

VII. Valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici generati dalle nuove tecnologie Wireless Power Transfer

di Vanni Lopresto

INTRODUZIONE

Il trasferimento di potenza senza contatto, o *Wireless Power Transfer* (WPT), consiste nella trasmissione di energia elettrica da un dispositivo primario trasmittente (TX), collegato alla fonte di alimentazione, a un dispositivo secondario ricevente (RX), collegato al carico elettrico, senza l'uso di connettori fisici bensì mediante accoppiamento elettromagnetico. Nikola Tesla, all'inizio del XX secolo, dedicò molti sforzi alla progettazione e realizzazione di sistemi elettrici in grado di trasportare l'energia in modalità wireless [1]. Tuttavia, a causa della limitata efficienza di trasferimento nonché dei campi elettrici elevati, tale tecnologia è rimasta di fatto poco più di una curiosità ingegneristica fino a circa 30 anni fa, allorché è iniziata la diffusione massiva di dispositivi elettronici personali (ad es. laptop, tablets, telefoni cellulari, ecc.) per i quali la tecnologia WPT rappresenta un'opzione interessante soprattutto in relazione alla flessibilità di utilizzo. Più recentemente, lo sviluppo della tecnologia WPT basata sull'accoppiamento magnetico risonante [2][3] ha consentito un significativo incremento dell'efficienza di trasferimento della potenza in tempi abbastanza rapidi, aprendo così la strada alla penetrazione della tecnologia WPT nel mercato dei veicoli elettrici per il quale si prevede una forte espansione nei prossimi anni. Ciò pone una serie di sfide, sia dal punto di vista tecnologico,

vista l'esigenza di realizzare sistemi WPT in grado di trasferire potenze anche elevate in maniera efficiente e in tempi contenuti, sia dal punto di vista protezionistico, poiché si pone la necessità di limitare l'esposizione umana ai campi elettromagnetici (CEM) che vengono generati durante il trasferimento di potenza wireless affinché siano rispettati i limiti di legge [4][5][6][7][8][9][10]. Con riferimento a quest'ultimo aspetto, si pone quindi la necessità di definire procedure standardizzate per la valutazione dell'esposizione umana ai CEM generati dai sistemi WPT ai fini della verifica di conformità ai pertinenti limiti normativi: a questo stanno attualmente lavorando i comitati elettrotecnici normatori preposti, sia in ambito nazionale (Comitato Elettrotecnico Italiano, CEI-CT106) che internazionale (International Electrotechnical Commission, IEC-TC106) [11][12].

Il presente articolo vuole fornire una descrizione della tecnologia WPT e delle sue principali applicazioni, nonché delle metodologie standardizzate per la valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici generati dai sistemi WPT secondo i requisiti della normativa tecnica.

CARATTERISTICHE DEI SISTEMI WPT

In base alla frequenza (e quindi alla lunghezza d'onda) del campo elettromagnetico, le tec-

nologie di trasferimento di energia wireless a distanza possono essere in *campo vicino* o in *campo lontano*. Se la distanza di trasferimento è molto maggiore della lunghezza d'onda del campo elettromagnetico, la tecnologia WPT è classificata come tecnica in campo lontano, o *WPT radiativo*. Se, invece, la distanza di trasferimento è minore della lunghezza d'onda del campo elettromagnetico, la tecnologia WPT è classificata come tecnica in campo vicino reattivo, o *WPT reattivo*. Pertanto, la gamma di frequenza del WPT radiativo è in genere molto superiore (MHz–GHz) rispetto a quella del WPT reattivo (kHz–MHz).

Inoltre, le tecnologie WPT possono essere di tipo *stazionario* o *dinamico* in relazione alla modalità di posizionamento del dispositivo secondario (ricevente, RX) rispetto al dispositivo primario (trasmittente, TX). Nel *WPT stazionario*, il dispositivo primario e il dispositivo secondario non cambiano intenzionalmente la loro posizione e orientamento relativi per tutta la durata del trasferimento di potenza. Nel *WPT dinamico*, il dispositivo secondario si muove intenzionalmente rispetto al dispositivo primario, ovvero lungo un tracciato di sorgenti di potenza trasmittenti multiple che agiscono come dispositivo primario.

SISTEMI WPT INDUTTIVI E APPLICAZIONI

I sistemi WPT induttivi sono basati sull'accoppiamento induttivo in campo vicino reattivo risultante dalla legge di induzione di Faraday, per cui il campo magnetico variabile nel tempo generato dalla corrente che scorre nella bobina del dispositivo primario (TX) induce un campo elettrico nella bobina del dispositivo secondario (RX). L'integrale del campo magnetico generato dalla spira percorsa da corrente è definito dalla legge circuitale di Ampere.

Tipicamente, i sistemi WPT ad accoppiamento induttivo funzionano nella gamma di frequenza compresa tra 1 kHz e 30 MHz, ossia nella

banda delle frequenze intermedie (IF) [11]. Il trasferimento di potenza induttivo (IPT) è una tecnologia di campo vicino ampiamente utilizzata sia nei motori elettrici sia per la ricarica wireless di dispositivi elettronici, come ad es. spazzolini da denti elettrici e telefoni cellulari. Tuttavia, la potenza trasferita decade rapidamente all'aumentare della distanza ($1/r^3$). Pertanto, il raggio di azione efficiente è limitato ad alcuni centimetri o decine di centimetri in base alla potenza trasferita [3].

Al fine di estendere la distanza di trasmissione della potenza e di incrementare l'efficienza di funzionamento, è stata sviluppata la tecnologia WPT basata sull'accoppiamento induttivo risonante (RIPT) [2]. Si tratta di una tecnologia in campo vicino ad accoppiamento induttivo ma con alcune differenze rispetto all'IPT tradizionale, come illustrato in **Figura 1**.

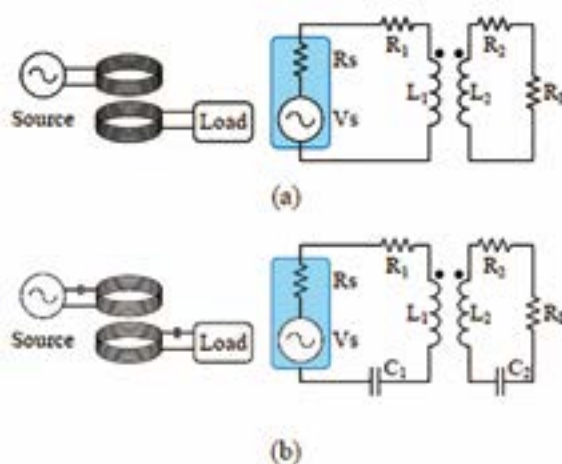


Figura 1 – Topologie e modelli di circuiti equivalenti delle tecnologie WPT in campo vicino ad accoppiamento induttivo: (a) IPT tradizionale; (b) IPT risonante (immagine tratta da [3]).

