



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

La ricarica induttiva dei veicoli elettrici e la valutazione dell'esposizione umana

Original

La ricarica induttiva dei veicoli elettrici e la valutazione dell'esposizione umana / Zucca, Mauro. - In: DOSSIER AMBIENTE. - n. 136:(2021), pp. 111-127.

Availability:

This version is available at: 11696/72190 since: 2021-12-16T11:56:12Z

Publisher:

Associazione Ambiente e Lavoro

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)



IV Trimestre 2021
anno XXXIV

Dossier n° 136 Ambiente

Trimestrale dell'Associazione Ambiente e Lavoro fondato da Rino Pavanello
Direttore Norberto Canciani
Direttore Responsabile Vincenzo Moriello

*ISSN 1825-5396

Anno XXXIV - Dossier Ambiente: Via Privata della Torre, 15 - 20127, Milano - Poste Italiane S.p.a. - Sped. in a.p. D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1 - DCB MILANO
In caso di mancato recapito restituire al Cmp di Milano Roserio per la restituzione al mittente.



CEM

ESPOSIZIONE UMANA AI CAMPI ELETTROMAGNETICI: COSA E COME STA CAMBIANDO?

**A cura di Laura Filosa
e Vanni Lopresto**

**Con la collaborazione di
Sara Adda, Tommaso Aureli,
Davide Bavastro, Davide Capra,
Enrica Caputo, Stefano D'Elia,
Daniele Franci, Abdul Ahmad
Ghani, Fabriziomaria Gobba,
Enrico Grillo, Arianna Guarneri,
Alberto Modenese, Settimio
Pavoncello, Riccardo Suman,
Mattia Vaccarone, Mauro Zucca**

dal
1987

IV Trimestre 2021
anno XXXIV

Dossier n° 136 Ambiente

Trimestrale dell'Associazione Ambiente e Lavoro fondato da Rino Pavanello
Direttore Norberto Canciani
Direttore Responsabile Vincenzo Moriello

*ISSN 1825-5396

CEM

Esposizione umana ai campi elettromagnetici: cosa e come sta cambiando?

A cura di *Laura Filosa e Vanni Lopresto*

Con la collaborazione di *Sara Adda, Tommaso Aureli, Davide Bavastro, Davide Capra, Enrica Caputo, Stefano D'Elia, Daniele Franci, Abdul Ahmad Ghani, Fabriziomaria Gobba, Enrico Grillo, Arianna Guarneri, Alberto Modenese, Settimio Pavoncello, Riccardo Suman, Mattia Vaccarone, Mauro Zucca*

SOMMARIO

INTRODUZIONE

5

AUTORI

7

- | | |
|--|-----------|
| I. Valutazione e gestione dei rischi per la salute e la sicurezza derivanti dall'esposizione ai campi elettromagnetici (CEM) – una bussola per mantenere la giusta rotta sul campo
<i>Laura Filosa, Vanni Lopresto</i> | 13 |
| II. Il Decreto Legislativo 01.08.2016 n. 159: le modalità attuative, le possibili deroghe e le modalità di comunicazioni obbligatorie
<i>Abdul Ghani Ahmad</i> | 31 |
| III. La sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti a campi elettromagnetici: aspetti legislativi, particolare sensibilità al rischio, indicazioni per l'idoneità
<i>Laura Filosa, Fabriziomaria Gobba, Alberto Modenese</i> | 35 |
| IV. Esposizione ai campi elettromagnetici a frequenza industriale
<i>Davide Capra</i> | 57 |
| V. La valutazione dell'esposizione al campo magnetico generato da cabine di trasformazione MT/bt: criticità e indicazione di metodi
<i>Sara Adda ed Enrica Caputo</i> | 67 |

VI. Valutazione dosimetrica dell'esposizione ai CEM dei lavoratori durante interventi di manutenzione di linee elettriche in alta e altissima tensione <i>Arianna Guarneri, Davide Bavastro</i>	79
VII. Valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici generati dalle nuove tecnologie <i>Wireless Power Transfer</i> <i>Vanni Lopresto</i>	91
VIII. La ricarica induttiva dei veicoli elettrici e la valutazione dell'esposizione umana <i>Mauro Zucca</i>	111
IX. Il 5G e l'aggiornamento della normativa tecnica nazionale e internazionale sui campi elettromagnetici <i>Stefano D'Elia, Riccardo Suman</i>	129
X. Sviluppi della rete 5G: impatto dell'utilizzo del Dynamic Spectrum Sharing tra 4G e 5G sull'esposizione della popolazione <i>Sara Adda, Daniele Franci, Settimio Pavoncello</i>	139
XI. La procedura di estrapolazione per i segnali di telefonia mobile e l'applicazione alla tecnologia 5G <i>Daniele Franci, Settimio Pavoncello, Tommaso Aureli</i>	149
XII. Misure ambientali su segnali 5G: problemi aperti, nuove metodiche di misura e strumentazione a supporto <i>Settimio Pavoncello, Tommaso Aureli, Daniele Franci, Enrico Grillo</i>	159
XIII. Misura del campo elettromagnetico generato da segnali 5G mediante forzatura del traffico dati: una procedura a basso costo per la verifica del rispetto dei limiti <i>Mattia Vaccarone</i>	169

DOSSIER AMBIENTE

RIVISTA MONOGRAFICA TRIMESTRALE



VIII. La ricarica induttiva dei veicoli elettrici e la valutazione dell'esposizione umana

di Mauro Zucca

Il tema della ricarica induttiva è strettamente legato a quello dell'auto elettrica, la cui storia, contrariamente all'opinione corrente, è piuttosto datata in quanto il primo brevetto pertinente dell'americano Robert Anderson risale al 1832 e la prima batteria ricaricabile appare già nel 1880. A inizio 1900, in quanto a numerosità le auto elettriche superano le auto a combustione interna di un ordine di grandezza e in città come Londra e New York, a parte la trazione animale, il servizio taxi è erogato con veicoli elettrici. A inizio '900 a Chicago esiste già un servizio di ricarica per sostituzione della batteria (*battery swap*) sia per le automobili che per i camion, e nel 1905 Lohner e Porsche brevettano il primo veicolo ibrido con motori elettrici inizialmente sulle ruote anteriori, e successivamente sulle quattro ruote, implementando anche la frenata a recupero di energia. Nel 1908, l'ampliamento della rete stradale, la produzione da parte di Henry Ford dell'economica Model T con motore a combustione interna e gli scarsi progressi in merito alla capacità delle batterie, concorrono al declino dell'auto elettrica che ricompare con impeto solo un secolo dopo, preceduta dalle ricerche sui rover spaziali nella seconda metà del 1900 e dall'intuizione di costruttori come Tesla, Renault e BYD, per citarne alcuni. L'introduzione di nuove tecnologie come le batterie al litio, i nuovi motori a magnete permanente e gli azionamenti moderni, segnano le principali differenze con le

antenate elettriche di inizio '900. Tuttavia, a distanza di molti lustri, la ricarica dei veicoli elettrici rimane un tema cruciale per la loro diffusione. In questo momento, in Europa ci sono poco meno di quaranta modelli di veicoli elettrici sul mercato, in rapida crescita. La loro autonomia è mediamente tra i 350 e i 400 km (alcuni veicoli per la città hanno autonomie limitate a meno di 250 km, sebbene alcuni modelli di punta raggiungano i 600-850 km), mentre l'autonomia media di un veicolo a carburante si aggira sui 950 km. Inoltre l'autonomia teorica di un veicolo elettrico decresce a causa di svariati fattori come la velocità e l'accelerazione, le temperature estreme, l'uso del condizionamento. Ciò significa che l'auto elettrica va caricata almeno due volte per la stessa percorrenza, rispetto al singolo rifornimento di carburante. I tempi di ricarica possono variare molto, da 15 minuti in una ricarica ultrarapida (se l'auto è predisposta) a diverse ore in una ricarica domestica. Queste considerazioni rendono interessanti altre tecnologie, come la ricarica a pantografo o a scorrimento per i veicoli pesanti, il *battery swap* (specie se il veicolo percorre molti chilometri al giorno) e la ricarica induttiva o *wireless*, di cui parliamo in questo articolo.

