossimità di quella posizione c'è il caricatore wireless del telefono, pertanto anche un piccolo scostamento spaziale dei sensori durante le due misure può giustificare questo evento) e in alcuni casi (10 punti su 19) sono anche confrontabili con il valori di IPP misurati con l'ELT 400 equipaggiato con la sonda di 100 cm². I valori di IPP misurati con l'ELT 400 equipaggiato con la sonda di 3 cm² sono (analogamente a quanto successo per i valori di campo B) più elevati dei valori di IPP misurati con la sonda di 100 cm² (tranne che per i punti FHL e RFC;
- nei due punti anteriori sul fondo dell'auto i valori di IPP misurati con il sensore di 3 cm² superano il 100%. Tenuto conto che in [11] si fa sempre riferimento a un'esposizione a corpo intero, il CEI [13] ha introdotto come metrica per la valutazione dell'esposizione la media su tre punti a diverse altezze. In questo caso si può fare una media degli IPP valutati sui tre punti corrispondenti a uno stesso passeggero (FFL-FTL-FHL e FFR-FTR-FHR), che risulta pari a 67 per il conducente e 57 per il passeggero, pertanto conforme ai livelli di riferimento stabiliti in [7, 11];
- Il risultato del punto precedente può essere esteso, in queste condizioni di misura, anche ai portatori di dispositivi medici. Inoltre il superamento del limite è localizzato nei piedi dove non vengono posizionati dei dispositivi di questo tipo che possono subire interferenze al loro funzionamento.

Il confronto tra gli IPP misurati con le due tipologie di sensore (EHP 50G e ELT 400 equipaggiato con il sensore di 100 cm²) ha portato a un'altra riflessione: nei punti di misura nelle posizioni dei piedi (FFL, FFR,

RFL, RFR, RFC) i valori di IPP misurati con l'ELT 400 erano significativamente più alti degli IPP misurati con i due EHP 50. L'ipotesi è che, in questo caso, risulti determinante la posizione dei sensori: infatti l'EHP 50G è posizionato sul suo treppiedi che lo tiene sollevato da terra almeno di una decina di cm (Figura 10a) mentre il sensore da 100 cm² è posizionato direttamente sul fondo dell'auto (Figura 10b).



Figura 10: posizionamento dei sensori sul fondo dell'auto, a) EHP 50G; b) ELT 400

Per verificare la fondatezza di questa ipotesi abbiamo posizionato l'EHP 50G capovolto sul fondo dell'auto (Figura 11): in questo modo uno dei loop rivelatori del sensore si trova molto vicino al fondo del veicolo e il volume di misura è confrontabile con quello dell'ELT 400 equipaggiato con la sonda di 100 cm².

I risultati sono mostrati in Tabella 7.



Figura 11: EHP 50G posizionato capovolto sul fondo anteriore dell'auto

Tabella 7: Confronto fra valori massimi di campo B e IPP misurati in VE#1 con i due EHP 50 G capovolti come in Figura 11 e il sensore ELT 400 posizionato come in Figura 10 b nelle due posizioni FFL e FFR

| Posizione | B [μ T] | | | | IPP [%] | | | |
|-----------|-----------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|
| | EHP 50G ENEA | EHP 50G JRC | ELT 400 100 cm ² | ELT 400 3 cm ² | EHP 50G ENEA | EHP 50G JRC | ELT 400 100 cm ² | ELT 400 3 cm ² |
| FFL | 5.0 | 6.0 | 27.8 | 35.1 | 116.9 | 96.5 | 74.5 | 164.2 |
| FFR | 5.4 | 4.7 | 46.8 | 40.4 | 91.2 | 109.6 | 72.1 | 142.5 |

L'ipotesi fatta viene confermata dai valori di IPP in Tabella 7: infatti in questo caso i valori di IPP misurati dai due EHP 50G sono tra di loro confrontabili e più di 5 volte più elevati di quelli riportati in Tabella 6 nelle stesse posizioni. Il fatto che gli IPP misurati con l'EHP 50G abbiano valori compresi fra gli IPP misurati con i due sensori dell'ELT 400 conferma il fatto di quanto la geometria dei sensori sia determinante nel caso di elevati gradienti spaziali di campo. Infatti la geometria interna della sonda da 100 cm² posiziona il centro di misura di questo sensore qualche centimetro più in alto, rispetto al centro di misura dell'EHP 50G capovolto, giustificando il fatto che i valori di IPP misurati dalla sonda da 100 cm² siano decisamente inferiori rispetto a tutti gli altri. I valori dell'IPP misurati con la sonda da 3 cm² sono invece comprensibilmente più elevati. Comunque in questi punti di misura si conferma il superamento dell'IPP anche con i due EHP 50G. Per finire, dai dati in tabella 7 si conferma l'inefficacia della misura di B fatta dall'EHP 50G in questo tipo di scenario espositivo, infatti, anche in questo caso i valori di campo B misurati con entrambi gli EHP 50G sono molto minori di quelli misurati con l'ELT 400 con entrambi i sensori. Nei due punti FFL e FFR sono stati anche valutati i valori di campo B e i valori di IPP nel caso di massima accelerazione (Figura 6). I valori misurati sono riportati in Tabella 8.

Tabella 8: Confronto fra valori massimi di campo B e IPP misurati in VE#1 con i due EHP 50 G capovolti come in Figura 11 e il sensore ELT 400 posizionato come in Figura 10 b nelle due posizioni FFL e FFR durante il ciclo di guida di Figura 6

| Posizione | B [μ T] | | | | IPP [%] | | | |
|-----------|-----------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------|------------------------------|
| | EHP 50G ENEA | EHP 50G JRC | ELT 400 100 cm ² | ELT 400 3 cm ² | EHP 50G ENEA | EHP 50G JRC | ELT 400 100 cm ² | ELT 400 3 cm ² |
| FFL | 5.93 | 8.44 | 84.2 | 85.01 | 204.34 | 115.49 | 70.15 | 156.6 |
| FFR | 5.79 | 6.26 | 63.65 | 72.04 | 102.6 | 145.08 | 71.01 | 148.3 |

Anche con questo ciclo di guida, caratterizzato da accelerazioni e decelerazioni maggior rispetto al ciclo di Figura 5, viene confermata la non conformità degli IPP misurati con i due EHP 50G capovolti e l'ELT 400 equipaggiato con il sensore da 3 cm². E' però evidente come, in questo caso, la riproducibilità delle misure sia fortemente compromessa dal fatto per il guidatore è molto difficile ripetere esattamente allo stesso modo questo ciclo di guida con automobili così performanti.

VE#2 presso il banco a rulli di ENEA Casaccia

Il banco a rulli presente nel CR Casaccia predisposto con VE#2 è mostrato in Figura 2.

In Tabella 9 sono riportati i risultati ottenuti con il sensore EHP50G all'interno del veicolo VE#2 in termini di campo B, IE e IPP massimi durante il ciclo di guida a tre velocità di Figura 5.

In Tabella 10 sono riportati i valori di campo B (Peak, Max hold) e i valori di IPP (massimo) all'interno del veicolo VE#2 misurati con l'ELT 400 equipaggiato con le due sonde, durante il ciclo di guida a tre velocità.

In Tabella 11 sono riportati i valori di IPP valutati con i 3 strumenti/sensori per un confronto immediato.

Tabella 9 Valori di B massimo, IE massimo, IPP massimo ottenuti con l' EHP50G nei punti di misura in VE#2 durante il ciclo di guida a tre velocità

| Posizione | B [μ T] | IE [%] | IPP [%] |
|-----------|-----------------|-----------|------------|
| FFL | 0.53 | 1.69 | 4.62 |
| FFR | 0.81 | 1.46 | 2.36 |
| FTC1 | 0.12 | 0.16 | 1.41 |
| FTL | 0.14 | 0.16 | 1.40 |
| FTC2 | 0.10 | 0.11 | 1.35 |
| FTR | 0.09 | 0.07 | 1.33 |
| FHL | 0.31 | 1.18 | 2.95 |
| FHR | 0.18 | 0.44 | 1.59 |
| RFL | 0.22 | 1.59 | 1.70 |
| RFR | 0.48 | 2.86 | 2.51 |
| RFC | 0.34 | 1.54 | 1.68 |
| RTL | 0.07 | - | 1.5 |
| RTR | 0.06 | - | 1.42 |
| RTC | 0.05 | - | 1.35 |
| RHL | 0.04 | - | 1.34 |
| RHR | 0.05 | - | 1.50 |
| RHC | 0.05 | - | 1.40 |
| TR | 0.03 | - | 1.40 |
| TL | 0.03 | - | 1.40 |