Come si evince dalla Figura 1 (b), nella tecnologia RIPT sono utilizzate due o più copie di circuiti risonanti RLC collegati in serie per migliorare l'efficienza del trasferimento di potenza ed estendere la distanza di trasmissione. In virtù di ciò, tale tecnologia è impiegata tipicamente per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici.

Come nei trasformatori, del materiale magnetico come la ferrite viene in genere utilizzato per dirigere il flusso magnetico e migliorare l'accoppiamento tra la bobina trasmittente del dispositivo primario e la bobina (o le bobine) riceventi del dispositivo secondario.

Sistemi WPT induttivi per la ricarica di veicoli elettrici

I sistemi WPT induttivi utilizzati per la ricarica di veicoli elettrici (VE) sono, tipicamente, sistemi RIPT a ricarica *stazionaria* o *dinamica*: essi lavorano nella gamma di frequenza compresa tra alcune decine di kHz e 100 kHz e sono in grado di trasferire potenze da alcuni kW fino a 200 kW, in base alle esigenze di potenza del VE. Il dispositivo secondario (RX), montato sul veicolo, è posto a una distanza verticale (altezza) fissa rispetto al dispositivo primario (TX), montato a terra, che consente un intervallo di distanze, h , tra gli avvolgimenti primario e secondario come mostrato in **Figura 2** [13]. Le distanze verticali tra le bobine sono comprese, generalmente, tra 100 mm e 300 mm. In alcuni sistemi WPT, le dimensioni delle bobine primarie e secondarie sono comparabili per aumentare la compattezza del progetto.



Figura 2 – Schema delle bobine trasmittente (TX) e ricevente (RX) di un sistema WPT induttivo per la ricarica di un veicolo elettrico (immagine tratta da [13]).

I requisiti di funzionamento dei sistemi WPT induttivi per la ricarica di VE sono definiti dalla famiglia di norme e specifiche tecniche IEC 61980, sviluppate dal comitato tecnico IEC TC 69 e recepite dal CEI. La norma CEI EN IEC 61980-1:2021 [14] definisce i requisiti

generali dei sistemi WPT per i veicoli elettrici ed ibridi ricaricabili (*plug-in*), inclusi: le caratteristiche e le condizioni di funzionamento; i livelli di sicurezza elettrica; la comunicazione tra il dispositivo a terra e quello a bordo del veicolo per abilitare e controllare il WPT, l'efficienza, l'allineamento e altre attività per consentire il WPT, nonché i requisiti specifici di compatibilità elettromagnetica (EMC) per un dispositivo di alimentazione. La specifica tecnica CEI CLC IEC/TS 61980-2 (2021-05) [15] definisce i requisiti particolari per la comunicazione tra VE e l'infrastruttura di ricarica. La specifica tecnica CEI CLC IEC/TS 61980-3 (2021-05) [16] definisce i requisiti particolari per sistemi di trasferimento di potenza senza fili a campo magnetico.

Anche la *SAE International* (già *Society of Automotive Engineers*) sviluppa norme tecniche e linee guida sui sistemi WPT per la ricarica di VE. In particolare, la norma SAE J2954 [17] definisce le linee guida per l'interoperabilità, la compatibilità elettromagnetica, le emissioni elettromagnetiche, le prestazioni minime, la sicurezza e i test per la ricarica wireless dei veicoli elettrici e ibridi ricaricabili (*plug-in*) leggeri. La bozza di norma SAE J2954/2 [18] stabilisce le linee guida per l'interoperabilità, la compatibilità elettromagnetica, le prestazioni minime, la sicurezza e i test per la ricarica wireless ad alta potenza dei veicoli pesanti (*heavy duty*).

SISTEMI WPT PER LA RICARICA STAZIONARIA INDUTTIVA

Nei sistemi WPT per la ricarica stazionaria induttiva di veicoli elettrici, sul dispositivo primario (TX) posizionato a terra è presente un accesso per l'ingresso dell'alimentazione elettrica, che può includere un trasformatore di isolamento, filtri ed elettronica di rifasamento. Solitamente sono presenti due convertitori di potenza e, talvolta, una rete di compensazione che pilota la bobina trasmittente (TX). Tutti questi componenti, compresa l'elettronica

di comunicazione tra il dispositivo primario montato a terra e il VE, sono chiamati gruppo di terra (*ground assembly, GA*). Analogamente, i componenti a bordo del veicolo, cioè la bobina ricevente (RX) tipicamente collegata a una rete di compensazione e a dei convertitori di potenza, compresa l'elettronica di comunicazione tra il veicolo e il GA, sono chiamati gruppo di bordo del veicolo elettrico (*electric vehicle assembly, EVA*).

SISTEMI WPT INDUTTIVI PER LA RICARICA DINAMICA DI VEICOLI ELETTRICI

Nei sistemi WPT induttivi per la ricarica dinamica di veicoli elettrici, il dispositivo secondario (RX), montato a bordo del VE, si muove lungo un tracciato di sorgenti di potenza trasmettenti (TX), sepolte sotto la strada lungo la direzione di marcia, che agiscono come dispositivo primario. Le sorgenti TX possono essere disposte secondo un percorso continuo, ovvero possono essere disposte per passi discreti. Nel primo caso, sussiste un accoppiamento magnetico continuo tra le bobine di terra e la bobina a bordo del VE, che viene alimentato pressoché ininterrottamente lungo il percorso. Nel secondo caso, il VE viene ricaricato mediante WPT solamente quando la bobina di bordo viene ad accoppiarsi con una delle bobine di terra disposte lungo il percorso, per cui di fatto si verifica una ricarica *semi-dinamica*.

Al fine di mitigare le variazioni delle condizioni di accoppiamento tra il sistema RX (montato a bordo del VE) e il sistema TX (disposto a terra), dovute al possibile disallineamento durante il movimento del veicolo, per le bobine è stata proposta una configurazione polarizzata con forma a doppia D (*DD-coil*), come rappresentato in **Figura 3**. Tale configurazione consente di mantenere un buon accoppiamento per spostamenti (limitati) e presenta una minore sensibilità al disallineamento rispetto alle bobine di altra forma [19].

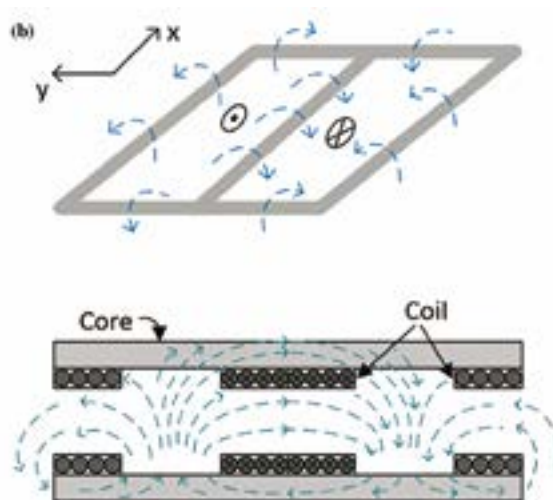


Figura 3 – Bobine WPT in configurazione polarizzata con forma a doppia D (*DD-coil*), (immagine tratta da [19]).