Nonostante gli esperimenti di Tesla all'inizio del 1900, la vera svolta nella trasmissione *wireless* dell'energia elettrica arriva nel 2007 dall'articolo di André Kurs e colleghi, tra i fondatori della società Witricity, dal titolo

“Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances” pubblicato sulla rivista Science [1]. L'accoppiamento risonante rende la trasmissione dell'energia molto più efficiente, sebbene l'efficienza decresca comunque con la distanza. Negli stessi anni comincia la ricerca riguardo i sistemi di ricarica wireless e già nel 2010, in Corea, compare la prima linea di autobus a ricarica induttiva detta Online Electric Vehicle (OLEV) [2]. Ad oggi, la ricarica induttiva dei veicoli elettrici, ormai riconosciuta a livello internazionale col nome di wireless power transfer (WPT), risulta essere una delle tecnologie più nuove e promettenti per la ricarica dei veicoli elettrici, offrendo anche la possibilità di una forte integrazione con i sistemi futuri di guida autonoma. La ricarica WPT propone una ricarica diffusa e comoda, in quanto l'autista può ricaricare il veicolo ai parcheggi, al semaforo, presso l'autorimessa di casa, o anche guidando, se la strada è predisposta, senza preoccuparsi di collegare alcun cavo. La ricarica frequente, inoltre, comporterebbe l'adozione

di batterie di dimensioni ridotte e quindi un minor costo dell'auto e anche un minor peso, con conseguenti minori consumi. Per contro, occorre considerare il fatto che il rendimento della trasmissione dell'energia non è unitario, che per la ricarica dinamica sono necessari cospicui investimenti e che è altresì necessario valutare l'esposizione umana ai campi magnetici.

ARCHITETTURA DI UN SISTEMA DI RICARICA WPT

L'architettura di un sistema di ricarica induttiva è schematizzato dalla **Figura 1**. L'energia elettrica viene prelevata dalla rete (grid) e tramite una doppia conversione (AC-DC e DC-AC) avviene la trasformazione da energia elettrica a frequenza di rete in energia elettrica alla frequenza di risonanza f_r , che è pari a decine di kilohertz. Tipicamente la frequenza f_r è compresa tra i 20 e i 30 kHz per i veicoli pesanti ed è pari a 85 kHz, con una certa tolleranza ($79 \text{ kHz} < f_r < 90 \text{ kHz}$), per i veicoli leg-

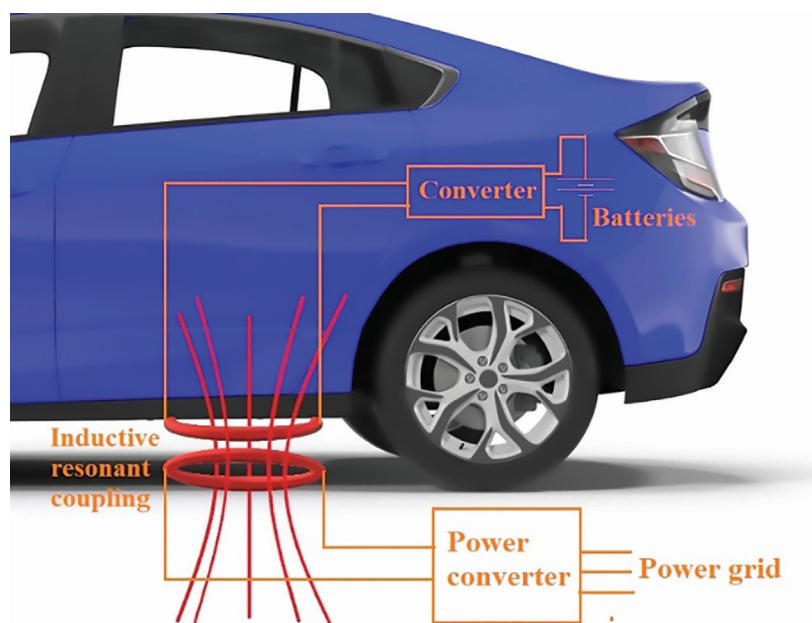


Figura 1 – Esempio di schema di un sistema di ricarica WPT. La trasmissione può essere anteriore, centrale o pressoché centrale, come in questo caso, posteriore o ibrida, ovvero avvenire in due o più punti della carrozzeria.

geri e segnatamente per le automobili, come stabilito da una delle norme di riferimento in questo settore che è la SAE TIR J2954 [3]. L'energia alla frequenza f_p , fluisce nel circuito risonante della bobina trasmittente e per accoppiamento magnetico raggiunge la bobina ricevente, anch'essa inserita in un circuito risonante che si accorda alla frequenza f_p . L'energia subisce quindi una conversione AC-DC, talvolta con un ulteriore stadio di regolazione DC-DC, e quindi raggiunge le batterie per la ricarica.

Dal punto di vista elettrico la **Figura 2** rappresenta meglio il sistema di trasmissione, che vede una parte a terra con l'allaccio alla rete e i convertitori, dove la bobina trasmittente è un "pad" da installare nell'autorimessa di casa, oppure si trova in strada ed è interrata sotto l'asfalto. Questa parte prende il nome di Insieme di Terra (Ground Assembly, o GA). La parte a bordo, che include la bobina ricevente, prende il nome di Insieme di Bordo (Vehicle assembly, o VA). Le due parti dialogano con un protocollo di comunicazione, anche perché l'erogazione di potenza deve avvenire unicamente quando il veicolo è parcheggiato con le due bobine, trasmittente e ricevente, allineate. Diversamente, oltre allo spreco di energia, ci potrebbe essere anche una inutile esposizione umana al campo magnetico generato dal sistema GA.

Per aumentare l'efficienza della trasmissione e ridurre il campo magnetico disperso nell'intorno delle bobine e quindi, incidentalmente, per diminuire anche l'esposizione umana al campo magnetico prodotto, le bobine riceventi e trasmettenti sono dotate di concentratori realizzati in ferrite o in acciaio elettrico dolce, e di schermi realizzati in maglia di rame o in lastre di alluminio. La tipica struttura di un pad di ricarica è illustrata in [3]. Ogni bobina è costituita da almeno cinque parti, come riportato nella rappresentazione esplosa di **Figura 3**. Il sistema della bobina ha dimensioni dell'ordine di 40 cm di lato mentre lo schermo dell'ordine di 80 cm di lato.

I sistemi di ricarica WPT vengono classificati secondo due classi di appartenenza. La prima classe riguarda la potenza trasmessa, mentre la seconda riguarda la distanza tra le bobine. In base alla potenza trasmessa vi sono 5 classi dette WPT; la classe WPT1 identifica i sistemi con potenza nominale fino a 3.7 kW, la WPT2 fino a 7.7 kW, la WPT3 fino a 11.1 kW, la WPT4 fino a 22 kW e la WPT5 quelli di potenza superiore a 22 kW. In merito alla distanza tra le bobine vi sono tre classi dette classi Z. Il discorso è più complesso ma per semplificare, la classe Z1 è per distanze fino a 15 cm, la Z2 per distanze fino a 21 cm, la Z3 per distanze fino a 25 cm. I parametri della classificazione

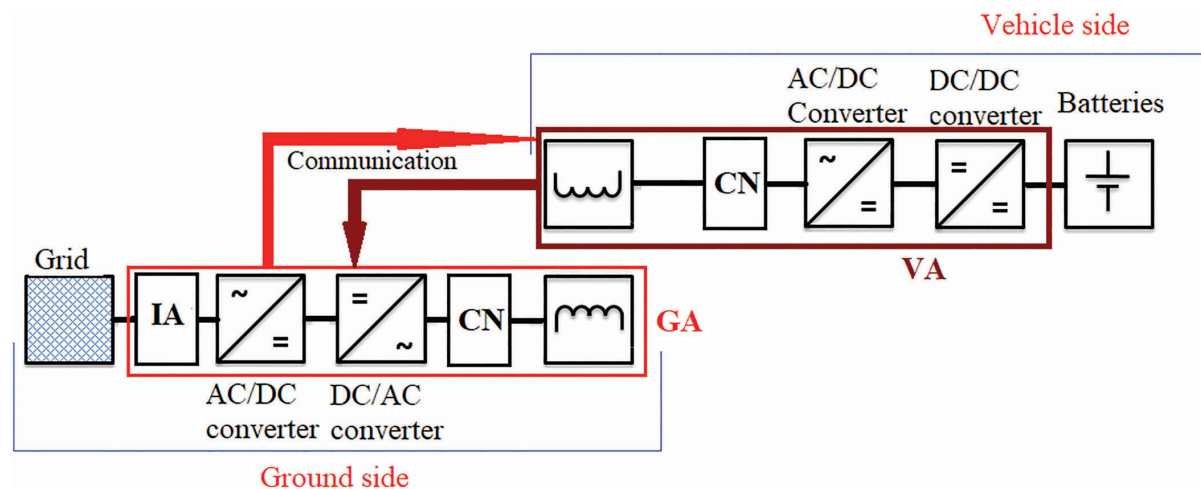


Figura 2 –Rappresentazione a blocchi di un sistema di ricarica induttiva statico.