Tabella 10: Valori di B massimo, IPP massimo ottenuti con i due ELT 400 equipaggiati con le due sonde nei punti di misura in VE#2 durante il ciclo di guida a tre velocità

| Posizione | B [μ T] | | IPP [%] | |
|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| | 100 cm ² | 3 cm ² | 100 cm ² | 3 cm ² |
| FFL | 3.4 | 12.9 | 8.8 | 15.8 |
| FFR | 3.1 | 9.4 | 11.6 | 6.2 |
| FTC1 | 2.8 | 9.6 | 2 | 5.7 |
| FTL | 1.8 | 7.5 | 2.5 | 5.9 |
| FTC2 | 1.3 | 7.2 | 0.7 | 5.7 |
| FTR | 1.2 | 7.6 | 0.9 | 5.7 |
| FHL | 2.4 | 9.3 | 4.4 | 2.5 |
| FHR | 2.92 | 8.2 | 4.2 | 6 |
| RFL | 6.8 | 11 | 2.9 | 5.8 |
| RFR | 9.5 | 16.5 | 11.3 | 14.1 |
| RFC | 10.5 | 14.5 | 2.5 | 6.1 |
| RTL | 3.1 | 7.7 | 11.8 | 13.9 |
| RTR | 4.5 | 9 | 2.9 | 6.4 |
| RTC | 3.6 | 7.9 | 4 | 7 |
| RHL | 0.9 | 7.5 | 1 | 5.6 |
| RHR | 0.8 | 7.7 | 2.1 | 6.5 |
| RHC | 1 | 7.9 | 1.2 | 5.7 |
| TR | 2 | 12.1 | 8.46 | 11.7 |
| TL | 1.5 | 12.1 | 15.9 | 22.6 |

Tabella 11: Valori di IPP massimo ottenuti con i due EHP 50 G e con l'ELT 400 equipaggiato con le due sonde nei punti di misura in VE#2 durante il ciclo di guida a tre velocità

| Posizione | IPP EHP50G | IPP ELT 400 | |
|-----------|------------|---------------------|-------------------|
| | [%] | 100 cm ² | 3 cm ² |
| FFL | 4.62 | 8.8 | 15.8 |
| FFR | 2.36 | 11.6 | 6.2 |
| FTC1 | 1.41 | 2 | 5.7 |
| FTL | 1.40 | 2.5 | 5.9 |
| FTC2 | 1.35 | 0.7 | 5.7 |
| FTR | 1.33 | 0.9 | 5.7 |
| FHL | 2.95 | 4.4 | 2.5 |
| FHR | 1.59 | 4.2 | 6 |
| RFL | 1.70 | 2.9 | 5.8 |
| RFR | 2.51 | 11.3 | 14.1 |
| RFC | 1.68 | 2.5 | 6.1 |
| RTL | 1.5 | 11.8 | 13.9 |
| RTR | 1.42 | 2.9 | 6.4 |
| RTC | 1.35 | 4 | 7 |
| RHL | 1.34 | 1 | 5.6 |
| RHR | 1.50 | 8.8 | 15.8 |
| RHC | 1.40 | 11.6 | 6.2 |
| TR | 1.40 | 2 | 5.7 |
| TL | 1.40 | 2.5 | 5.9 |

In questo caso è evidente come nel caso di una automobile con caratteristiche meno performanti rispetto al veicolo VE#1, sia i valori di campo B che gli indici siano notevolmente più bassi rispetto a quanto visto nelle Tabelle 4 - 6. Purtroppo, anche in questo caso, si possono confermare alcune considerazioni fatte in precedenza:

- i valori di campo B misurati con l'EHP 50G non sono affidabili, infatti sono uno o due ordini di grandezza inferiori a quanto misurato con i sensori dell'ELT 400 e non giustificano i valori di IPP, seppur bassi, trovati con lo stesso strumento;
- la scarsa affidabilità della misura di IE: infatti, in tutte le posizioni, i valori di IE sono inferiori ai valori di IPP (Tabella 9) contraddicendo ancora una volta il fatto che l'indice IE è una metrica conservativa rispetto all'IPP. Inoltre in molti casi lo strumento non è stato in grado di fare una valutazione dell'IE;
- i valori di campo B misurati con il sensore dell'ELT 400 da 3 cm² sono sempre più elevati di quelli misurati con il sensore da 100 cm² (Tabella 10), confermando la necessità dell'utilizzo di sensori di dimensioni ridotte in presenza di elevati gradienti spaziali di campo;
- i valori di IPP misurati con l'ELT 400 equipaggiato con il sensore da 3 cm² sono sempre più alti di quelli misurati con il sensore da 100 cm² (eccetto in tre posizioni che rappresentano eventi casuali), confermando la capacità del sensore più piccolo di rilevare la presenza di elevati gradienti di campo B all'interno del veicolo;
- I valori di IPP misurati con l'EHP 50 G e con l'ELT 400 equipaggiato con il sensore da 100 cm² (Tabella 11) sono per la maggior parte dei punti confrontabili tra di loro a parte tutti i punti corrispondenti alla posizione di piedi (FFL, FFL, RFL, RFR, RFC) e due punti nella parte posteriore (RTL, RHC).

Forti di quest'ultima considerazione, anche in questo caso abbiamo ripetuto le misure con il sensore EHP 50G capovolto come in Figura 11 nella posizione FFL, identificata come la posizione peggiore. I risultati sono riassunti in Tabella 12.

Tabella 12: Confronto fra valori massimi di campo B e IPP misurati in VE#2 con i due EHP 50 G capvolti come in Figura 11 e il sensore ELT 400 posizionato come in Figura 10 b nelle due posizioni FFL e FFR

| Posizione | EHP 50G | B [μT] | | EHP 50G | IPP ELT 400 [%] | |
|-----------|---------|--------------------------------|------------------------------|---------|--------------------------------|------------------------------|
| | | ELT 400 100 cm ² | ELT 400 3 cm ² | | ELT 400 100 cm ² | ELT 400 3 cm ² |
| FFL | 0.57 | 3.4 | 12.9 | 5.44 | 8.8 | 15.8 |

A differenza di quanto avvenuto in VE#1, in questo caso i valori sia di campo B che di IPP misurati con l'EHP 50G rimangono non confrontabili con quanto misurato con l'ELT 400. Una giustificazione possibile potrebbe

essere che in VE#2 i valori di esposizione sono molto bassi e, molto probabilmente, al limite della sensibilità dell'EHP 50G durante il ciclo di guida, per questo motivo lo strumento non riesce a misurare in modo appropriato.

A conclusione di quanto fatto negli ultimi due anni riguardo alla valutazione dell'esposizione umana ai campi magnetici presenti all'interno dei veicoli elettrici possiamo affermare:

- all'interno dei veicoli elettrici ci sono elevati gradienti spaziali di campo magnetico, pertanto per caratterizzare lo scenario espositivo ai fini di una valutazione di conformità dell'esposizione, è necessario effettuare misure in più punti all'interno del veicolo;
- la presenza di elevati gradienti spaziali di campo magnetico rende necessario l'utilizzo di sensori di dimensione ridotta per una valutazione dell'esposizione puntuale e realistica;
- per quanto riguarda i sensori, bisogna fare molta attenzione a quanto propone il mercato e analizzarne bene le caratteristiche in funzione di questo tipo di valutazione che è molto specifico;
- l'utilizzo di un banco a rulli è necessario per riprodurre lo scenario di esposizione del veicolo in moto con i seguenti vantaggi : i) è possibile impostare un ciclo di guida standard riproducibile per garantire la ripetibilità delle emissioni durante le valutazioni nei diversi punti di misura, ii) è possibile identificare un punto peggiore per l'esposizione su cui fare approfondimenti, iii) è possibile mimare una situazione di scenario peggiore dell'esposizione (accelerazione in fase di sorpasso, frenata brusca) in condizione di sicurezza per gli operatori;
- utilizzare un impianto come VELA9, completamente schermato ai campi magnetici e elettrici esterni, rappresenta certamente una soluzione ottimale per questo tipo di valutazioni, ma l'utilizzo di un banco a rulli di laboratorio può rappresentare una buona alternativa all'utilizzo di un impianto costoso come VELA9.

1.3 Stazioni di ricarica

Durante la seconda annualità [1-3] è stato messo a punto un protocollo di misura per la valutazione delle emissioni delle stazioni di ricarica veloce in condizioni di riferimento. In questa annualità erano previste delle valutazioni in scenari realistici di esposizione, purtroppo, però, a causa della situazione pandemica e, soprattutto, della difficoltà di instaurare un contatto formale con i gestori delle stazioni per la concessione dei permessi non abbiamo potuto procedere in questa direzione. Purtroppo, l'adeguamento della camera semianecoica presente nei laboratori SSPT-TECS della Casaccia ha reso possibile eseguire valutazioni di esposizione per questo tipo di sorgenti all'interno dei nostri laboratori, pertanto il protocollo messo a punto in [1-3] è stato applicato per eseguire una valutazione di esposizione di una stazione di ricarica

veloce [4] utilizzata per la sperimentazione all'interno del Centro con la finalità di verificare la fattibilità di misura di questo tipo di sorgenti anche all'interno dei nostri laboratori.