SISTEMI WPT CAPACITIVI

La tecnologia WPT capacitiva utilizza un campo elettrico alternato per trasferire energia. Rispetto alla tecnologia WPT induttiva, in cui il flusso del campo magnetico tende a diffondersi in tutte le direzioni dalle bobine per creare un anello di flusso chiuso, la tecnologia WPT capacitiva è caratterizzata da un migliore confinamento delle linee di flusso del campo elettrico e, quindi, da una minore dispersione del campo stesso. L'altro vantaggio include la capacità di trasferire energia attraverso una barriera metallica, poiché la superficie superiore e inferiore della barriera metallica può fungere da piastre conduttrici in un campo elettrico. Questo effetto, pur perturbando il campo elettrico originale non inficia il trasferimento di potenza.

Nonostante i vantaggi suddetti, la tecnologia capacitiva WPT rappresenta una grande sfida pratica per il trasferimento di potenza wireless, a causa della limitata capacità di accoppiamento. Poiché la permittività del vuoto o dell'aria è piuttosto piccola ($8,854 \times 10^{-12}$ F m⁻¹), per aumentare la capacità dovrebbero essere utilizzati materiali dielettrici speciali

piuttosto costosi, come BaTiO₃ [20]. Tuttavia, qualsiasi traferro esistente o spostamento delle piastre di accoppiamento ridurrebbe drasticamente la capacità. Ciò rende la tecnologia WPT capacitiva poco pratica per applicazioni di ricarica wireless di VE, in cui deve esservi un traferro di almeno 150 ~ 200 mm e una grande tolleranza di spostamento tra i dispositivi TX e RX.

SISTEMI WPT RADIATIVI E APPLICAZIONI

Le tecnologie WPT in campo lontano (WPT radiativo) sono in grado di trasferire energia a una distanza di alcune lunghezze d'onda fino (teoricamente) all'infinito attraverso la propagazione di onde elettromagnetiche ad alta frequenza, tipicamente nella gamma compresa tra 30 MHz e 300 GHz [12]. Il WPT radiativo rappresenta, quindi, una soluzione per alimentare da remoto, su grandi distanze, sia dispositivi a bassa potenza (ad es. sensori, etichette di identificazione a RF (RFID), dispositivi mobili e indossabili) sia dispositivi per applicazioni ad alta potenza (ad es. veicoli elettrici).

Il WPT radiativo consente di coprire distanze maggiori rispetto al WPT non radiativo e non richiede l'accoppiamento reciproco tra trasmettitore e ricevitore. Tuttavia, le distanze maggiori generalmente determinano una

significativa riduzione della densità di potenza trasmessa (che si riduce con la distanza come $1/r^2$) e, quindi, una riduzione dell'efficienza di trasferimento verso il dispositivo ricevente (RX), che in parte può essere compensata utilizzando antenne ad alta direttività o strategie per il controllo dell'allineamento. Infatti, in un sistema WPT radiativo si utilizzano principalmente antenne altamente direzionali per trasmettere energia elettromagnetica e l'efficienza del sistema beneficia di un'antenna di ricezione altamente direttiva quando viene utilizzata al di fuori della zona del campo vicino.

I sistemi WPT radiativi possono essere classificati in:

- a) WPT a corto raggio con fascio di trasmissione largo (*omnidirezionale*) verso più utilizzatori (RX);
- b) trasmissione WPT a *diversità spaziale* verso un singolo utilizzatore (RX) con propagazione a cammini multipli (*multi-path*);
- c) trasmissione WPT a corto/lungo raggio con fascio di trasmissione stretto (*direttivo*) verso un singolo utilizzatore (RX).

Ciascuna delle tecnologie descritte può essere utilizzata in diverse applicazioni WPT, come descritto nella **Tabella 1**, tratta da [12].

Applicazioni WPT	Banda di frequenza	Condizione d'uso	Distanza	Guadagno d'antenna (TX)	Potenza trasmessa
Rete di sensori alimentata in modalità wireless	915 MHz 2.45 GHz 5.8 GHz	Interno, Esterno	Da alcuni metri a decine di metri	6 dBi (tipicamente nella banda 915 MHz), 25 dBi (tipicamente nelle bande 2.45 GHz e 5.8 GHz)	< 50 W

Ricarica wireless di dispositivi mobili	2.45 GHz, 915 MHz	Interno	Da alcuni metri a decine di metri	25 dBi (tipicamente nella banda 2.45 GHz)	< 50 W
WPT verso bersaglio mobile/volante	2.45 GHz, 5.8 GHz	Interno, Esterno	Da alcuni metri fino a 20 km	10 dBi – 30 dBi (tipicamente nella banda 5.8 GHz)	50 W – 1 MW
WPT punto-punto	2.45 GHz, 5.8 GHz	Esterno	1 m – 20 km		100 W – 1 MW
Ricarica wireless di veicoli elettrici	2.45 GHz, 5.8 GHz	Esterno	0.1 m – 1 m		100 kW – 500 kW
Satellite a energia solare	5.8 GHz	Collegamenti spazio-terra	36,000 km		1.3 GW
Dispositivi <i>Internet-of-things</i> (IoT), automazione, collegamenti punto-punto, etc.	24 GHz, 61 GHz, 122 GHz, 244 GHz	Interno, Esterno	1 m – 1000 m		100 W

Tabella 1 – Caratteristiche dei sistemi WPT radiativi e principali applicazioni.

SISTEMI WPT RADIATIVI A FASCIO LARGO (OMNIDIREZIONALI)

La tecnologia WPT radiativa *omnidirezionale* utilizza una trasmissione a fascio largo per trasferire a distanza energia verso uno o più utenti (ricevitori). La **Figura 4** illustra il diagramma del fascio di una sorgente WPT radiativa omnidirezionale. Il trasmettitore trasmette onde elettromagnetiche ad alta energia e il/i ricevitore/i, utilizzando una *rectenna* (antenna con diodo rettificatore), converte l'energia del campo a microonde in corrente continua. Tuttavia, a causa della bassa efficienza di questi sistemi, solo una piccola frazione della potenza trasmessa irradiata viene intercettata dai ricevitori.