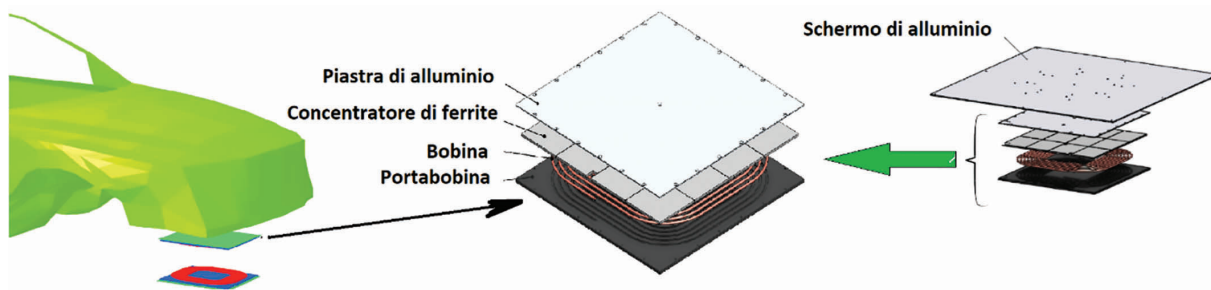


Figura 3 – Rappresentazione esplosa inerente la costituzione di una bobina ricevente. La bobina trasmittente è del tutto analoga.

vengono talvolta rivisti con l'aggiornamento delle norme.

LA RICARICA WPT DINAMICA

La ricarica dinamica avviene mentre il veicolo è in movimento e quindi mentre si guida, ed è appunto ciò che gli anglosassoni chiamano “charge while driving”. La ricarica avviene mentre la bobina ricevente transita sopra la bobina trasmittente e per aumentare la finestra temporale di carica, le bobine sono più lunghe rispetto a quelle della ricarica statica. Sebbene non esista ancora uno standard condiviso per questo tipo di bobine, sulla base dei progetti di ricerca conclusi ad oggi, possiamo pensare che la lunghezza sia dell'ordine di 1.50 m. A 70 km/h (19.44 m/s) il tempo di transito o sorvolo per questa lunghezza è

pari a 77 millisecondi, a 40 km/h (11.11 m/s) il tempo di sorvolo è di 135 ms. Pertanto possiamo dire che la ricarica dinamica avviene per tempi dell'ordine di un centinaio di millisecondi. Per avere un effetto di ricarica più significativo, vengono installate un certo numero n di bobine trasmettenti collegate allo stesso impianto, come nello schema di **Figura 4**, di modo che la ricarica si ripeta più volte in uno stesso tratto di strada. Anche in questo caso è importante il ruolo del controllo che deve alimentare ciascuna bobina trasmittente unicamente quando il veicolo, e quindi anche la bobina ricevente, iniziano a sovrapporsi e la deve disalimentare dopo il tempo di sorvolo. La discussione dell'esposizione umana nella ricarica dinamica è piuttosto complessa e richiederebbe una trattazione specifica non affrontata in questa sede.

Piano asfalto

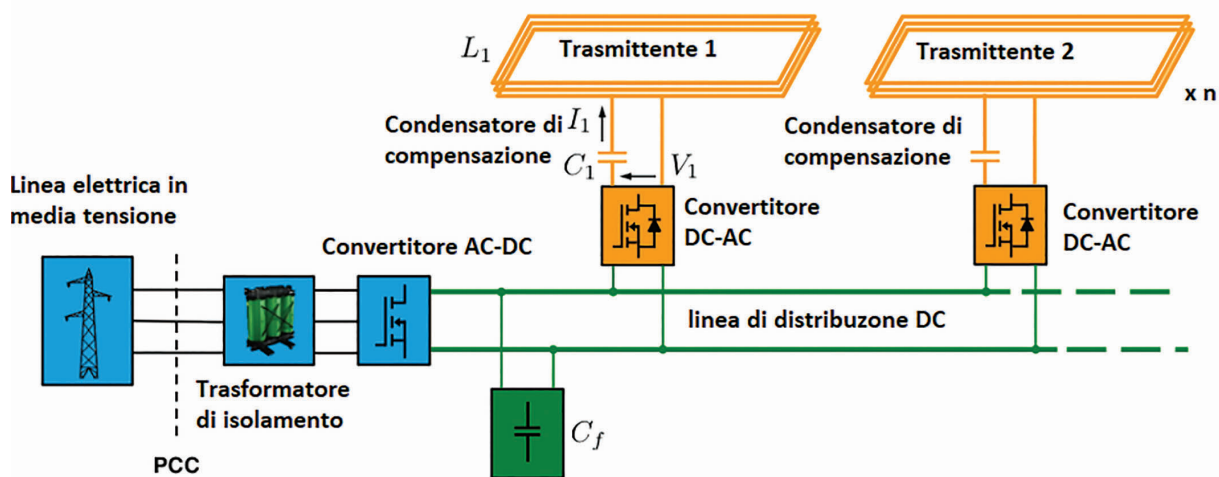


Figura 4 – Schema di stazione per ricarica dinamica con una serie di n bobine trasmettenti.

RISCHI FISICI PER LE PERSONE NELLA RICARICA STATICA

I componenti del veicolo in un sistema WPT devono essere progettati in base ai requisiti di sicurezza funzionale specificati nella norma ISO 26262 [4] relativa ai possibili rischi causati dal malfunzionamento dei sistemi elettrici di sicurezza, compresa l'interazione con i sistemi WPT. Prima e durante il trasferimento di potenza, è importante rilevare eventuali oggetti estranei (Foreign Objects) quali fogli conduttivi, ritagli di lamiera, oggetti metallici come lattine ed altro, che inserendosi tra le bobine potrebbero essere riscaldati durante la ricarica raggiungendo una temperatura pericolosa per l'innescio di incendi. Soprattutto, è importante prevenire un'esposizione umana non conforme ai campi elettromagnetici. Innanzitutto va evitata l'esposizione in caso di circostanze insolite, come ad esempio se ci si posiziona sotto il veicolo durante la ricarica. La zona in prossimità delle bobine, sotto il veicolo, presenta infatti campi magnetici molto intensi e occorre siano installati dispositivi per il rilievo di prossimità (tipicamente sensori a ultrasuoni) che interrompono il flusso di energia nel caso di presenza di una persona che vada ad infilarsi sotto il veicolo [3]. Occorre quindi valutare l'esposizione umana al campo magnetico nelle altre zone intorno e all'interno del veicolo. Il campo magnetico generato dal sistema di ricarica ha la frequenza delle correnti elettriche che lo generano, che sono quelle nei circuiti risonanti. Siamo quindi ad una frequenza inferiore ai 100 kHz, dove l'esposizione prevalente è quella al campo magnetico e gli effetti acuti possono essere quelli di stimolazione nervosa dovuta ai campi elettrici indotti, e non tanto quelli di riscaldamento dei tessuti. Il campo elettrico generato dalla tensione applicata ai sistemi WPT è trascurabile riguardo l'esposizione umana. Per quanto attiene al campo magnetico, le emissioni di un sistema di ricarica induttiva sono prevalentemente localizzate nell'intorno delle bobine ricevente e trasmittente.

La valutazione del campo magnetico deve seguire l'indicazione di diverse norme e linee guida. Certamente il principale riferimento è costituito dalle linee guida ICNIRP 2010 [4] e dalla direttiva europea 2013/35/EU [5]. Entrambi i documenti specificano i limiti delle grandezze misurabili di campo magnetico in aria, e i limiti, più complessi da determinare, di intensità di campo elettrico interno nel corpo umano. Tali quantità sono definite con termini diversi dai due documenti, come riassunti dalla **Tabella 1**. Nel seguito per semplificare, sebbene ICNIRP utilizzi termini diversi, chiameremo i limiti di campo magnetico misurabile in aria come valori di azione (VA) e chiameremo valori limite di esposizione (VLE) i limiti di intensità di campo elettrico indotto all'interno del corpo umano.

Per definire la conformità o meno delle emissioni di un sistema WPT per la ricarica dei veicoli elettrici esistono alcune norme che affrontano il problema.