Il protocollo di misura è descritto di seguito per completezza:

- definizione di una griglia di punti su tutte le parti di cui è costituita la stazione di ricarica per poter eseguire una prima scansione di massima per la ricerca della zona di massimo;
- le misure vanno eseguite durante la ricarica di un veicolo elettrico con la batteria scarica senza superare il 50% dello stato di ricarica del veicolo, infatti oltre tale soglia la potenza di ricarica diminuisce, di conseguenza diminuiscono le correnti in gioco e quindi il campo B e 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;
- 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 il 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%.

1.3.1 Materiali e metodi di misura delle stazioni di ricarica

La stazione di ricarica veloce oggetto di questa caratterizzazione di emissioni elettromagnetiche, è il convertitore Circutor modello RVE-QPC-MIX codice 490099z, di potenza nominale 77 kVA. La stazione di ricarica è equipaggiata con il sistema di ricarica rapida a standard CHAdeMO, con connettore di tipo 4 per la corrente continua (valori nominali: tensione massima 500 V DC e corrente massima 125 A). Le sue caratteristiche sono descritte in [4].

La stazione è stata impiegata con una potenza d'alimentazione limitata a circa 32 kVA, per eseguire cicli di ricarica veloce del pacco batterie del veicolo elettrico commerciale Nissan Leaf, in dotazione al Dipartimento TERIN dell'ENEA.

A differenza delle misure eseguite in [4] la stazione è stata posizionata all'interno della camera schermata semi anecoica VECUVIA presente nei laboratori SSPT-TECS del CR Casaccia. Questa camera consente di effettuare misure di compatibilità elettromagnetica ad una distanza di 3 m dalla sorgente di radiazione, per

frequenze comprese fra 10 kHz e 18 GHz, per la misura dei diagrammi di radiazione delle antenne e per misure di radar cross section.

Data la lunghezza limitata del cavo di ricarica è stato necessario posizionare la stazione di ricarica nella zona della camera anecoica vicino alla porta di accesso, posizionare il veicolo all'esterno e lavorare con la porta aperta (Figura 12).



Figura 12: Posizionamento della stazione di ricarica e della auto in ricarica nella camera semi-anecoica

Protocollo di misura

In conformità con il protocollo sopra descritto, sono state adottate le condizioni di funzionamento della stazione di ricarica di ricarica che fornissero lo scenario espositivo peggiore: come già detto, le emissioni massime si hanno quando la corrente è massima e ciò si verifica durante la fase iniziale di ricarica, definita a corrente costante; questa fase è di durata variabile e, pertanto, è necessario:

- monitorare il valore della corrente durante tutte le sessioni sperimentali;
- eseguire rapidamente le misure per rientrare nei tempi in cui tale variazione si mantiene entro limiti accettabili;
- scaricare l'auto tra una sessione e l'altra.

Sono stati convalidati i punti definiti per le misure descritte in [4] e riportati in Figura 13a. Le facce sono identificate come:

- faccia A, lato frontale con display accensione e l'alloggiamento a riposo dei connettori di ricarica;
- faccia B, lato destro;

- faccia C, retro da cui entra il cavo di alimentazione di rete ed in alto a sinistra l'uscita del cavo di ricarica;
- faccia D, lato sinistro in cui è presente il un vano da cui si accede all'interruttore generale di alimentazione della stazione di ricarica.

Per ognuna delle quattro facce della stazione di ricarica sono stati identificati 51 punti di misura approssimativamente a 10 cm l'uno dall'altro: si sono eseguite due misure seguendo l'ordine dei punti da 1 a 51 e da 51 a 1 per tenere conto della variazione di corrente nel tempo richiesto dalla misura della singola faccia. Sul sensore, movimentato manualmente, è stato attaccato uno spessore per garantire il posizionamento (veloce) a 10 cm del centro del sensore dalla superficie metallica della faccia come mostrato in Figura 13b.

Gli strumenti di misura utilizzati sono gli stessi delle campagne di misura all'interno dei veicoli elettrici: in Tabella 13 ne sono riassunte le caratteristiche e le impostazioni durante le misure eseguite sulla stazione di ricarica.

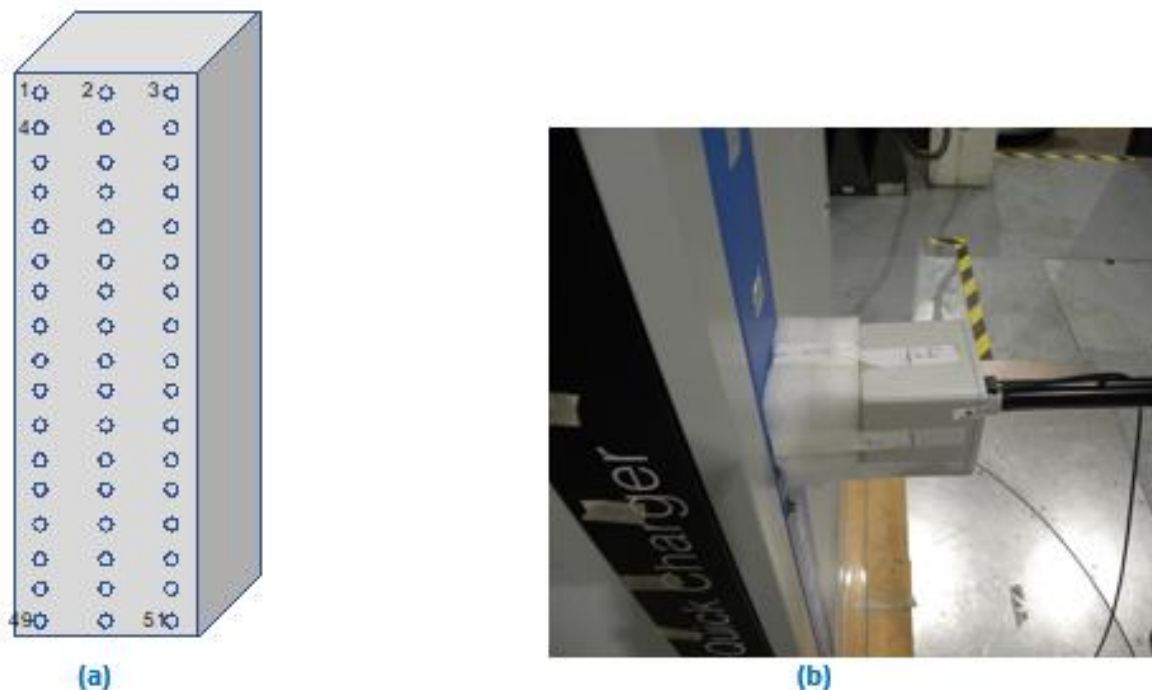


Figura 13 – Allestimento del set-up sperimentale: (a) schema dei punti di misura; (b) accorgimenti per velocizzare il preciso posizionamento del sensore.

Tabella 13: Strumenti di misura e impostazioni utilizzati durante le misure della stazione di ricarica di ricarica

| Strumento: | EHP 50 G |
|---|---|
| Distanza del centro del sensore dalla parete (faccia) | 10 cm |
| Posizionamento sensore | Asse z del sensore perpendicolare alla superficie della stazione di ricarica |
| Impostazioni | 1Hz <f< 2 kHz, fondo scala 100 μ T |
| Incertezza espansa | 18.3% |
| Metrica | B (wideband) e IE % secondo i limiti ICNIRP 1998 per la popolazione |
| Griglie di misura | 51 punti di misura (17 x 3) per ogni faccia della stazione di ricarica (esclusa la posteriore dove sono 48) secondo lo schema di Figura 13 a. In corrispondenza del <i>punto di massimo</i> è stata effettuata una misura "in allontanamento" fino al punto di conformità |
| Strumento: | NARDA ELT 400 equipaggiato con sensori da 100 cm ² e 3 cm ² |
| Distanza del centro del sensore dalla parete (faccia) | 10 cm |
| Posizionamento sensore | Sensore posizionato parallelamente al pavimento |
| Impostazioni | Detector: Peak, Range: 320 μ T |
| Incertezza espansa | Sensore 100 cm ² 8%, sensore 3 cm ² 8% |
| Metrica | B wideband e IPP secondo i limiti ICNIRP 1998 per la popolazione |
| Punti di misura | In corrispondenza del <i>punto di massimo</i> è stata effettuata una misura "in allontanamento" fino al punto di conformità |

1.3.2 Risultati

Nelle Tabelle 14 e 15 vengono mostrati i valori di campo B e IE rispettivamente, misurati in ogni punto di ciascuna faccia: ogni valore delle tabelle (mappature) è il valore massimo risultante dalle due misure effettuate, su ciascuna faccia, per tener conto della variazione della corrente nel tempo richiesto dall'intera misura.