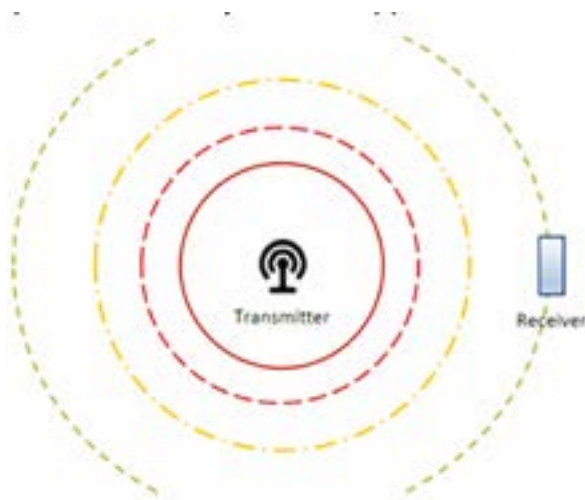


Figura 4 – Diagramma di radiazione di una sorgente WPT radiativa omnidirezionale (immagine tratta da [12]).

SISTEMI WPT RADIATIVI A DIVERSITÀ SPAZIALE (CAMMINI MULTIPLI)

Il principio di base della tecnologia WPT radiativa a *diversità spaziale* è mostrato nella **Figura 5**. L'applicazione principale di tali sistemi è correlata all'ambiente interno in cui si sfrutta la propagazione del campo elettromagnetico tramite cammini multipli, dovuta alla riflessione dalle pareti, per il trasferimento wireless di potenza al ricevitore. In un tipico sistema WPT a diversità spaziale, un chip ricevente, integrato in un dispositivo ricevitore, invia un segnale faro (*beacon*) di basso livello che cerca il trasmettitore. Una volta ricevuto, il trasmettitore invia la potenza RF attraverso tutti i percorsi multipli da cui è stato ricevuto il segnale del *beacon*. La tecnologia WPT radiativa a cammini multipli consente di inviare continuamente energia dal trasmettitore, in modo che l'alimentazione sia fornita solamente all'antenna ricevente. Questo processo di *beacon* si ripete, ad esempio, fino a 100 volte al secondo, il che rende possibile trasferire energia a distanza anche quando il dispositivo ricevente è in movimento e sono presenti ostacoli.

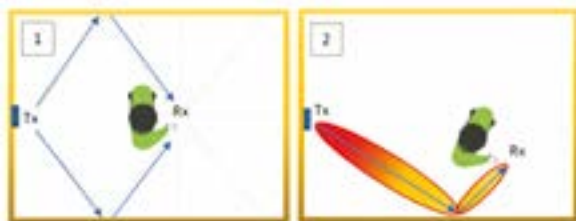


Figura 5 – Diagramma di fascio di un sistema WPT radiativo a diversità spaziale (immagine tratta da [12]).

SISTEMI WPT RADIATIVI A FASCIO STRETTO (DIRETTIVI)

Per i sistemi WPT radiativi a fascio a fascio stretto si usano, tipicamente, antenne a elevata direttività e/o schiere (*array*) di antenne.

Come illustrato in **Figura 6**, il trasmettitore può trasferire potenza a distanza a uno o più utenti (ricevitori), dirigendo il fascio di irradiazione mediante tecniche di formazione del fascio (*beam-forming*), controllando le ampiezze e/o le fasi dei segnali irradiati della schiera di antenne.



Figura 6 – Diagramma di irradiazione di un sistema WPT radiativo a fascio stretto (immagine tratta da [12]).

APPLICAZIONI DEI SISTEMI WPT RADIATIVI PER L'AUTOMAZIONE INDUSTRIALE

La **Figura 7** e la **Figura 8** mostrano casi d'uso tipici in ambienti industriali, per l'automazione delle linee di produzione. In questi casi, i sensori e i dispositivi che ricevono energia dai sistemi WPT radiativi sono generalmente situati lontano dai corpi dei lavoratori, ovvero sono utilizzati in ambienti senza presenza umana. La potenza irradiata è generalmente ridotta all'esterno di edifici e/o locali.



Figura 7 – Sistemi WPT radiativi per l'alimentazione di sensori di controllo di una linea di produzione automatizzata (immagine tratta da [12]).



Figura 8 – Sistemi WPT radiativi per l'alimentazione di sensori di controllo di una linea di produzione (immagine tratta da [12]).



Figura 10 – WPT per l'alimentazione di sensori per il monitoraggio e l'assistenza remota di persone (immagine tratta da [12]).

APPLICAZIONI DEI SISTEMI WPT RADIATIVI IN AMBIENTI INTERNI RESIDENZIALI

La **Figura 9** e la **Figura 10** mostrano casi d'uso tipici in ambienti interni residenziali o accessibili al pubblico. In questi casi d'uso, i sensori e i dispositivi che ricevono energia dai sistemi WPT radiativi si trovano vicino a corpi delle persone o a stretto contatto con essi. La potenza irradiata è generalmente ridotta all'esterno di edifici e/o locali.



Figura 9 – WPT verso dispositivi mobili e indossabili in una stanza (immagine tratta da [12]).

LUOGHI ACCESSIBILI AL PUBBLICO

La **Figura 11** mostra un tipico caso d'uso in luoghi accessibili al pubblico, sia all'interno che all'esterno di edifici. In questo caso d'uso, i sensori e i dispositivi che hanno ricevuto energia da sistemi WPT radiativi si trovano vicino a corpi delle persone o a sono a stretto contatto con essi.

For mobile devices in the place where people gather.

- Station-Airport (Public)
- Conference Arena (Semi-public)
- Meeting room etc.



Figura 11 – WPT per l'alimentazione di dispositivi mobili e indossabili in luoghi accessibili al pubblico (immagine tratta da [12]).

VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE A CAMPI ELETTROMAGNETICI GENERATI DA SISTEMI WPT

La **Figura 12** presenta il diagramma di flusso della procedura generale di valutazione dell'e-