1. IEC PAS 63184 ED1 [6]: "Assessment methods of the human exposure to electric and magnetic fields from wireless power transfer systems". Si tratta di una norma nuova del 2021, specifica per il WPT, che copre una gamma di frequenza che include sia i sistemi radiativi che i sistemi induttivi risonanti, come quelli per la ricarica dei veicoli trattati in questa sede. È uno standard generale e non specifico per la ricarica dei veicoli, per la valutazione dell'esposizione umana che fornisce principi e metodi, ma non entra nel dettaglio dei metodi per il WPT dei veicoli elettrici.
2. SAE TIR J2954 [3]. È lo standard di riferimento per il mondo automobilistico. Tratta tutti gli aspetti della ricarica induttiva dei veicoli, come layout generale, requisiti elettrici, compatibilità elettromagnetica, interoperabilità e anche esposizione umana.
3. IEC 61980 [7-9] "Electric vehicle wireless power transfer systems", consiste di tre parti: 61980-1 General requirements for

all inductive charging systems; 61980-2 Requirements for communication between EV and infrastructure with respect to WPT systems and 61980-3” Requirements for the magnetic field power transfer systems”. Come per il SAE TIR J2954 tutti gli aspetti rilevanti per la ricarica dei veicoli elettrici sono trattati.

4. ISO/PAS 19363 [10]: “Electrically propelled road vehicles, magnetic field wireless power transfer safety and interoperability requirements” (2017, aggiornato nel 2020). Come i precedenti due documenti si occupa in modo ampio della ricarica wireless dei veicoli elettrici, trattando anche l’esposizione umana.

Tra il settembre 2017 e il febbraio 2021 il progetto europeo MICEV, “Metrology for inductive charging of electric vehicles” coordinato dall’Italia e da INRIM in particolare [11], che ha visto la partecipazione di 13 partners da 9 paesi europei, si è occupato di WPT per la ricarica dei veicoli elettrici. Tra i vari risultati conseguiti, come la determinazione accurata dell’efficienza e della potenza trasferita, anche a scopi di tariffazione, il progetto si è anche occupato della corretta determinazione dell’esposizione umana. Il consorzio MICEV

ha quindi pubblicato una guida per la determinazione dell’esposizione umana, denominata “Best practice guide for the assessment of EMF exposure from vehicle Wireless Power Transfer systems” o brevemente BPG, che può essere scaricata gratuitamente dal sito del progetto [11-12]. La BPG presenta un inquadramento della situazione corrente, tentando una sintesi tra i risultati progettuali e le norme di cui ai punti da 1. a 4. precedenti. Il paragrafo che segue trae particolare ispirazione dalla BPG.

LA VALUTAZIONE DELL’ESPOSIZIONE UMANA

Per la popolazione generale, alla frequenza di 85 kHz i VA corrispondono ad un valore di induzione magnetica in aria pari a 27 μ T mentre i VLE, o restrizioni di base, corrispondono ad un campo elettrico indotto pari a 11,475 V/m. Questi valori fanno da riferimento per la valutazione dell’esposizione umana. Tuttavia, siccome un sistema di ricarica può essere utilizzato da chiunque, e tra gli altri anche da persone con dispositivi medici attivi impiantati (active implanted medical devices - AIMD), è necessario considerare anche questo particolare tipo di esposizione per la quale occorre

<i>Quantità</i>	<i>ICNIRP 2010</i>	<i>Direttiva EU 2013/35</i>
Intensità del campo elettrico all’interno del corpo E_i , cui sono soggette le cellule nervose e altre cellule elettricamente sensibili nell’organismo.	Restrizioni di base (sia EMF che correnti di contatto) (BR)	Valori limite di esposizione (VLE)
Campo magnetico misurabile (o induzione magnetica) nell’aria determinati mediante modelli matematici per condizioni di esposizione in cui la variazione del campo magnetico nello spazio occupato dal corpo umano è relativamente piccola, cioè esposizioni uniformi.	Livelli di riferimento (RL)	Valori di azione (VA)

Tabella 1 – Limiti di esposizione come definiti da ICNIRP e Direttiva 35/2013.

adottare limiti più stringenti, in accordo con la norma ISO 14117 [13], i cui criteri sono fatti propri anche da [3]. In [13] sono specificate quattro regioni di funzionamento degli AIMD: regione 1) normale funzionamento; regione 2) funzionamento non perturbato; regione 3) nessun danno o malfunzionamento permanente o regime di funzionamento indeterminato, e infine regione 4) regime di funzionamento indeterminato e/o possibile danno permanente. A scopi cautelativi, al fine di operare nelle regioni 1 e 2 sopra specificate, nella gamma di frequenze di interesse tra 10 kHz e 100 kHz i limiti specificati in [13] corrispondono ad un livello di induzione magnetica in aria (picco) minore o uguale a 15 μ T, limite che risulta essere più stringente rispetto ai VA.

<i>Quantità</i>	<i>ICNIRP 2010</i>	<i>AIMD</i>
VLE.	11,475 V/m	--
VA	27_T	15_T

Tabella 2 – Limiti di esposizione per il WPT dei veicoli elettrici.

Il processo di valutazione della conformità dell'esposizione umana al campo magnetico, tenuti presenti i limiti di **Tabella 2**, è sintetizzato dallo schema di **Figura 5**, il quale è preso a prestito direttamente da [6]. Tale processo prevede quattro vie alternative per valutare la conformità. Nel caso dei sistemi di ricarica induttiva per veicoli elettrici, occorre

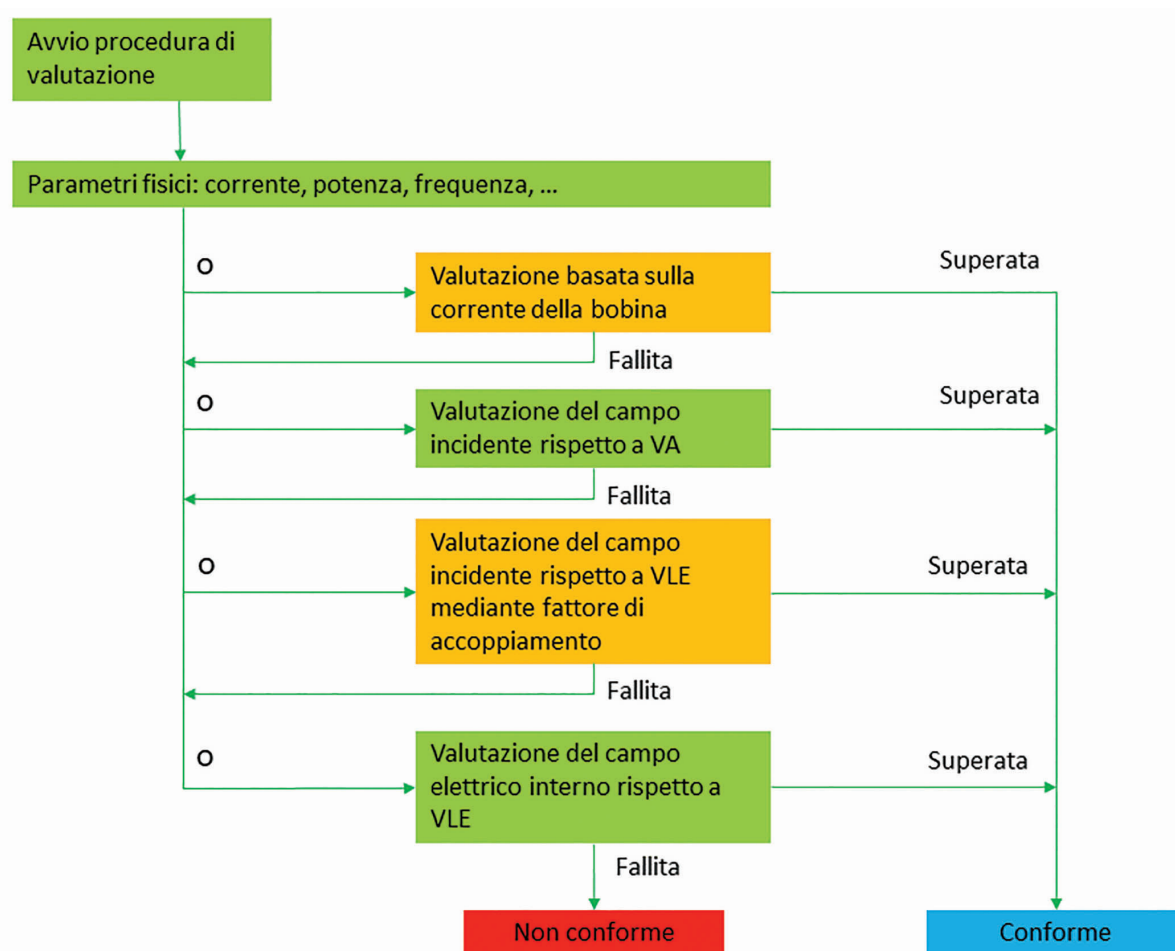


Figura 5 – Schema di verifica della conformità dell'esposizione al campo magnetico.

considerare che l'intensità e lo sfasamento tra le correnti elettriche nelle bobine forniscono un effetto non trascurabile al campo magnetico complessivo; che la distribuzione di campo dipende anche e fortemente dalla presenza di materiali magnetici come la ferrite, e da materiali conduttivi come rame e alluminio, e anche dalla carrozzeria del veicolo (o quantomeno dal pianale) che è usualmente costituita da lamiere e strutture di acciaio debolmente magnetico. Per questo motivo per tali sistemi, a parere di chi scrive, è piuttosto arduo arrivare ad una valutazione basata sulla sola corrente della bobina trasmittente oppure su una valutazione mediante i fattori di accoppiamento.