Tabella 14 – Distribuzioni dei valori di campo B sulle 4 facce

| Faccia A | | | | Faccia B | | | |
|----------------------------|---------|-----------|---------|----------------------------|---------|-----------|---------|
| Induzione magnetica B (mT) | | | | Induzione magnetica B (mT) | | | |
| h [cm] | Sn_anec | Cent_anec | Dx_anec | h [cm] | Sn_anec | Cent_anec | Dx_anec |
| 180 | 3.5 | 4.1 | 3.2 | 180 | 3.5 | 3.8 | 2.9 |
| 170 | 2.4 | 2.8 | 2.6 | 170 | 2.7 | 2.5 | 2.2 |
| 160 | 1.9 | 2.0 | 2.1 | 160 | 2.4 | 3.1 | 2.0 |
| 150 | 1.6 | 1.6 | 1.9 | 150 | 2.5 | 2.4 | 2.3 |
| 140 | 1.6 | 1.5 | 1.9 | 140 | 2.9 | 3.9 | 3.1 |
| 130 | 1.8 | 1.5 | 2 | 130 | 3.8 | 7.1 | 4.3 |
| 120 | 2.1 | 1.5 | 2.2 | 120 | 4.9 | 11.7 | 5.6 |
| 110 | 2.5 | 1.8 | 2.4 | 110 | 5.4 | 12.7 | 6.6 |
| 100 | 2.9 | 1.9 | 2.8 | 100 | 5.5 | 10.4 | 7.4 |
| 90 | 3.5 | 2.3 | 3.2 | 90 | 5.1 | 7.2 | 7 |
| 80 | 4.1 | 2.6 | 3.8 | 80 | 5.2 | 6.2 | 6.2 |
| 70 | 5.8 | 3.8 | 5.0 | 70 | 5.7 | 5.9 | 5.7 |
| 60 | 8.8 | 6.9 | 6.8 | 60 | 6.9 | 6.9 | 6.3 |
| 50 | 12.4 | 10.6 | 10.0 | 50 | 8.6 | 9.4 | 7.5 |
| 40 | 12.5 | 11.6 | 10.5 | 40 | 9.0 | 9.0 | 7.7 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-----------|---------|-------------------------------------|---------|-----------|---------|--|--------|--|-----------------|--|------------------|--|-----------|
| 30 | 13.6 | 10.5 | 10.0 | 30 | 7.5 | 8.0 | 5.7 | | | | | | | | |
| 20 | 15.8 | 12.0 | 12.2 | 20 | 7.3 | 9.7 | 6.8 | | | | | | | | |
| *Variazione corrente: 52A →37A | | | | *Variazione corrente: 51A →47A | | | | | | | | | | | |
| Faccia C Induzione magnetica B (mT) | | | | Faccia D Induzione magnetica B (mT) | | | | | | | | | | | |
| h [cm] | Sn_anec | Cent_anec | Dx_anec | h [cm] | Sn_anec | Cent_anec | Dx_anec | | | | | | | | |
| 180 | 3.6 | 4.5 | 3.6 | 180 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | | | | | | | | |
| 170 | 3.7 | 3.6 | 3.6 | 170 | 2.5 | 1.8 | 1.9 | | | | | | | | |
| 160 | 3.5 | 3.2 | 3.4 | 160 | 2.6 | 1.5 | 1.8 | | | | | | | | |
| 150 | 3.3 | 3.1 | 3.2 | 150 | 2.6 | 1.7 | 1.9 | | | | | | | | |
| 140 | 3.8 | 3.5 | 3.6 | 140 | 3.4 | 2.4 | 2.2 | | | | | | | | |
| 130 | 6.2 | 6.0 | 6.1 | 130 | 4.7 | 3.2 | 2.4 | | | | | | | | |
| 120 | 7.4 | 7.35 | 7.3 | 120 | 5.6 | 4.1 | 2.6 | | | | | | | | |
| 110 | 7.6 | 7.7 | 7.5 | 110 | 5.4 | 5.0 | 2.7 | | | | | | | | |
| 100 | 6.5 | 6.8 | 7 | 100 | 6.4 | 6.2 | 2.9 | | | | | | | | |
| 90 | 5.3 | 5.6 | 5.7 | 90 | 6.4 | 8.0 | 3.8 | | | | | | | | |
| 80 | 4.3 | 4.7 | 4.2 | 80 | 5.8 | 7.3 | 5.8 | | | | | | | | |
| 70 | 4.2 | 3.9 | 3.5 | 70 | 5.7 | 6.8 | 9.9 | | | | | | | | |
| 60 | 4.5 | 4.1 | 1.7 | 60 | 7.2 | 8.0 | 16.7 | | | | | | | | |
| 50 | 4.3 | 3.1 | 3.1 | 50 | 10.8 | 16.3 | 31.1 | | | | | | | | |
| 40 | 3.2 | 2.6 | 2.4 | 40 | 11.3 | 19.3 | 36.5 | | | | | | | | |
| 30 | 3.0 | 2.6 | 2.8 | 30 | 9.5 | 26.6 | 43.0 | | | | | | | | |
| 20 | 6.6 | 6.2 | 12.2 | 20 | 7.9 | 19.7 | 48.7 | | | | | | | | |
| *Variazione corrente: 52A →28A | | | | *Variazione corrente: 52A →43A | | | | | | | | | | | |
| <table border="0"> <tr><td style="background-color: #c8e6c9;"></td><td>≤ 3 μT</td></tr> <tr><td style="background-color: #fff9c4;"></td><td>3 μT < B ≤ 6 μT</td></tr> <tr><td style="background-color: #ffe0b2;"></td><td>6 μT < B ≤ 10 μT</td></tr> <tr><td style="background-color: #f44336;"></td><td>10 μT ≤ B</td></tr> </table> | | | | | | | | | ≤ 3 μT | | 3 μT < B ≤ 6 μT | | 6 μT < B ≤ 10 μT | | 10 μT ≤ B |
| | ≤ 3 μT | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 μT < B ≤ 6 μT | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6 μT < B ≤ 10 μT | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10 μT ≤ B | | | | | | | | | | | | | | |

Sotto le tabelle sono riportati i valori estremi (massimo e minimo) della corrente nelle due misure: tale riduzione, come si vede, non è costante ed è attribuibile a diversi fattori tra cui lo stato di ricarica delle batterie dell'auto e i tempi complessivi della misura (per quanto, di durata piuttosto uniforme di una decina di minuti).

Tabella 15 – Distribuzioni dei valori di IE sulle 4 facce

| | | | | | | | |
|-----------------|---------|-----------|---------|-----------------|---------|-----------|---------|
| Faccia A IE (%) | | | | Faccia B IE (%) | | | |
| h [cm] | Sn_anec | Cent_anec | Dx_anec | h [cm] | Sn_anec | Cent_anec | Dx_anec |
| 180 | 5.4 | 5.7 | 5.9 | 180 | 6.1 | 6.1 | 6.1 |
| 170 | 6.0 | 4.2 | 4.5 | 170 | 5.1 | 3.8 | 5.1 |
| 160 | 6.0 | 3.6 | 4.4 | 160 | 5.0 | 3.8 | 5.2 |
| 150 | 5.9 | 3.3 | 4.3 | 150 | 5.6 | 4.8 | 5.6 |
| 140 | 6.1 | 3.1 | 4.4 | 140 | 6.6 | 7.2 | 7.2 |
| 130 | 6.7 | 3.0 | 4.7 | 130 | 7.8 | 12.6 | 9.0 |
| 120 | 7.9 | 3.4 | 4.8 | 120 | 9.7 | 21.5 | 12.3 |
| 110 | 9.5 | 4.1 | 5.1 | 110 | 10.3 | 24.4 | 14.4 |
| 100 | 10.9 | 4.5 | 5.9 | 100 | 11.0 | 21.4 | 15.6 |
| 90 | 13.2 | 5.6 | 6.9 | 90 | 11.5 | 12.9 | 16.9 |
| 80 | 15.9 | 6.7 | 9.3 | 80 | 13.5 | 11.5 | 16.5 |
| 70 | 24.5 | 11.3 | 15.7 | 70 | 18.5 | 12.0 | 17.0 |
| 60 | 40.3 | 22.2 | 24.3 | 60 | 26.1 | 15.3 | 18.6 |

| | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|-----------|---------|--------------------------------|---------|-----------|---------|
| 50 | 60.2 | 34.8 | 37.0 | 50 | 36.4 | 22.5 | 21.8 |
| 40 | 57.0 | 43.6 | 42.9 | 40 | 39.9 | 25.5 | 21.5 |
| 30 | 62.0 | 42.0 | 47.7 | 30 | 36.9 | 25.9 | 20.9 |
| 20 | 70.0 | 49.0 | 71.0 | 20 | 49.0 | 33.1 | 24.3 |
| *Variazione corrente: 52A →37A | | | | *Variazione corrente: 51A →47A | | | |
| Faccia C | | | | Faccia D | | | |
| IE (%) | | | | IE (%) | | | |
| h [cm] | Sn_anec | Cent_anec | Dx_anec | h [cm] | Sn_anec | Cent_anec | Dx_anec |
| 180 | 5.5 | 7.3 | 6.4 | 180 | 7.5 | 6.6 | 8.7 |
| 170 | 6.4 | 7.2 | 6.9 | 170 | 8.0 | 4.9 | 8.4 |
| 160 | 5.7 | 5.3 | 5.5 | 160 | 10.0 | 4.3 | 8.9 |
| 150 | 5.4 | 4.9 | 5.4 | 150 | 9.9 | 4.6 | 9.2 |
| 140 | 5.9 | 5.4 | 6.0 | 140 | 11.9 | 5.4 | 10.0 |
| 130 | 9.3 | 7.7 | 10.0 | 130 | 15.1 | 6.4 | 10.6 |
| 120 | 10.8 | 9.3 | 12.0 | 120 | 16.7 | 7.4 | 11.8 |
| 110 | 12.2 | 9.7 | 13.6 | 110 | 16.6 | 8.3 | 12.9 |
| 100 | 11.7 | 9.3 | 13.8 | 100 | 19.1 | 10.0 | 16.5 |
| 90 | 11.6 | 8.5 | 13.0 | 90 | 23.7 | 13.4 | 22.2 |
| 80 | 11.7 | 7.9 | 12.4 | 80 | 28.6 | 20.0 | 34.8 |
| 70 | 12.0 | 7.4 | 12.3 | 70 | 39.0 | 15.9 | 56.4 |
| 60 | 12.9 | 8.3 | 12.1 | 60 | 44.4 | 32.2 | 91.0 |
| 50 | 11.0 | 8.8 | 12.5 | 50 | 57.9 | 58.5 | 142.1 |
| 40 | 9.1 | 7.4 | 9.9 | 40 | 51.5 | 62.0 | 150.0 |
| 30 | 10.3 | 9.3 | 11.2 | 30 | 43.0 | 68.1 | 195.9 |
| 20 | 26.4 | 29.9 | 45.1 | 20 | 39.3 | 74.8 | 270.0 |
| *Variazione corrente: 52A →28A | | | | *Variazione corrente: 52A →43A | | | |
| | | < 100 | | | | > 100 | |

In base ai valori misurati e riportati, risulta che, mentre non ci sono problemi di conformità in termini di campo B (< 100 μ T) secondo la [7] che definisce il livello di riferimento per la componente alla frequenza di rete (50 Hz), ci sono invece dei superamenti in termini di indice di esposizione (IE) dovuti alle altre componenti del segnale emesso. Si conferma, quindi, la necessità di effettuare misure specifiche di IE in presenza di segnali complessi anche se non risultano superamenti di campo B e di utilizzare l'IE come metrica per la valutazione dell'esposizione.

In Tabella 16 sono riportati i valori di IE misurato sul punto di massima esposizione allontanandosi dalla stazione di ricarica con passo di 2 cm.

Tabella 16 – misure di IE in allontanamento sul punto di massimo

| Posizione [cm] | IE [%] |
|-------------------|-----------|
| 10 | 275 |
| 12 | 235 |
| 14 | 175 |
| 16 | 140 |
| 18 | 105 |
| 19 | 90 |
| 20 | 85 |

A circa 20 cm dalla stazione di ricarica l'IE risulta minore di 100, definendo così la distanza di rispetto da questo sistema.

I grafici che seguono, invece, (Figure 14 - 17) rappresentano il confronto fra le due campagne di misura, in ambiente non schermato eseguite in [4] e in camera semi anecoica, in termini di campo B.

Ciascuna linea rappresenta la sequenza dei 17 punti verticali, le linee piene sono le misure recenti, quelle tratteggiate le misure in [4]. Come si vede, ogni coppia di linee presenta lo stesso andamento (tranne che nel caso della linea centrale della faccia B), a conferma della validità delle misure effettuate; la discrepanza tra i valori assoluti, invece, può essere attribuita alla più efficiente alimentazione del nuovo sistema della camera anecoica.

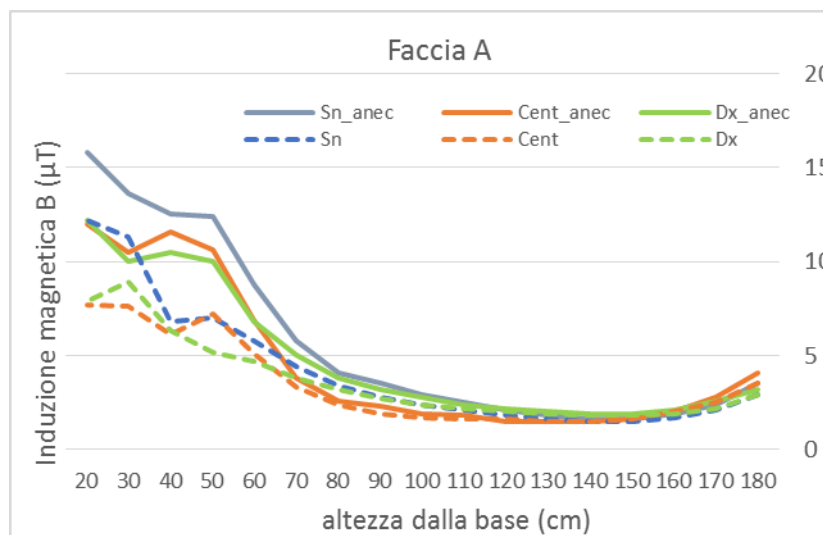


Figura 14 – confronto delle sequenze dei 17 punti verticali sulla faccia A tra le misure in [4] (tratteggiate) e le misure in camera semi anecoica (tratto pieno)

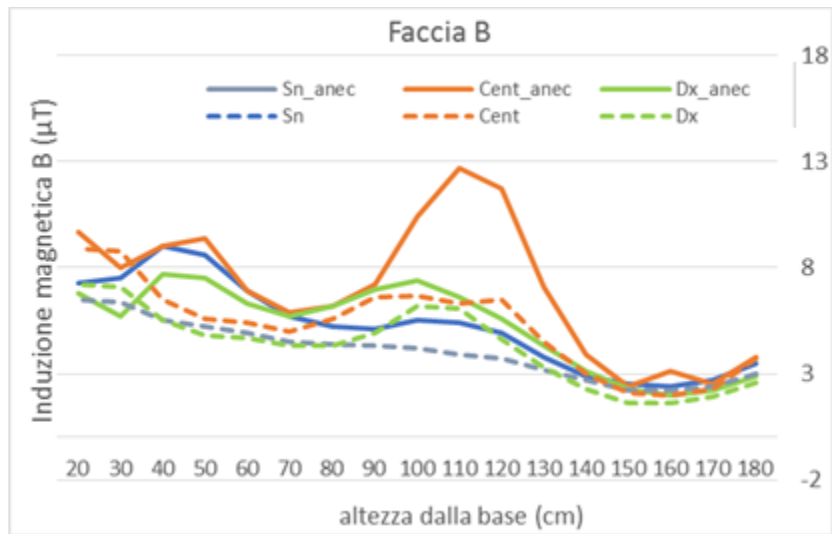


Figura 15 – confronto delle sequenze dei 17 punti verticali sulla faccia B tra le misure in [4] (tratteggiate) e le misure in camera semi anecoica (tratto pieno)

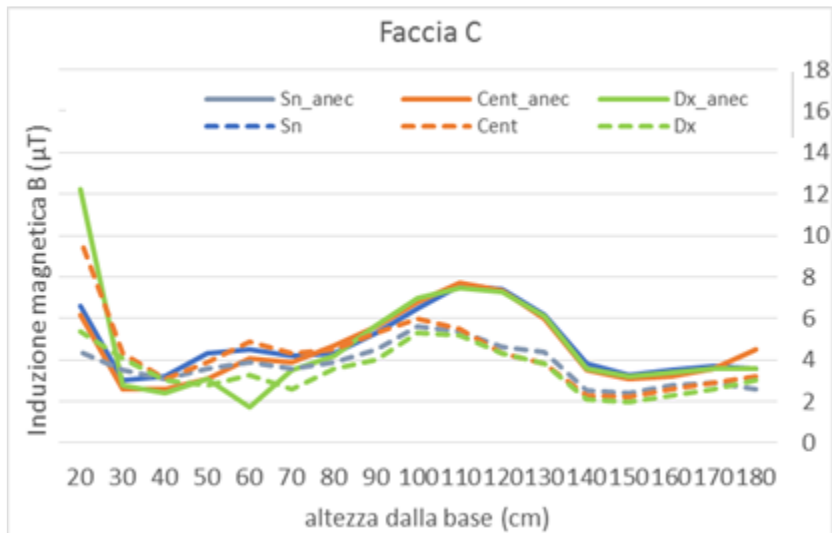


Figura 16 – confronto delle sequenze dei 17 punti verticali sulla faccia C tra le misure in [4] (tratteggiate) e le misure in camera semi anecoica (tratto pieno)