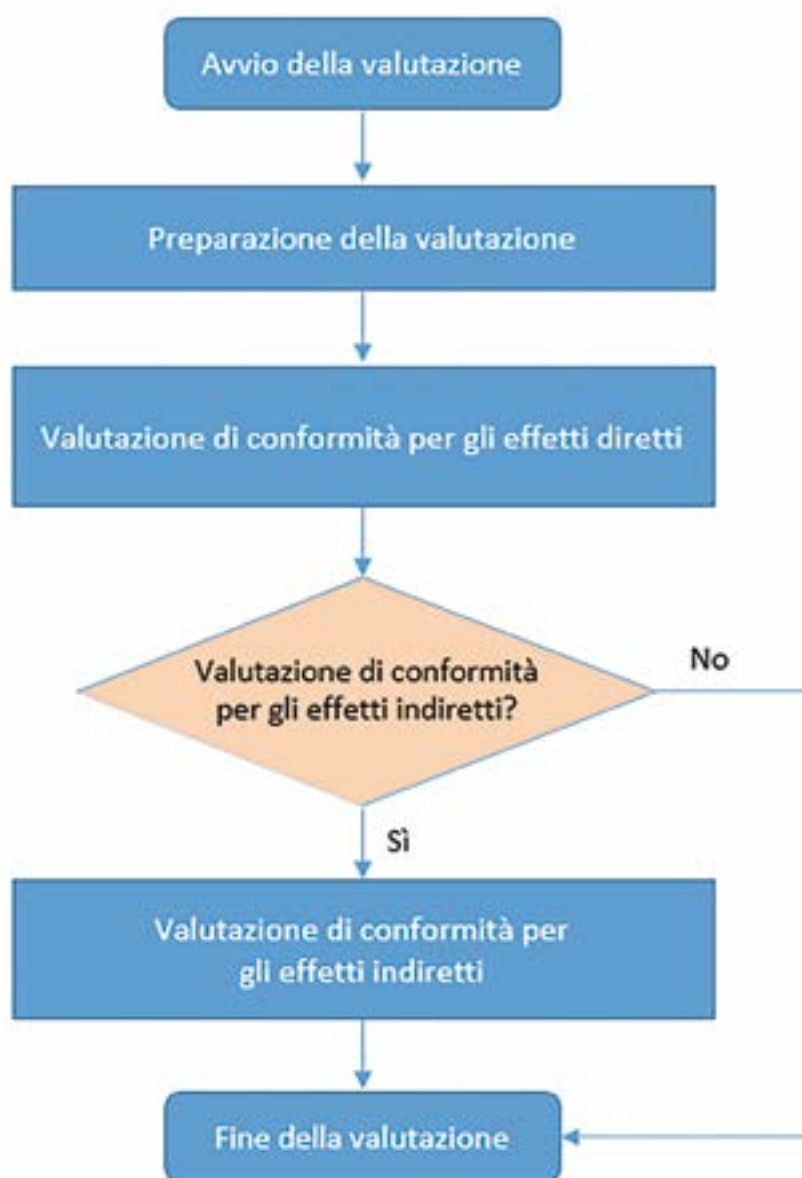


Figura 12 – Procedura generale di valutazione dell’esposizione ai CEM generati da sistemi WPT.

sposizione ai campi elettromagnetici (CEM) generati dai sistemi WPT, con riferimento alle grandezze inerenti sia agli effetti diretti (campo elettrico interno, densità di corrente, e/o SAR, densità di potenza) sia agli effetti indiretti (corrente di contatto). I possibili metodi di valutazione per queste grandezze sono diversi, e possono essere basati su misurazioni e/o calcoli.

PREPARAZIONE DELLA VALUTAZIONE DELL’ESPOSIZIONE

In preparazione della valutazione, è necessario identificare il prodotto/famiglia di prodotti e le relative caratteristiche elettromagnetiche (potenza, corrente, frequenza, altre condizioni), la posizione dell’utente e la relativa postura, i pertinenti limiti di esposizione da applicare e



Figura 13 – Preparazione della valutazione dell'esposizione.

il metodo di valutazione (misurazioni e/o calcoli), come descritto in **Figura 13**.

IDENTIFICAZIONE DEL PRODOTTO/FAMIGLIA DI PRODOTTI

Per poter eseguire una valutazione dell'esposizione, è necessario determinare le caratte-

ristiche elettromagnetiche (potenza/corrente, frequenza) del dispositivo WPT da valutare.

SCOPO DELLA VALUTAZIONE

Lo scopo della valutazione può essere suddiviso in due parti:

- verifica di conformità del prodotto;
- verifica di conformità dell'installazione del prodotto.

Per la valutazione di conformità del prodotto, un produttore o un'altra entità legale che fornisce un prodotto WPT sul mercato è generalmente tenuto a fornire all'utente finale del prodotto informazioni sull'esposizione ai CEM. In questo caso, la valutazione viene solitamente eseguita in un idoneo laboratorio sperimentale di prova, prima dell'immissione sul mercato.

Per la valutazione di conformità dell'installazione del prodotto, un installatore di prodotti WPT è generalmente tenuto a fornire all'utente finale del prodotto informazioni sull'esposizione ai CEM. In questo caso, si richiede la determinazione dei livelli complessivi di esposizione nelle aree accessibili dal prodotto. La valutazione viene eseguita nell'ambiente reale del dispositivo, comprese le situazioni interne ed esterne. Nella valutazione, devono essere considerati anche i contributi di altre fonti significative e i possibili effetti dell'ambiente.

DETERMINAZIONE DELLA POSIZIONE DELL'UTILIZZATORE

Le caratteristiche dell'esposizione ai CEM generati dai dispositivi WPT dipendono fortemente dalla distanza e dalla frequenza operativa del dispositivo. Pertanto, in relazione alla posizione dell'utilizzatore e alla frequenza del campo, la regione di esposizione può essere classificata in tre diverse distanze dal dispositivo (sorgente):

- campo vicino reattivo della sorgente,
- campo vicino radiativo della sorgente,
- campo lontano della sorgente.

Per una valutazione accurata, è necessario selezionare un metodo appropriato per ciascuna regione, nonché tenere conto della postura del soggetto esposto.

DETERMINAZIONE DEI LIMITI DI ESPOSIZIONE

Le linee guida internazionali dell'*International Commission on Non-Ionising Radiation Protection*, ICNIRP [21] [22] [23] fissano restrizioni all'esposizione, differenziate per la popolazione e per i lavoratori, per la protezione da possibili rischi per la salute e la sicurezza derivanti dall'esposizione a CEM fino a 300 GHz. Le restrizioni si articolano *in limiti di base (LB)*, definiti sulla base delle soglie accertate per gli effetti sulla salute ed espressi in termini di grandezze interne al corpo (dosimetriche), e in *livelli di riferimento (LR)*, ossia livelli operativi derivati dai LB per gli scenari di esposizione peggiori ed espressi in termini di grandezze ambientali (radiometriche) al fine di semplificare il processo di valutazione della conformità ai pertinenti LB.

I limiti di esposizione sono differenziati per gli effetti di stimolazione (effetti non termici), prevalenti nella gamma di frequenza fino a 100 kHz, e per gli effetti termici, prevalenti nella gamma di frequenza da 10 MHz a 300 GHz. Nella gamma delle frequenze intermedie (100 kHz – 10 MHz) la valutazione di conformità deve essere effettuata rispetto ai limiti sia per gli effetti di stimolazione sia per gli effetti termici.

Ai fini della valutazione di conformità, la determinazione del pertinente limite di esposizione dipende non solo dalla gamma di frequenza, ma anche dalla situazione di esposizione in relazione alla distanza dalla sorgente e condizione di esposizione (esposizione a corpo intero o esposizione localizzata).