Nelle fasi di progetto, si possono effettuare uno o entrambi i passi della valutazione, utilizzando un modello delle bobine ricevente e trasmittente e, per quanto riguarda le valutazioni dosimetriche rispetto ai VLE, utilizzando modelli avanzati del corpo umano come i modelli cosiddetti "poseable", che possono cioè assumere posture specifiche come quella di un passeggero seduto o quella dell'autista [14]. Nel caso di una verifica ex post, ovvero a impianto realizzato, si può ricorrere a misure per la verifica dei VA e, nel caso di verifica fallita, ricorrere ai modelli numerici per la verifica dei VLE. È anche possibile ricorrere ai modelli numerici a partire da una mappa di misure sul campo.

VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE MEDIANTE MISURE

Molte delle norme citate danno indicazioni circa la misura di campo magnetico. A queste occorre aggiungere le norme IEC 61786-1:2013 [15] e IEC 61786-2:2014 [16] che descrivono la metodologia di base della misura di campo magnetico e i requisiti della strumentazione per misure di campo fino a 100 kHz.

Ci sarebbero molte cose da dire su questo tema ma, dato lo spazio di questo articolo, ci si limiterà ai concetti essenziali.

Predisposizione del sito: l'area di misura viene ricavata dal sito dove sono presenti il sistema di ricarica WPT e il veicolo. La misura va eseguita avendo un allineamento noto tra la bobina ricevente e trasmittente. Tipicamente, le misure sono effettuate con le bobine perfettamente allineate ed eventualmente, volendo essere conservativi, poste anche con il massimo disallineamento ammesso dal sistema di ricarica. Prima di eseguire la misura occorre rimuovere eventuali masse metalliche estranee e sorgenti di campo esterne al sistema di ricarica. È opportuna una misura del rumore ambientale.

Area di misura: le norme specifiche per la ricarica dei veicoli elettrici [3], [7-10] suddividono lo spazio del veicolo in tre regioni: la regione 1 che è il sottoscoocca, dove si trova il sistema di ricarica, che non deve essere accessibile e che deve essere protetta da dispositivi di prossimità che staccano l'alimentazione nel caso in cui una persona (e.g. un meccanico) si infili sotto la macchina durante la ricarica. La regione 2, che comprende lo spazio intorno al veicolo e la regione 3 che corrisponde all'interno del veicolo. L'area di misura comprende le regioni 2 e 3 dove la distanza dalla sorgente è sempre superiore ai 20 centimetri.

Strumentazione di misura del campo magnetico: per le misure di campo magnetico fino a 100 kHz occorre utilizzare uno strumento a sonda isotropa basato su bobine di campo. Questo tipo di strumenti è tanto più accurato quanto maggiore è l'area delle bobine di misura. Sul mercato vi sono strumenti con bobine aventi area da pochi cm² fino a 100 cm² e più. È necessario che la taratura dello strumento sia fatta quantomeno alla frequenza della componente preponderante di campo magnetico, segnatamente 85 kHz. In Italia INRIM, l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica di Torino, fornisce questo servizio di taratura tra i pochi in Europa, insieme a Regno Unito, Germania, Repubblica Ceca, Olanda e Polonia. Una taratura convenzionale a 50 Hz ovviamente non è adatta allo scopo.

Effetto di media del misuratore di campo magnetico: come si è detto in precedenza il misuratore di campo ha un'area non trascurabile, tipicamente 100 cm². È necessario stimare l'effetto di media del sensore anche con l'ausilio di modelli di calcolo.

Strumentazione per la misura delle correnti nelle bobine: la misura di campo magnetico ha significato se è nota l'entità delle sorgenti. A questo scopo è necessario misurare le correnti nelle bobine e il loro sfasamento. Questo può essere agevolmente fatto con un sistema bifase o trifase di bobine di Rogowski e un sistema di acquisizione, con una accuratezza dell'ordine dell'1%.

Sistema di posizionamento: il misuratore di campo magnetico AC deve essere posizionato con accuratezza in posizioni corrispondenti ai punti di misurazione. Questo può essere fatto manualmente, utilizzando riferimenti visivi, posizionati a terra e misurando le loro distanze da altri oggetti utilizzando strumenti di misurazione della distanza. Metodi più avanzati prevedono l'uso di un sistema di triangolazio-

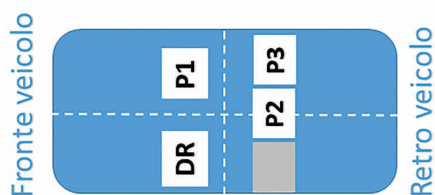
ne basato su sensori ottici o telecamere che consentono la ricostruzione della posizione della sonda in uno spazio 2D o 3D, come ad esempio in **Figura 6**.

Scelta delle posizioni di misura: uno schema delle posizioni da considerare è riportato in **Figura 7**. Se la bobina è posta anteriormente (posizione C1) occorrerà prestare maggiore attenzione ai passeggeri anteriori e ai passanti nella zona anteriore (B1, B2, e B3), se è posta posteriormente ai passeggeri e ai passanti posteriori (B5, B6 e B7) e se è posta centralmente uguale attenzione andrà dedicata a tutti i passeggeri e ai passanti a lato del veicolo (B3, B4 e B5). Va inoltre tenuto conto del fatto che alcuni costruttori si stanno orientando verso bobine doppie antero-posteriori ragionevolmente collegate in serie [17].

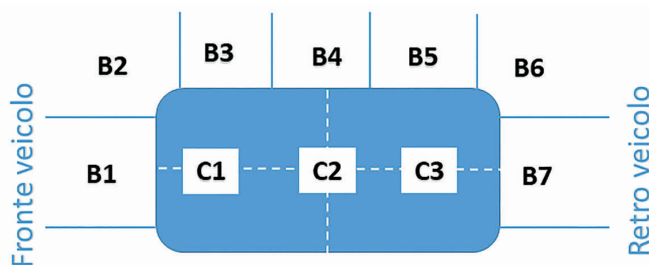
Per quanto riguarda i mezzi pesanti ed in particolare gli autobus, che presentano un maggior numero di passeggeri potenzialmente esposti, occorre tenere conto dei passanti e delle persone che si apprestano a salire sul mezzo, dei passeggeri sopra il mezzo e dell'autista.



Figura 6 – Esempio di sistema di posizionamento all'interno di un veicolo (progetto MICEV [11]).



Posizione dei passeggeri del veicolo



Posizione delle bobine e dei passanti

Figura 7 – Posizioni da considerare dei passeggeri e dei passanti (progetto MICEV [11]). DR sta per autista (driver), P per passeggeri, B per passanti (bystanders). C sta per bobina (coil).

Per i passanti o i passeggeri di un autobus, si considerano le seguenti altezze considerate rappresentative rispettivamente di caviglie, ginocchia, tronco e capo: 0.1 m, 0.5 m, 1.4 m, 1.7 m. Queste altezze rilevate dal piano strada, sono rappresentative dei passanti o delle persone che si accingono a salire, mentre rilevate dal pavimento del mezzo sono rappresentative dei passeggeri.

Per quanto riguarda il guidatore e i passeggeri seduti, i punti di misura devono essere in corrispondenza della posizione dei piedi al piano di calpestio, sulla seduta, a metà dello schienale e in corrispondenza del poggiatesta.