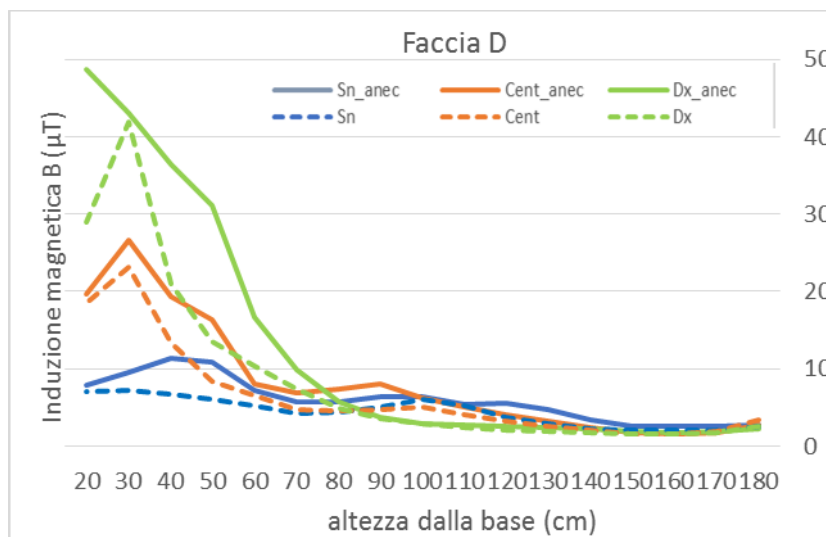


Figura 17 – confronto delle sequenze dei 17 punti verticali sulla faccia D tra le misure in [4] (tratteggiate) e le misure in camera semi anecoica (tratto pieno)

Infine, le Figure 18 e 19 mostrano il confronto fra le misure di IPP e campo B, rispettivamente, effettuate in allontanamento dal punto di massimo, con l’EHP 50G e con l’ELT 400 equipaggiato con le sonde di misura diversa. È evidente come in questo scenario di esposizione, in cui sono assenti, a differenza dell’interno dei veicoli elettrici, segnali impulsivi e gradienti spaziali di campo elevati, i risultati ottenuti dai tre sensori sono praticamente sovrapponibili.

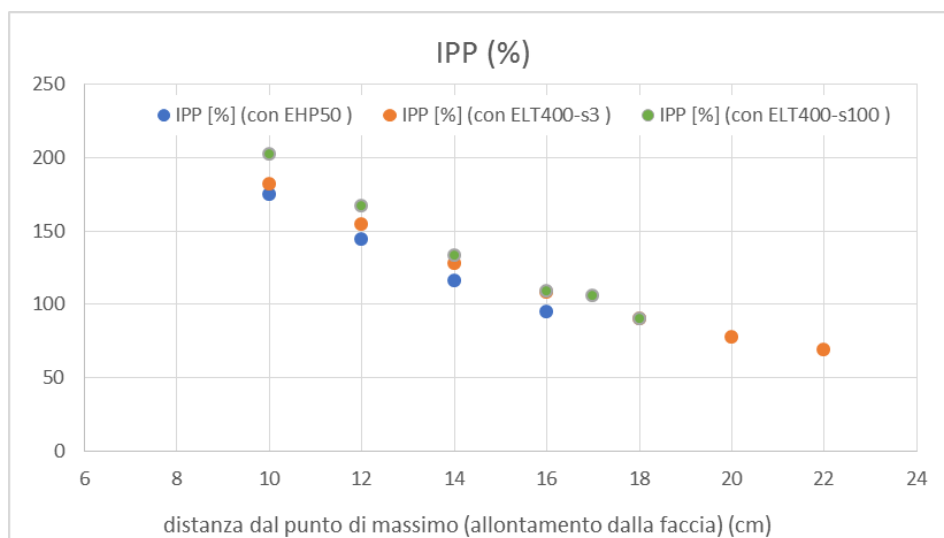


Figura 18 – confronto fra gli IPP ottenuti con i diversi strumenti

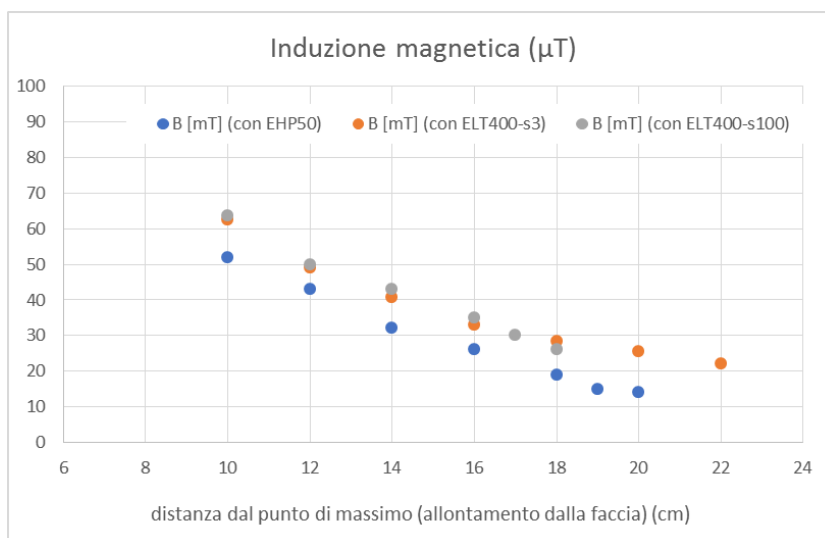


Figura 19 – confronto fra le misure di campo B ottenute con i diversi strumenti

A conclusione di quanto fatto negli ultimi due anni riguardo alla valutazione dell'esposizione umana ai campi magnetici emessi dalle stazioni di ricarica veloce possiamo affermare:

- lo scenario di esposizione non presenta le criticità di valutazione dell'esposizione (presenza di segnali impulsivi e elevati gradienti spaziali di campo B) che abbiamo riscontrato all'interno dei veicoli elettrici.
- la scelta della strumentazione di misura è di conseguenza meno critica.
- è comunque necessario ricorrere a una metrica che usa gli indici di esposizione invece delle grandezze di campo per le valutazioni di conformità.
- lo scenario di esposizione deve sempre essere quello peggiore, pertanto le misure devono essere sempre effettuate durante lo stadio iniziale di ricarica del veicolo.

1.4 Dosimetria dei sistemi di ricarica WPT

1.4.1 Dosimetria del sistema V2H

In [1] è stato presentato il modello ottimizzato (Figura 20) e le impedenze al variare della distanza tra le bobine. Le specifiche di progetto sono state consegnate all'azienda costruttrice che ha realizzato fisicamente le bobine. Il modello ottimizzato è stato validato sperimentalmente con misure di impedenza delle bobine affiancate a diversa distanza tra di loro [6].

Il modello è stato poi trasferito sul solutore EM Studio del software di simulazione elettromagnetica 3D CST Microwave Studio per le valutazioni di campo magnetico emesso nell'ambiente e valutazioni dosimetriche.

In Tabella 17 sono presentati i valori di campo B di picco mediati su una sfera di diametro 10 cm (di volume confrontabile con lo strumento di misura che verrà utilizzato per le valutazioni sperimentali) nella direzione y a distanze dal sistema di bobine variabili da 30 a 80 cm con passo di 5 cm.

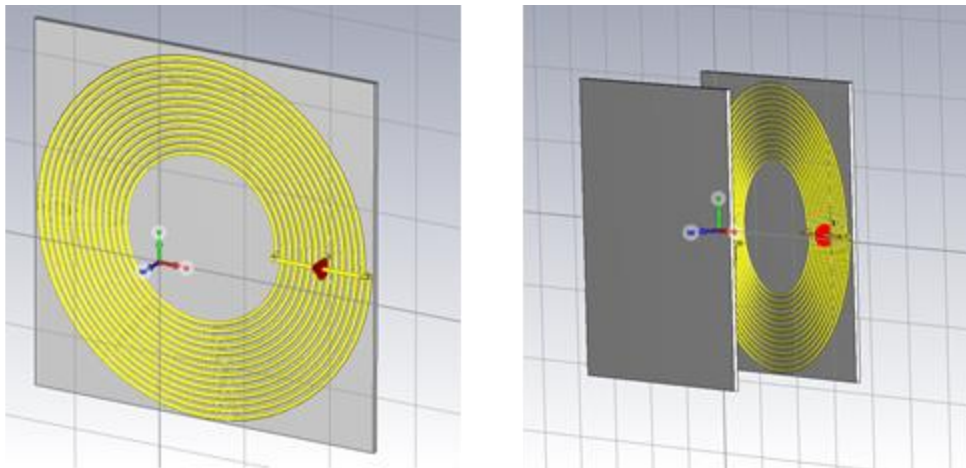


Figura 20: modello della versione finale della singola bobina e delle bobine accoppiate

Tabella 17: Valori di campo B valutati a diverse distanze dal sistema di bobine

| Posizione [cm] | B [μ T] |
|-------------------|-----------------|
| 30 | 51.0 |
| 35 | 38.1 |
| 40 | 28.5 |
| 45 | 23.0 |
| 50 | 18.3 |
| 55 | 14.2 |
| 60 | 11.0 |
| 65 | 9.3 |
| 70 | 8.2 |
| 75 | 7.2 |
| 80 | 3.1 |

Dalla Tabella 1 il sistema è conforme se non si supera il valore di picco pari a $8.8 \mu\text{T}$ (valore efficace di tabella 1 * 1.41). Come si vede a 70 cm la conformità è garantita, purtuttavia le dimensioni dell'auto su cui il sistema sarà montato sono tali che una persona può trovarsi anche a distanze minori di 70 cm dal sistema, pertanto è stato necessario fare delle valutazioni dosimetriche.