A livello nazionale, i limiti per la protezione della popolazione e dei lavoratori non esposti a CEM per motivi professionali sono definiti dalla legge quadro n. 36 del 2001 [5] e relative disposizioni attuative [6] [7] [8]. Ai sensi delle suddette disposizioni, per le esposizioni non riconducibili agli elettrodotti alla frequenza di rete (50 Hz) e ai sistemi fissi di telecomunicazione e radiotelevisivi – per i quali

sussistono restrizioni specifiche – si applicano i limiti di cui alla Raccomandazione del Consiglio 1999/519/CE [9], che recepiscono le restrizioni per la protezione della popolazione delle Linee Guida ICNIRP 1998. Ai lavoratori esposti a CEM per motivi professionali si applicano i limiti di cui all'art. 208 e allegato XXXVI del Decreto Legislativo n. 81 del 2008 [4], come modificato dal D.Lgs. n. 159 del 2016 di recepimento della Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2013/35/UE [10]. Tali limiti si articolano nei *Valori Limite di Esposizione (VLE)*, concettualmente analoghi ai LB, e nei *Valori di Azione (VA)* (denominati *Livelli di Azione* nella Direttiva 2013/35/EU) concettualmente analoghi ai LR.

VALUTAZIONE DI CONFORMITÀ PER GLI EFFETTI DIRETTI

La valutazione di conformità per gli effetti diretti si effettua rispetto ai limiti di base/valori limite di esposizione (LB/VLE) di cui alla normative vigenti per la protezione della popolazione [5] [9] e dei lavoratori [4] [10], ovvero rispetto ai livelli di riferimento/valori di azione (LR/VA) derivati dalle grandezze di base.

PROCEDURA DI VALUTAZIONE PER I SISTEMI WPT INDUTTIVI

Nei sistemi WPT induttivi, le principali fonti di emissione CEM sono riconducibili alle correnti che scorrono nella bobina primaria e secondaria. Per aumentare l'efficienza della trasmissione e ridurre i campi dispersi, le bobine sono solitamente dotate di concentratori di flusso realizzati con materiali magnetici quali, ad es., ferrite, nonché di una schermatura magnetica realizzata, tipicamente, con un materiale in alluminio altamente conduttivo. La **Figura 14** descrive il diagramma di flusso, tratto dal PAS IEC 63184 [11], che descrive le procedure per la valutazione della conformità dei sistemi WPT induttivi ai LB/VLE ovvero

ai LR/VA in relazione agli effetti diretti dell'esposizione a CEM. Come descritto in figura, è possibile selezionare uno dei quattro approcci di valutazione, a seconda di quale sia il più praticabile per lo scenario d'esposizione.

VALUTAZIONE DELLA CORRENTE DELLA BOBINA

La corrente massima ammissibile della bobina (I_{lim}) può essere approssimata valutando la densità di flusso magnetico di una bobina circolare a una distanza fissa di 10 mm e confrontandola con il pertinente valore limite (LR o VA), come nell'equazione (1) tratta dal PAS IEC 63184 [11]

$$I_{lim}(r) = \frac{2\pi d_0 B_{lim}}{\mu_0 n} e^{\frac{r_0}{r}} \quad (1)$$

dove:

- r è il raggio della bobina;
- d_0 è la distanza fissa (conservativa) di 10 mm a cui si confronta la densità di flusso magnetico con il pertinente valore limite B_{lim} ;
- B_{lim} è il valore limite (LR o VA) per la densità di flusso magnetico;
- μ_0 è la permeabilità magnetica dello spazio libero;
- n è il numero di avvolgimenti della bobina;
- r_0 è una costante con valore 21,5 mm.

Se non è possibile dimostrare che l'approssimazione (1) è conservativa o la distanza di valutazione è diversa da $d_0 = 10$ mm, tale approccio fallisce indipendentemente dal fatto che se la corrente della bobina sia inferiore al valore massimo ammissibile I_{lim} . Ulteriori informazioni sono riportate nell'Allegato A del PAS IEC 63184 [11].

VALUTAZIONE DEL CAMPO INCIDENTE RISPETTO AI LR O VA

Sia l'intensità del campo elettrico che quella del campo magnetico incidente sono mi-