Presentazione dei risultati e valutazione dell'incertezza: i risultati della misura vanno confrontati con i VA tenendo in conto l'incertezza di misura. Quest'ultima potrà scaturire da molti fattori, ma certamente quelli imprescindibili saranno 1) l'incertezza di taratura, 2) l'incertezza di posizionamento (manuale o del sistema di posizionamento automatico), 3) l'effetto di media spaziale dovuto al volume del sensore e 4) la riproducibilità delle misure. La composizione di questi termini di incertezza fornirà quella totale che andrà poi presentata come incertezza estesa con fattore di copertura 2. Tutti i termini di incertezza si supporranno a distribuzione di probabilità normale, fatta eccezione per quella di posizionamento cui è comunemente associata una distribuzione di probabilità rettangolare.

CALCOLO DOSIMETRICO DELL'ESPOSIZIONE

Il ricorso ai modelli di calcolo avviene in fase di progetto oppure quando, dopo aver eseguito una campagna di misure, i livelli di induzione magnetica non risultino conformi ai VA. Stante la complessità del sistema fisico da modellizzare, che include la carrozzeria dell'automobile, difficilmente un unico codice di calcolo è idoneo a calcolare i livelli di induzione da confrontare con i VA, e anche le grandezze dosimetriche da confrontare con i VLE. Tipicamente si ricorre a codici di calcolo elettromagnetico commerciali 3D per il calcolo della distribuzione di induzione magnetica all'interno e all'esterno del veicolo, e a codici di calcolo dosimetrici per il calcolo del campo elettrico indotto nel corpo umano. L'utilizzo di due codici separati presuppone che l'effetto di perturbazione delle correnti elettriche indotte nel corpo umano sul campo magnetico ambientale sia trascurabile, condizione che è certamente verificata.

Nel calcolo dosimetrico si può anche seguire un approccio ibrido, effettuando un calcolo a partire da una distribuzione di induzione magnetica rilevata sperimentalmente. Tale distribuzione può anche essere determinata attraverso un calcolo; per un approfondimento in merito alle tecniche di soluzione del problema di campo magnetico si rimanda a [12]. Cito però due problemi significativi, che sono il

problema delle proprietà fisiche dei materiali, e in particolare della carrozzeria, e il problema di scala nella discretizzazione del modello fisico. Le proprietà fisiche dei materiali sono importanti affinché la simulazione fornisca un risultato attendibile. L'ideale sarebbe poter accedere a campioni di lamiera della carrozzeria al fine di determinarne la permeabilità magnetica relativa e la conducibilità. Nell'ambito del progetto [11] sono stati testati vari campioni di carrozzeria e si è stabilito che una permeabilità relativa di 300 e una conducibilità elettrica di 2 MS/m sono valori ragionevoli da poter assegnare. Attraverso metodi stocastici [18] si è anche verificato che una conducibilità della lamiera uguale o superiore a 1MS/m è sufficiente a fornire una buona schermatura magnetica.

Riguardo il secondo problema, occorre considerare che a 85 kHz l'effetto pelle determina spessori di penetrazione del campo dell'ordine dei decimi di millimetro. Pertanto la difficoltà è quella di avere discretizzazioni sub millimetriche nello spessore dei materiali conduttori, nell'ambito di un problema la cui scala è dell'ordine dei metri. Occorre quindi ricorrere

a opportune tecniche di meshing ed eventualmente a opportune condizioni al contorno, come le "Impedance Boundary Conditions" al fine di superare questo problema. Infine, al fine di evitare errori grossolani, occorre testare il proprio codice di calcolo e la propria abilità, modellizzando uno dei problemi di test proposti dalle norme o quello descritto in [12], Appendice D.

SCENARI CRITICI

Particolare attenzione va posta ad alcuni scenari critici dove la carrozzeria non fornisce un'ottima schermatura magnetica come invece avviene di solito. Ciò accade in alcuni modelli di veicolo che hanno carrozzerie realizzate in tutto o in parte in vetroresina, sostenute da alcuni profilati metallici. Tali pareti si presentano come trasparenti al campo magnetico a bassa frequenza. È importante assegnare le corrette proprietà fisiche alle varie parti della carrozzeria, al fine di non sottostimare l'induzione magnetica, specie all'interno dell'abitacolo.

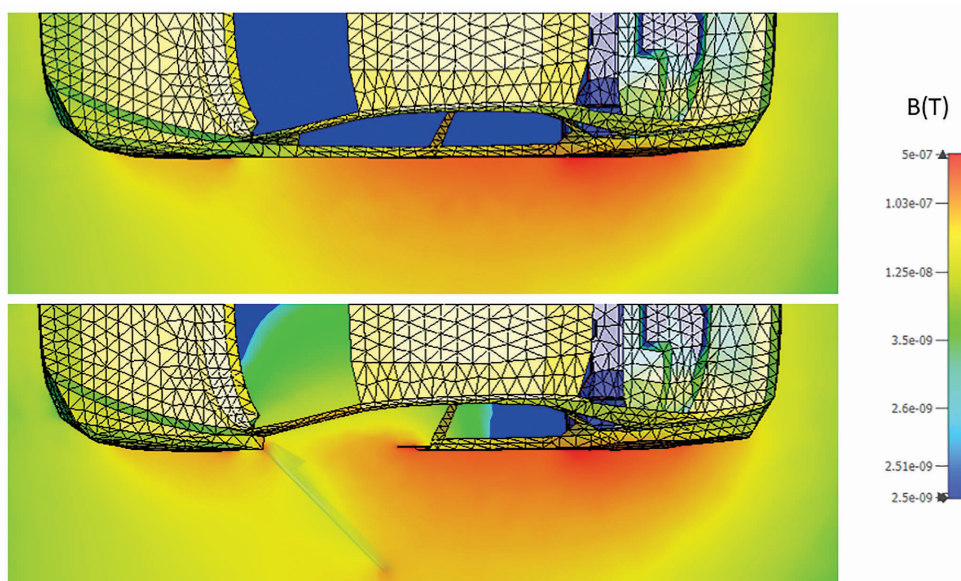


Figura 8 – Effetto dell'apertura della portiera del guidatore sui livelli di induzione magnetica (con bobine in posizione centrale sotto la carrozzeria). Le mappe dell'induzione magnetica B sono riportate all'altezza $z = 0,4$ m da terra: (a) a porta chiusa, (b) a porta aperta [19].

Attenzione va posta anche a tutte le interruzioni della continuità metallica, come importanti passaggi cavi, superfici vetrate, pareti in materiale plastico e così via, che alle frequenze considerate dal punto di vista del campo magnetico equivalgono ad aria. Infine vanno considerate anche le condizioni di utilizzo. Ad esempio, in un parcheggio per taxi, è necessario pensare che la ricarica possa avvenire anche con la portiera del conducente aperta. L'esposizione in questo caso non è la stessa che con la portiera chiusa (**Figura 8**).

SIMULAZIONI DOSIMETRICHE

Le simulazioni dosimetriche si basano sulla conoscenza della distribuzione delle grandezze di interesse nello spazio d'indagine (campo magnetico, induzione magnetica, potenziale vettore magnetico, ecc.) e sull'utilizzo di modelli anatomici evoluti.

I modelli anatomici utilizzati per la quantificazione dell'esposizione umana debbono essere rappresentativi della popolazione esposta. I parametri principali per l'identificazione dei soggetti esposti sono la massa corporea e l'altezza. Questi parametri definiscono la sezione trasversale esposta del modello anatomico, che è una delle grandezze più rilevanti per determinare l'esposizione. Tuttavia, alla variabilità dell'esposizione contribuiscono anche la complessa distribuzione delle proprietà elettriche all'interno del corpo (tessuti a bassa e alta conducibilità elettrica, come la pelle, il grasso, il cervello o i muscoli) o particolari posture del corpo che devono essere opportunamente considerate dal modello anatomico, come ad esempio la postura del guidatore, o quella di un neonato nell'"ovetto" utilizzato per il suo trasporto. Un gran numero di modelli anatomici accurati che coprono la fascia di età dell'intera popolazione è disponibile in [14]. Un database appropriato per le conducibilità dei tessuti è fornito in [20].