Il solutore EM Studio di CST è in grado di importare il modello CAD di donna realizzato nell'ambito del Visible Human Project [15]. Il modello è costituito da 26 tessuti e da 216 parti diverse per un grigliato a tetraedri costituito da un totale di circa 160000 facce triangolari. Questo modello è stato ottimizzato per le simulazioni con il solutore FEM in bassa frequenza. Ai tessuti sono state associate le proprietà dielettriche ad 85 kHz. Il modello è stato posto a una distanza di 50 cm dal sistema di bobine posizionate al livello dei piedi (Figura 21).

In Figura 22 sono mostrati i valori di densità di corrente indotta nel modello numerico dal sistema V2H operante alla massima potenza. I valori di J sono visualizzati sul piano sagittale e sul piano centrale frontale del modello con un fondo scala pari a $0,24 \text{ A/m}^2$ pari al limite di base (di picco) definito in [11]. Come si può vedere, in questo caso, in nessun punto del modello ci sono superamenti del limite di base.

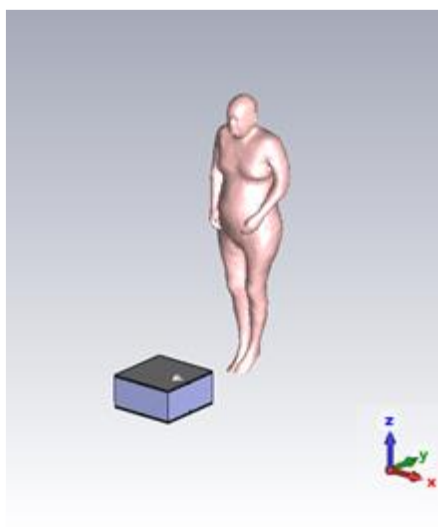


Figura 21: modello delle simulazioni effettuate per la dosimetria del sistema V2H

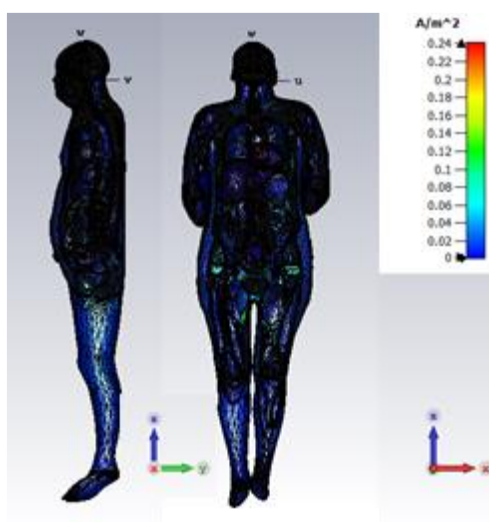


Figura 22: valori di J indotto dal sistema V2H mostrati sui piani sagittale e centrale frontale del modello (fondo scala 0.24 A/m²)

Solo per valori dieci volte inferiore al limite (0.024 A/m²) ci sono aree del modello numerico in cui sono presenti dei superamenti (Figura 23).

È quindi evidente come a fronte di un superamento dei livelli di riferimento a 50 cm dalla sorgente, le valutazioni dosimetriche confermano un non superamento del limite di base definito in [11], pertanto, in queste condizioni l'esposizione risulta conforme.

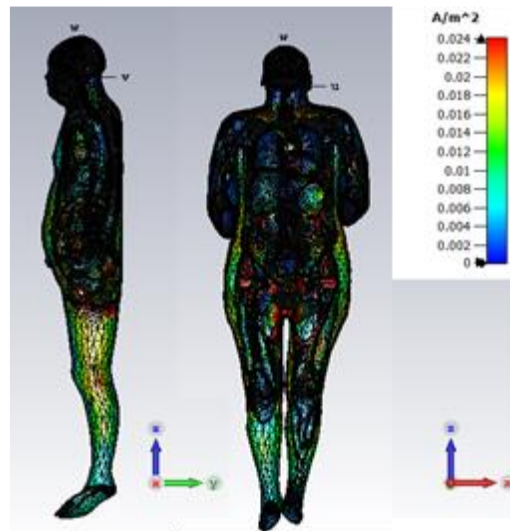


Figura 23: valori di J indotto dal sistema V2H mostrati sui piani sagittale e centrale frontale del modello (fondo scala 0.024 A/m²)

1.4.2 Dosimetria del sistema WPT dinamico ottimizzato

Analogamente a quanto fatto per il sistema V2H è stata fatta anche la dosimetria per il sistema WPT dinamico ottimizzato in [5].

Il modello è presentato in Figura 24, anche in questo caso è stato importato il modello CAD di donna posto a una distanza di 40 cm dal sistema di bobine posizionate al livello dei piedi. A 40 cm dal sistema ottimizzato in [5] il valore di campo magnetico B superava il livello di riferimento imposto in [6, 11], pertanto si è resa necessaria una valutazione dosimetrica del sistema.

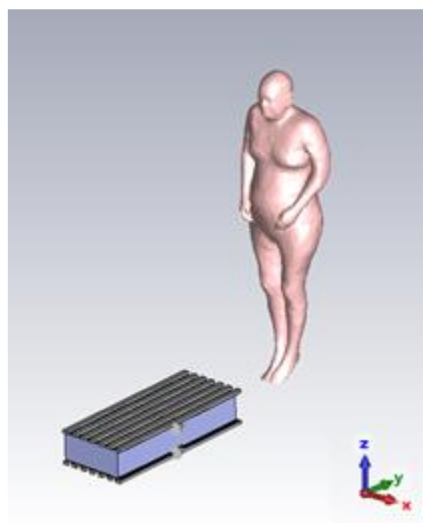


Figura 24: modello delle simulazioni effettuate per la dosimetria del sistema V2H

Nella Figura 25 sono mostrati i valori di densità di corrente indotta nel modello nei piani sagittale e frontale centrale del modello stesso. I valori di J hanno un fondo scala pari a 0.24 A/m^2 pari al limite di base (valore di picco) definito in [11].

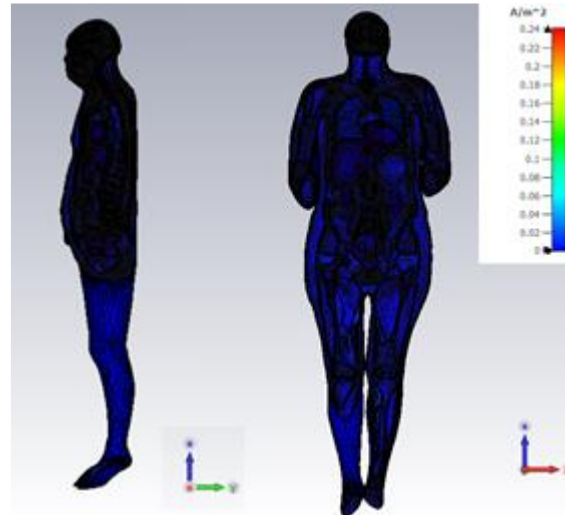


Figura 25: valori di J indotto dal sistema WPT dinamico mostrati sui piani sagittale e centrale frontale del modello (fondo scala 0.24 A/m^2)

È evidente come, in queste condizioni, non ci siano superamenti dei limiti di base all'interno del modello. Solo quando il fondo scala è posto a un valore 100 volte inferiore al limite, sono evidenti delle zone del corpo in cui ci sono dei superamenti (Figura 26).

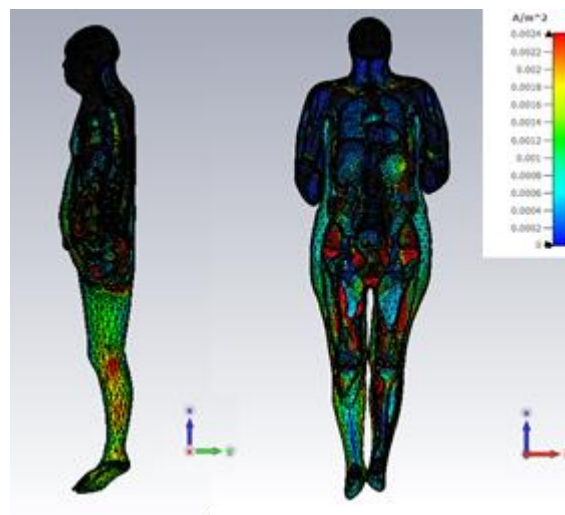


Figura 26: valori di J indotto dal sistema WPT dinamico mostrati sui piani sagittale e centrale frontale del modello (fondo scala 0.0024 A/m^2)

Anche in questo caso è quindi evidente che, a fronte di un superamento dei livelli di riferimento riscontrato in [5], le valutazioni dosimetriche hanno confermato che non ci sono superamenti dei limiti di base, pertanto, in queste condizioni, l'esposizione al sistema risulta conforme.