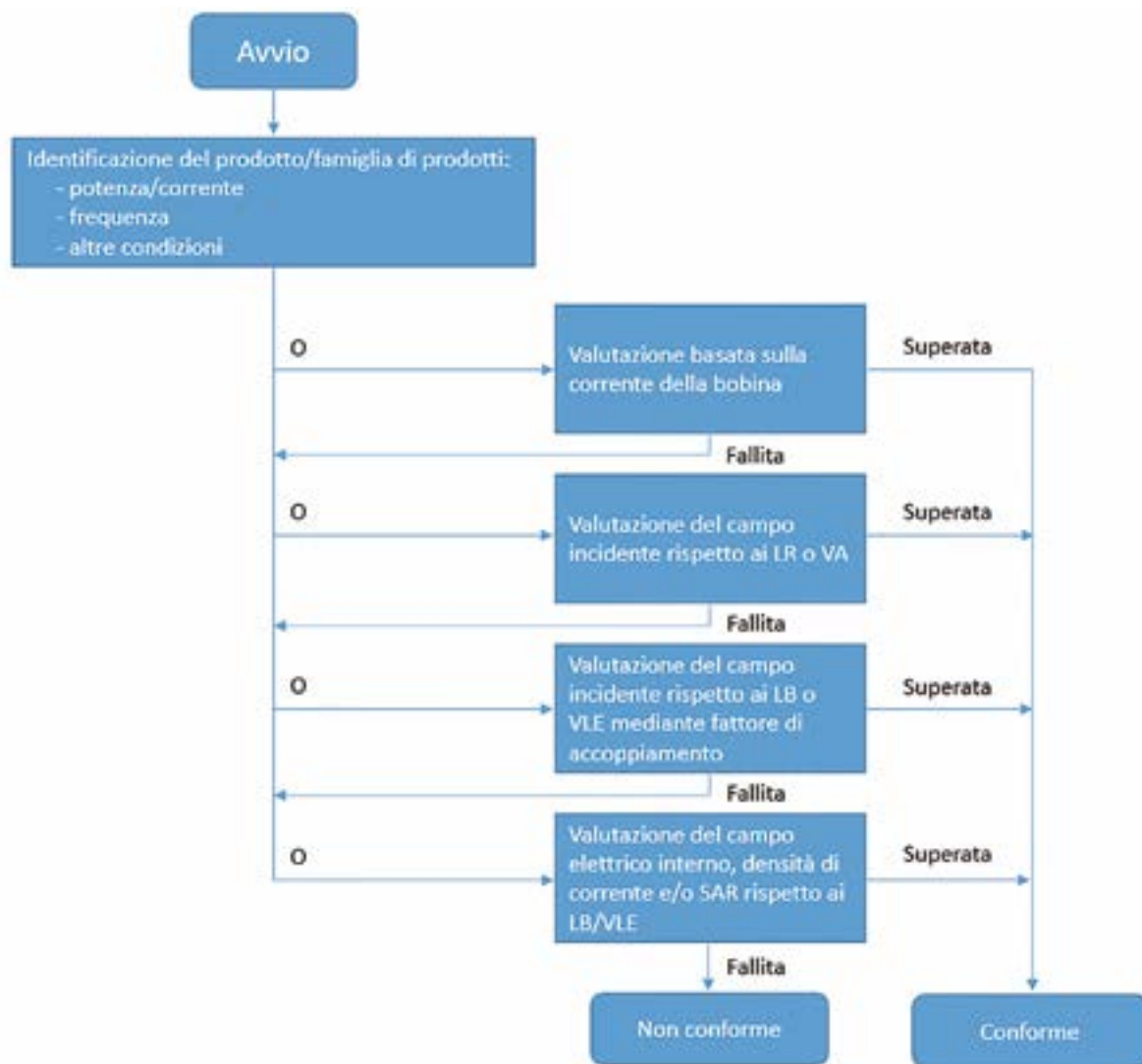


Figura 14 – Procedure per la valutazione della conformità dei sistemi WPT induttivi ai LB/VLE ovvero ai LR/VA in relazione agli effetti diretti dell'esposizione a CEM.

surate o calcolate a distanze diverse inclusa la distanza più vicina, nonché in tutte le direzioni in cui il dispositivo in prova può operare vicino alle persone. Quando il campo è uniforme nell'area di interesse, i valori misurati o calcolati dei campi elettrici e magnetici sono confrontati con i pertinenti LR o VA. Nel caso di campi non uniformi, i valori di campo misurati o calcolati possono essere mediati spazialmente sulle regioni esposte del corpo.

VALUTAZIONE DEL CAMPO INCIDENTE MEDIANTE FATTORE DI ACCOPPIAMENTO

I LR e i VA sono derivati dai pertinenti LB e VLE nelle condizioni di accoppiamento massimo tra il campo incidente e il corpo umano, ossia sono derivati dalle grandezze massime indotte nel corpo umano esposto a un campo uniforme.

In molte situazioni di esposizione localizzata, come in prossimità di sistemi WPT, le valutazioni possono risultare troppo conservative quando il valore spaziale massimo o medio del campo incidente viene confrontato con i LR o i VA. In tal caso, al campo incidente possono essere applicati degli opportuni *fattori di accoppiamento* per mitigare la sovrastima e garantire comunque il rispetto dei LB o VLE, come espresso nell'equazione (2):

$$F^* = k \times F \quad (2)$$

dove:

- F^* è la grandezza di interesse da confrontare con i pertinenti LR o VA;
- K è un fattore di accoppiamento che deve essere calcolato come descritto nel PAS 63184;
- F è il campo incidente misurato nella posizione in cui si effettua la valutazione.

Il PAS IEC 63184 [11] definisce due possibili metodi per il calcolo del fattore di accoppiamento:

- a) il fattore di accoppiamento k_L è stimato per situazioni di esposizione localizzate e specifiche configurazioni di bobine e distanze di valutazione secondo il concetto descritto nel § 5.2.4.2 del PAS IEC 63184;
- b) il fattore di accoppiamento k_G è stimato rispetto al gradiente dell'ampiezza del campo incidente nella posizione in cui si effettua l'esposizione applicando il metodo del gradiente descritto nel § 5.2.4.3 del PAS IEC 63184.

VALUTAZIONE DEL CAMPO ELETTRICO INTERNO, DENSITÀ DI CORRENTE E/O SAR

Il SAR può essere misurato utilizzando una sonda dosimetrica introdotta in fantoccio

liquido o semi-liquido, che riproduce le proprietà dielettriche del corpo umano nella gamma di frequenza d'interesse, esposto ai CEM emessi dal dispositivo in prova. I valori misurati possono essere confrontati direttamente con i LB o VLE. Il metodo di valutazione è descritto in dettaglio nel § 6.2 del PAS IEC 63184.

Il campo elettrico interno, la densità di corrente o il SAR possono essere altresì calcolati mediante simulazioni numeriche, utilizzando modelli umani anatomici, metodi analitici, ecc. per il confronto con i LB o VLE. Il modello e la metodologia di simulazione devono essere convalidati prima della valutazione. Il metodo di valutazione basato sulla simulazione è descritto in dettaglio nel capitolo 7 del PAS IEC 63184.

PROCEDURA DI VALUTAZIONE PER I SISTEMI WPT RADIATIVI

La **Figura 16** riporta il diagramma di flusso, tratto dal DTR IEC 63377 [12], che descrive le procedure per la valutazione della conformità dei sistemi WPT radiativi ai LB/VLE ovvero ai LR/VA in relazione agli effetti diretti dell'esposizione a CEM. Come descritto in figura, la scelta dell'approccio di valutazione dipende dalle caratteristiche del dispositivo in prova e dallo scenario d'esposizione.

Figura 16 – Procedure per la valutazione della conformità dei sistemi WPT radiativi ai LB/VLE ovvero ai LR/VA in relazione agli effetti diretti dell'esposizione a CEM.

L'intensità del campo incidente, la densità di potenza, il SAR o una combinazione di questi parametri possono essere valutati mediante misurazione e calcolo, come specificato dalla norma CEI EN 62232 [24]. Nella valutazione si deve altresì tenere conto dei requisiti nazionali regolamentari e legislativi.

VALUTAZIONE BASATA SUL LIVELLO DI ESCLUSIONE PER DEBOLE POTENZA

Gli apparati per cui sia possibile dimostrare, utilizzando i criteri specificati dalla norma CEI EN 62479 [24], che la potenza disponibile all'antenna e/o la potenza media irradiata totale sono pari o inferiori al *livello di esclusione per debole potenza*, P_{max} , specificato dalla norma CEI EN 50663 [25], sono da ritenersi conformi ai LB di cui alla Raccomandazione del Consiglio 1999/519/CE [9], recepiti dai due DPCM del 2003 [6] [7], e/o ai VLE di cui alla Direttiva 2013/35/UE (recepiti nel Titolo VIII, Capo IV e Allegato XXXVI del D.Lgs. 81/2008 e s.m.i.) [4] [10].

Nella **Tabella 2** sono indicati i valori di P_{max} (W) di cui alla norma CEI EN 50663 [26], derivati da considerazioni sul SAR, da utilizzare per la valutazione di conformità basata sul livello di esclusione per debole potenza.