Come si accennava ai paragrafi precedenti, il calcolo elettromagnetico viene generalmente

effettuato con uno strumento di calcolo CAE (Computer Advance Engineering) dedicato, che utilizza un determinato sistema di riferimento. Successivamente, il modello anatomico assume la postura considerata e viene posizionato nel sistema di riferimento del modello CAE, il quale riceve una matrice \mathbf{M} di coordinate corrispondenti al centro degli elementi (voxel) della discretizzazione del modello anatomico. Il CAE associa alla matrice \mathbf{M} una matrice \mathbf{V} (o tre matrici di componenti), contenenti i valori della grandezza di interesse (e.g. induzione magnetica o potenziale vettore) che sarà poi utilizzata dal modello dosimetrico per calcolare le grandezze necessarie al confronto con i VLE. Questo non è ovviamente l'unico modo di operare ma, non avendo lo spazio per discuterne in questa sede, accenno solo al fatto che possono esserci altri approcci, che partono ad esempio da una interpolazione della distribuzione di campo o del potenziale vettore per fornire la matrice \mathbf{V} , o altri ancora che producono la matrice \mathbf{V} da una matrice di punti e risultati di misura.

Al calcolo dosimetrico è opportuno associare alcuni parametri di incertezza legati a:

1. risoluzione della mesh;
2. trattamento degli "hot spot";
3. conducibilità dei tessuti (si può riscontrare una variabilità fino al 25% sotto i 100 kHz);
4. dimensioni del dominio di calcolo e, nel caso, necessità di "ridurre" o troncare il modello umano;
5. convergenza del solver.

Anche per la simulazione dosimetrica è opportuno testare il proprio modello su un caso di prova. Riguardo i primi due parametri di incertezza, si può aggiungere qualche dettaglio.

- Risoluzione della mesh: la risoluzione della mesh del modello anatomico dovrebbe essere sufficientemente fine da evitare effetti dipendenti dalla mesh sul risultato della si-

mulazione. La risoluzione dovrebbe essere determinata mediante ripetute simulazioni dello stesso scenario d'esposizione fino al raggiungimento di una convergenza. In genere, la risoluzione della mesh non deve superare i 2 mm per la corretta rappresentazione dei dettagli anatomici del modello corporeo.

- È possibile eseguire una simulazione iniziale per identificare i cosiddetti "hot spot" nel corpo, dove il campo elettrico indotto è più elevato. La risoluzione spaziale nelle aree di questi "hot spot" può richiedere un'attenzione particolare. Infatti, le soluzioni numeriche calcolate su modelli basati su voxel sono solitamente affette da artefatti numerici, come lo "staircase error" che si riscontra al confine tra tessuti aventi diversa conducibilità. Questo fenomeno è stato discusso da diversi autori e può essere evitato con opportune tecniche di filtraggio [21]. Inoltre, possono verificarsi artefatti locali dovuti alla discretizzazione, che non sono presenti nel CAD originale del corpo umano; questi artefatti compaiono soprattutto in prossimità della pelle (con riferimento ai voxel di contatto pelle a pelle, vedi [22]).

PROTEZIONI DALLE CORRENTI DI CONTATTO

La corrente di contatto è un effetto indiretto dell'esposizione ai campi magnetici. Può essere calcolata, aspetto che non trattiamo in questa sede, oppure misurata. I limiti in merito alla corrente di contatto si applicano alla corrente che può fluire attraverso il corpo umano quando una persona entra in contatto simultaneo con due parti conduttive accessibili del veicolo o del sistema di ricarica, oppure con una parte conduttiva accessibile del veicolo o del sistema di ricarica, e la terra. Secondo le linee guida ICNIRP per la popolazione generale, nell'intervallo di frequenza da 2,5 a 100 kHz il limite espresso in milliampere r.m.s. ed è pari a $0.2 \cdot f$, dove f è la frequenza

espressa in kHz. A 85 kHz il limite è pari a 17 mA. Nel caso la verifica avvenga mediante misura, essa viene fatta mediante sensori amperometrici posizionati attorno alla caviglia o al braccio dello sperimentatore. I sensori sono collegati a un sistema di acquisizione per registrare la corrente indotta.

ESEMPIO DI VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE AL CAMPO MAGNETICO

Un esempio di valutazione dell'esposizione è stato sviluppato nell'ambito del progetto MICEV [11] ed è riportato in modo completo in [19]. Si sono analizzate due stazioni di ricarica di cui: 1) una stazione reale ubicata a Saragozza (Spagna) per veicoli pesanti, costituita dal sistema di ricarica con bobina trasmittente alla frequenza di 27.8 kHz e da un minibus portante la bobina ricevente, il quale presenta il pianale in metallo e la carrozzeria superiore in vetroresina. La stazione ha una potenza nominale di 50 kW. 2) Una seconda stazione di ricarica virtuale, cioè simulata, che utilizza la carrozzeria di un veicolo reale (Volvo S80) e ha potenza nominale di 22 kW alla frequenza di risonanza di 85 kHz. La stazione di ricarica è stata simulata con bobina ricevente posizionata al centro del veicolo (posizione WPT C2) e con bobina ricevente posizionata nella parte anteriore (posizione WPT C1).

Entrambe le stazioni sono state modellizzate con il software per il calcolo elettromagnetico Opera 3D di Dassault Systèmes, e nella prima stazione le simulazioni sono state validate per confronto con le misure. I calcoli dosimetrici sono stati realizzati con il software Sim4Life di ZurichMedTech, a partire dai risultati di Opera 3D. Per eseguire le simulazioni numeriche sono stati utilizzati i modelli della "Virtual Population" (ViP) [14]. Si sono scelti tre modelli anatomici avanzati ad alta risoluzione aventi indici di massa corporea (BMI) diversi: Charlie (neonato, BMI non definito), Thelionious (bimbo di 6 anni, BMI=13.8 kg/m²) e

Duke (adulto, BMI=22,4 kg/m²). Le proprietà dielettriche dei tessuti sono state assegnate secondo il database di IT'IS Foundation [20] rispettivamente a 27,8 kHz e 85 kHz. I modelli umani sono stati collocati vicino e all'interno dei veicoli elettrici nelle zone 1 e 2. La valutazione dell'esposizione è stata eseguita con i modelli umani collocati in posizione eretta di fronte alla portiera del veicolo e in altre posizioni sempre a ridosso della portiera del veicolo più prossima al sistema di ricarica e in particolare: accovacciati sulle ginocchia, seduti in prossimità del veicolo, sdraiati con un braccio teso verso il sistema di ricarica, seduti dentro il veicolo.

I calcoli abbinati alla sperimentazione nella prima stazione di ricarica hanno permesso di validare il codice di calcolo. I livelli di esposizione, come atteso, sono risultati conformi ai limiti ICNIRP 2010, tranne che nella situazione di un adulto accovacciato all'esterno del bus, all'altezza del sistema di ricarica. Solo per questa particolare situazione si sono evidenziati valori leggermente superiori al VLE per la frequenza di risonanza (27.8 kHz in questo

caso). La stessa criticità si è osservata nel caso della seconda stazione, ovvero quella solo simulata, i cui principali risultati in merito all'esposizione sono riassunti in **Figura 9**. Anche in questo impianto, nel caso di un adulto accovacciato, i valori di campo elettrico indotto si rivelano essere leggermente superiori al limite a 85 kHz. Dai risultati presentati si evince altresì che i valori di esposizione all'interno del veicolo sono sempre molto ridotti.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Tralasciando la ricarica induttiva dinamica, per la quale esistono problematiche specifiche e che ad oggi è in parte ancora oggetto di sperimentazione, possiamo dire che quella statica è oggi molto promettente per la ricarica dei veicoli elettrici e non mancano i costruttori che propongono sistemi di ricarica induttiva per automobili ed autobus. Inoltre, questa tecnologia non si limita ai soli mezzi stradali, ma si applica anche ai veicoli industriali. In Europa e in Italia ci sono società e spin-off che sviluppano e vendono con successo sistemi di ricarica WPT per l'ambiente industriale,