2 Conclusioni

Il lavoro svolto durante questa annualità ha permesso di completare quanto previsto per la valutazione dell'esposizione ai CEM in vari scenari di esposizione legati alla mobilità elettrica; nello specifico le auto elettriche, le cabine di ricarica veloce e i sistemi di WPT.

Per quanto riguarda i veicoli elettrici la possibilità di eseguire le valutazioni di esposizione ai campi magnetici presenti all'interno dell'abitacolo durante la marcia dell'auto su strada è stata ritenuta inopportuna e inutile allo scopo. Infatti, la presenza di consistenti gradienti di campo B all'interno del veicolo rende necessaria una valutazione dell'esposizione su più punti di misura, che devono essere valutati durante cicli di guida il più possibile riproducibili tra di loro e quindi, di fatto, quasi impossibili da ottenere durante la guida su strada, a meno di fare molte misure nello stesso punto. Per lo stesso motivo, l'identificazione di una posizione peggiore per l'esposizione risulta molto più laboriosa e nel contempo la simulazione di scenari peggiori per l'esposizione, quali l'accelerazione improvvisa o la frenata brusca del veicolo, non può essere eseguita su strada in una condizione di sicurezza per gli operatori. Inoltre le valutazioni dello scorso anno [1] avevano evidenziato una serie di criticità che è stato necessario approfondire per posizionare l'ENEA come uno dei pochi enti in Italia in grado di eseguire questo tipo di valutazioni con un protocollo di misura definito. A questo scopo, si sono eseguite campagne di misura presso l'impianto VELA9 del JRC di Ispra e il banco a rulli presente presso i laboratori del CR Casaccia su due veicoli elettrici molto diversi tra loro in termini di prestazioni. In conclusione si è dimostrata la bontà del protocollo messo a punto in [1] per la caratterizzazione di questo scenario di esposizione e si sono evidenziate le caratteristiche che deve avere la strumentazione di misura per la valutazione dell'esposizione in questa tipologia di scenario, caratterizzato dalla presenza di segnali complessi e impulsivi che generano considerevoli gradienti spaziali di campo B. Inoltre, è stato possibile concludere che, per quanto un impianto come VELA9, completamente schermato ai campi magnetici e elettrici esterni, rappresenti una soluzione ottimale, seppur molto costosa, per questo tipo di valutazioni, l'utilizzo di un banco a rulli di laboratorio può rappresentare una buona alternativa.

Nel caso del veicolo ad alte prestazioni (VE#1 al JRC), sono stati rilevati dei superamenti dell'IPP nelle due posizioni corrispondenti alla posizione dei piedi del conducente e del passeggero. In questo caso, in accordo con il protocollo, si è tenuto conto della metrica di esposizione introdotta dal CEI [14], pari alla media su tre punti a diverse altezze. Tenuto conto che per ogni passeggero si sono misurate tre diverse posizioni, corrispondenti alle posizioni dei piedi, del torace e della testa, si è eseguita una media degli IPP valutati su questi tre punti ottenendo un IPP medio di 67 per il conducente e di 57 per il passeggero, confermando la conformità dell'esposizione. Questa valutazione è stata fatta anche nell'ottica di protezione per i portatori di dispositivi medici impiantabili che possono subire dei malfunzionamenti in presenza di campi magnetici.

Il corretto funzionamento di questi dispositivi è garantito qualora non siano superati i livelli di esposizione stabiliti per la popolazione in [7]. Tenuto anche conto che il superamento locale del limite di campo B è in corrispondenza dei piedi, dove non sono posizionati questo genere di dispositivi si può concludere che, anche nel caso del veicolo più performante, l'esposizione ai campi magnetici presenti all'interno del veicolo non rappresenti un pericolo per i portatori di dispositivi medici impiantabili.

Per quanto riguarda le stazioni di ricarica, il protocollo di misura messo a punto in [1-3] durante la campagna di misura al JRC è stato applicato per la valutazione dell'esposizione di una stazione di ricarica a 32 kW eseguita all'interno della camera anecoica presente nei laboratori del CR Casaccia. Queste misure hanno confermato la validità del protocollo di misura nel caratterizzare l'esposizione a questo tipo di sorgenti a protezione anche dei portatori di dispositivi medici impiantabili e hanno dimostrato la fattibilità di misura di questo tipo di sorgenti anche all'interno dei nostri laboratori.

Sui sistemi WPT sono stati eseguiti delle valutazioni preliminari di dosimetria numerica utilizzando i due modelli numerici ottimizzati di bobine (il sistema V2H e il sistema WPT dinamico) messi a punto in [1, 5].

La validazione sperimentale dei modelli ottimizzati è passata attraverso il confronto dei dati di impedenza sul sistema di bobine per il V2H [6] e il confronto con le misure sperimentali di campo B per il sistema WPT dinamico [5]. In entrambi i casi si era evidenziato un superamento dei livelli di riferimento definiti in [11] fino a una distanza di 70 cm per il sistema V2H e fino a una distanza di 50 cm dal sistema WPT dinamico. Per questo motivo è stato necessario fare delle simulazioni numeriche finalizzate alla determinazione delle grandezze dosimetriche interne da confrontare con i limiti di base in [11] espressi in termini di densità di corrente indotta. Per le simulazioni è stato utilizzato un codice di calcolo per la simulazione elettromagnetica in 3D, che ha un solutore quasi magnetostatico in bassa frequenza in grado di importare il modello CAD di donna realizzato nell'ambito del Visible Human Project [15] e costituito da 26 tessuti distinti. I modelli umani sono stati posti a una distanza di 50 cm dal sistema V2H e a 40 cm dal sistema WPT dinamico. In queste condizioni non sono stati rilevati dei superamenti dei limiti di base per nessuno dei due sistemi, confermando la conformità dell'esposizione.

A conclusione di questi tre anni di attività sono stati messi a punto i protocolli di misura per la valutazione dei CEM emessi dalle stazioni di ricarica e presenti all'interno dei veicoli elettrici. Questo lavoro ha dotato l'ENEA di competenze e strumentazione adeguate allo scopo e ha visto l'utilizzo di impianti presenti all'interno del CR Casaccia pensati per altre attività e che si sono dimostrati adatti anche a questo uso. Si sono inoltre acquisite competenze per il progetto, la caratterizzazione numerica e sperimentale dei dispositivi di WPT ai fini della protezione della popolazione dai campi magnetici emessi da questo tipo di strutture. Tutto questo posiziona l'ENEA come uno dei pochi enti in Italia in grado di eseguire questo tipo di valutazioni con un protocollo di misura definito, rendendo i nostri laboratori un possibile punto di

riferimento in questo ambito per le industrie che si occupano di mobilità elettrica e per le amministrazioni locali (nel caso delle stazioni di ricarica installate sul territorio e dei veicoli pubblici elettrici).

Ringraziamenti

Gli autori di questo report desiderano ringraziare l'Ing. Fernando Ortenzi del laboratorio TERIN-PSU-STMS per il fondamentale supporto offerto durante le misure eseguite presso il banco a rulli del CR Casaccia.

3 Riferimenti bibliografici

1. R. Pinto, L. Ardoino, P. D'Atanasio, P. Zambotti 'Dimensionamento bobine di accoppiamento del V2H wireless e misura dei CEM da diverse sorgenti' 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 - II annualità.
2. 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
3. G. Trentadue, R. Pinto, M. Salvetti, M. Zanni, K. Pliakostathis, H. Scholz, G. Martini, "Assessment of Low-Frequency Magnetic Fields Emitted by DC Fast Charging Columns" *Bioelectromagnetics*, 41 (4), pp. 308-317, 2020.
4. R. Pinto, A. Zambotti, "Caratterizzazione delle emissioni elettromagnetiche di una colonnina di ricarica veloce per veicoli elettrici" Rapporto tecnico nell'ambito del progetto 'D.7 Mobilità elettrica sostenibile' definito nell'accordo di programma MISE-ENEA (RSE)- ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2016-2019 - II annualità.
5. 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.
6. Report RDS/PTR 2021/198.
7. 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.
8. Legge 22 febbraio 2001 n. 36, "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici"
9. 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.
10. 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.

11. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Phys.*, vol. 74, (1998), pp. 494–522.
12. 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,
13. CEI EN 62233, Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure.
14. R. Pinto, G. Trentadue, M. Zanni, G. Martini, "Assessing Magnetic Fields in Electrified Vehicles: An Exploratory Campaign" *SAE Technical Papers*, (2021), DOI: 10.4271/2021-01-0152.
15. M.J. Ackerman, "The Visible Human Project", *Proc. IEEE.*, vol. 86, pp. 504-511, March 1998.