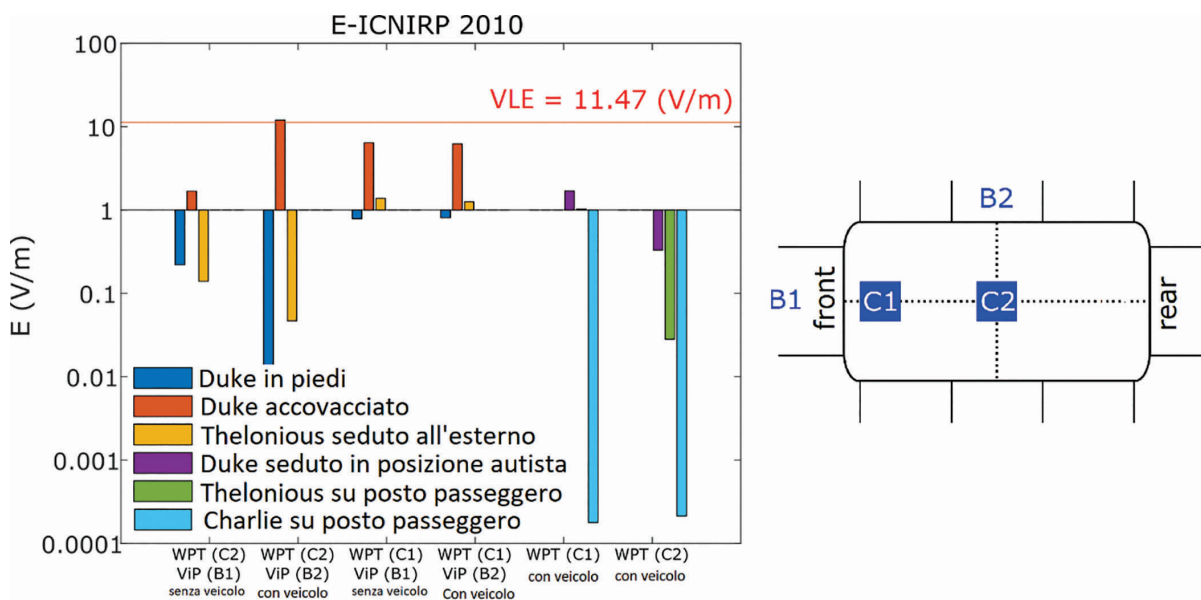


Figura 9 – Picco del campo elettrico indotto E (V/m) mediato secondo le linee guida ICNIRP 2010, calcolato nei modelli umani diversi scenari di esposizione. La linea rossa orizzontale rappresenta il livello VLE per il campo E indotto a 85 kHz secondo ICNIRP 2010 [19].

per i sistemi a guida automatica (agv) e per i muletti.

Per ora la ricerca in questo settore non ha evidenziato particolari situazioni di criticità in merito all'esposizione umana al campo magnetico. L'area sede del sistema di trasmissione WPT sottostante il pianale deve certamente essere protetta da sensori di prossimità. L'area intorno al veicolo può presentare esposizioni maggiori in prossimità del suolo, in corrispondenza del sistema di ricarica. Questa zona tuttavia, può portare a lievi superamenti dei VLE nel caso di bambini o adulti accovacciati o sdraiati a fianco del veicolo. La verifica dell'esposizione umana va senz'altro sempre eseguita in questa particolare zona del veicolo. I costruttori sono consapevoli della presenza di quest'area sensibile e normalmente intervengono sagomando opportunamente la carrozzeria del veicolo o, dove possibile come nel caso dei veicoli pesanti, inseriscono sistemi elettro-idraulici che avvicinano la bobina ricevente a quella trasmittente durante la ricarica, al fine di ridurre i campi dispersi.

All'interno del veicolo il pianale metallico e la carrozzeria costituiscono una buona schermatura nei confronti del campo magnetico prodotto dal sistema di trasmissione. Usualmente all'interno di un veicolo con carrozzeria metallica, l'effetto del sistema WPT è pressoché trascurabile. Tuttavia va tenuto in conto che alcune carrozzerie non sono realizzate in materiale metallico e ciò può produrre esposizioni maggiori che vanno accuratamente verificate.

Nel confronto dell'induzione misurata o calcolata con i valori di azione, occorre tenere in conto che i limiti di induzione magnetica corrispondenti ai VA specificati da ICNIRP possono essere superiori ai limiti consigliati per i dispositivi medici impiantati. Alla frequenza di 85 kHz il limite per questi ultimi è 15 microtesla, che è inferiore ai corrispondenti VA alla stessa frequenza.

La legislazione in Italia tutela i lavoratori e i cittadini che possono entrare in contatto con

la ricarica WPT attraverso il D.Lgs 81/2008 e s.m.i., come recepimento della Direttiva europea [5] e mediante la Legge Quadro 36/2001: "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici e elettromagnetici", con i relativi decreti attuativi DPCM 8 luglio 2003, che però considerano rispettivamente la frequenza di rete (50 Hz) e le frequenze superiori ai 100 kHz e quindi tralasciano le frequenze di interesse per il WPT dei veicoli elettrici.

Per quanto riguarda le norme tecniche internazionali e le procedure di verifica, si è ampiamente discusso in questo articolo. Occorre citare lo sforzo del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) che sta avviando attività specifiche sulla ricarica wireless ed ha cominciato a predisporre un Rapporto Tecnico che riguarderà sia sistemi induttivi che quelli radiativi e che includerà anche una parte in merito alla ricarica dei veicoli elettrici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic', "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", *Science* 317, 83, 2007 – DOI: 10.1126/science.1143254
- [2] J. Shin et al., "Contactless power transfer systems for On-Line Electric Vehicle (OLEV)," 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, 2012, doi: 10.1109/IEVC.2012.6183255
- [3] SAE TIR standard J2954, "WPT for Light Duty Plug In/ EVs and Alignment Methodology", May 2016, last revision 2019/04/23
- [4] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying Electric and magnetic fields (1Hz – 100 kHz)," *Health Physics* 99(6):818–836; 2010.
- [5] Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of

workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC IEC PAS 63184:2021

- [6] 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), published 2021-05-27
- [7] IEC 61980-1:2020, Edition 2.0 (2020-11-19), "Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements," International Electrotechnical Commission (IEC), IEC, Geneva, Switzerland, 2020.
- [8] IEC TS 61980-2:2019, Edition 1.0 (2019-06-13), "Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 2: Specific requirements for communication between electric road vehicle (EV) and infrastructure," International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, Switzerland, 2019.
- [9] IEC TS 61980-3:2019, Edition 1.0 (2019-06-13), "Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 3: Specific requirements for the magnetic field wireless power transfer systems," International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, Switzerland, 2019.
- [10] ISO 19363:2020, "Electrically propelled road vehicles — Magnetic field wireless power transfer — Safety and interoperability requirements," ISO, Geneva, Switzerland, 2020.
- [11] EMPIR European project "Metrology for inductive charging of electric vehicles", Short Name: MICEV, Project Number: 16ENG08, [Link](https://www.micev.eu/), website <https://www.micev.eu/>, Coordinator: M. Zucca
- [12] 16ENG08 EMPIR MICEV consortium, "Best practice guide for the assessment of EMF exposure from vehicle Wireless Power Transfer systems", 2021, Edited by R. Guilizzoni, S. Harmon, M. Zucca. ISBN: 978-88-945324-1-8, available online at: <https://www.micev.eu/>
- [13] ISO 14117:2019, "Active implantable medical devices — Electromagnetic compatibility — EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers, implantable cardioverter defibrillators and cardiac resynchronization devices," ISO, Geneva, Switzerland, 2020
- [14] M. C. Gosselin et al., "Development of a new generation of high-resolution anatomical models for medical device evaluation: the Virtual Population 3.0. Physics in Medicine & Biology," 59(18), 5287, 2014.
- [15] IEC 61786-1:2013 Edition 2013-12-12, in force- "Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 1: Requirements for measuring instruments", International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, Switzerland, 2013
- [16] IEC 61786-2:2014, Edition 2014-12-11- "Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 2: Basic standard for measurements", International Electrotechnical Commission, IEC, Geneva, Switzerland, 2014
- [17] M. Helwig, S. Zimmer, P. Lucas, A. Winkler, N. Modler, "Multiphysics Investigation of an Ultra-thin Vehicular Wireless Power Transfer Module for Electric Vehicles," Sustainability, 13, 9785, 2021 <https://doi.org/10.3390/su13179785>
- [18] P. Lagouanelle, O. Bottauscio, L. Pichon and M. Zucca, "Impact of Parameters Variability on the Level of Human Exposure Due to Inductive Power Transfer," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, 6, 2021

- [19] I. Liorni et al., “Assessment of Exposure to Electric Vehicle Inductive Power Transfer Systems: Experimental Measurements and Numerical Dosimetry,” *Sustainability* 12, 4573, 2020, <https://doi.org/10.3390/su12114573>
- [20] P. A. Hasgall et al., “IT’IS Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues,” Version 4.0, May 15, 2018, DOI: 10.13099/VIP21000-04-0. itis.swiss/database.
- [21] A. Arduino, O. Bottauscio, M. Chiampi, L. Giaccione, I. Liorni, N. Kuster, L. Zilberti, M. Zucca, “Accuracy Assessment of Numerical Dosimetry for the Evaluation of Human Exposure to Electric Vehicle Inductive Charging Systems”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 62, 5, 2020
- [22] IEEE Std C95.1™-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019), “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz”, IEEE, New York, USA, 2019