Livello di esposizione	Regione del corpo	P_{max} (mW)
Popolazione ed esposizioni non professionali (Raccomandazione 1999/519/CE)	Testa e tronco	20
	Arti	40
Esposizioni professionali (Allegato XXXVI D.Lgs. 81/2008 e s.m.i.)	Testa e tronco	100
	Arti	200

Tabella 2 – Valori di P_{max} derivati da considerazioni sul SAR da utilizzare per la valutazione di conformità basata sul livello di esclusione per debole potenza (tratti da [26]).

Per le apparecchiature a bassa potenza che utilizzano segnali impulsivi, possono essere applicati altri limiti oltre a quelli considerati nella Tabella 1. Sia la Raccomandazione del Consiglio 1999/519/CE [9] che la Direttiva 2013/35/UE [9] (recepita nel D.lgs. 81/2008 e s.m.i. [4]) prevedono restrizioni specifiche sull'esposizione ai CEM impulsivi, basate sulle linee guida ICNIRP 1998 [21]. Ulteriori informazioni a riguardo sono fornite nell'Allegato C della CEI EN 62479 [24].

I valori di P_{max} di cui alla norma CEI EN 50663 [25], ricavati in base a considerazioni sulla densità di potenza, sono 20 mW nell'intervallo di frequenza da 10 GHz a 300 GHz e 100 mW nell'intervallo di frequenza da 6 GHz a 300 GHz, rispettivamente, per le esposizioni della popolazione e le esposizioni e professionali. Ulteriori dettagli per derivare un valore minimo conservativo per P_{max} basato su considerazioni di densità di potenza, sono forniti nella clausola A.3 dell'Allegato A della CEI EN 62479 [24].

VALUTAZIONE DI CONFORMITÀ RISPETTO AGLI EFFETTI INDIRETTI

Le correnti di contatto possono essere valutate mediante misurazioni dei CEM incidenti o misurazioni dirette di corrente.

Per garantire la conformità da parte dei CEM incidenti devono essere verificate le seguenti due condizioni:

i livelli di campo elettrico incidente per prevenire gli effetti indiretti nocivi delle correnti di contatto (elettrocuzione e ustioni) sono indicati nella Raccomandazione del Consiglio 1999/519/CE [9], con riferimento all'esposizione della popolazione e alle esposizioni non professionali dei lavoratori, e nell'Allegato XXXVI al D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. [4], con riferimento alle esposizioni professionali dei lavoratori;

i livelli di campo magnetico incidente per prevenire gli effetti indiretti negativi delle correnti di contatto possono essere calcolati dalla corrente indotta nel circuito di prova formato

con un conduttore metallico messo a terra e il corpo umano con la formula (3):

$$H = \frac{Z}{2\pi f \mu_0 S} I_C \quad (3)$$

dove:

- I_C è la corrente di contatto (A);
- Z è l'impedenza del corpo umano (Ω);
- S è l'area del circuito di prova avente dimensione $1,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$.

Le correnti di contatto possono anche essere misurate direttamente da un misuratore di corrente di contatto con un oggetto metallico non collegato a terra o collegato a terra posto nelle vicinanze dei sistemi WPT. La **Figura 15**, tratta dal PAS IEC 63184, illustra due situazioni di esposizione per oggetti metallici senza messa a terra e con messa a terra.

La **Figura 16**, tratta dal PAS IEC 63184 [11], presenta un diagramma di flusso descrittivo della procedura di valutazione di conformità per le correnti di contatto, tratto dal PAS IEC 63184, con un oggetto metallico non collegato a terra (valutazione del campo elettrico incidente), ovvero con un oggetto metallico collegato a terra (valutazione del campo magnetico incidente mediante la formula (3)). I dettagli delle condizioni di misurazione, l'impostazione della misurazione, ecc. sono riassunti nel documento IEC TR 63167 [26].

CONCLUSIONI

Come illustrato nel corso di questo articolo, la tecnologia WPT è una tecnologia emergente che risulta trasversale rispetto a molteplici ambiti di applicazione, dall'alimentazione di sensori alla ricarica delle batterie di dispositivi elettronici personali e di veicoli elettrici, con valori di potenza trasferita variabili sensibilmente in relazione alle applicazioni e ai tempi di ricarica. Contestualmente agli sviluppi della tecnologia WPT e alla sua progressiva diffusione, è emersa altresì l'esigenza di disporre di metodi e procedure standardizzate per la valutazione dell'esposizione umana ai CEM generati dai sistemi WPT ai fini della verifica di conformità ai pertinenti limiti normativi. I comitati elettrotecnici preposti, sia in ambito nazionale (Comitato Elettrotecnico Italiano, CEI-CT106) che internazionale (International Electrotechnical Commission, IEC-TC106), sono attualmente impegnati nello sviluppo di specifiche e norme tecniche per la valutazione dell'esposizione umana ai CEM generati da sorgenti WPT [11] [12].

All'interno del Comitato Tecnico CT 106 del CEI è stato istituito un Gruppo di Lavoro (GdL) dedicato alla valutazione dell'esposizione ai CEM generati dalle nuove tecnologie WPT. Il GdL ha iniziato a sviluppare un Rapporto Tecnico con lo scopo di fornire indicazioni sui metodi e sulle procedure di misura e

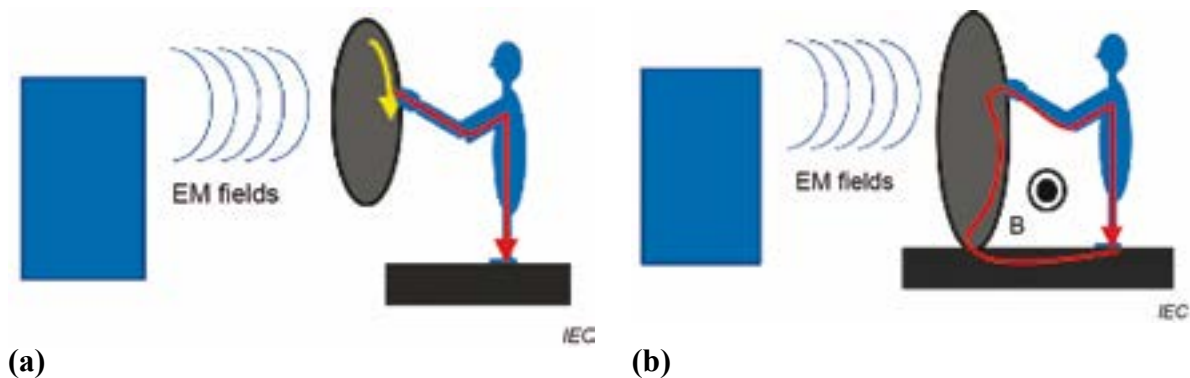


Figura 15 – Situazioni di esposizione a correnti di contatto: a) con oggetto metallico non collegato a terra, b) con oggetto metallico collegato a terra (immagine tratta da PAS IEC 63184 [11]).

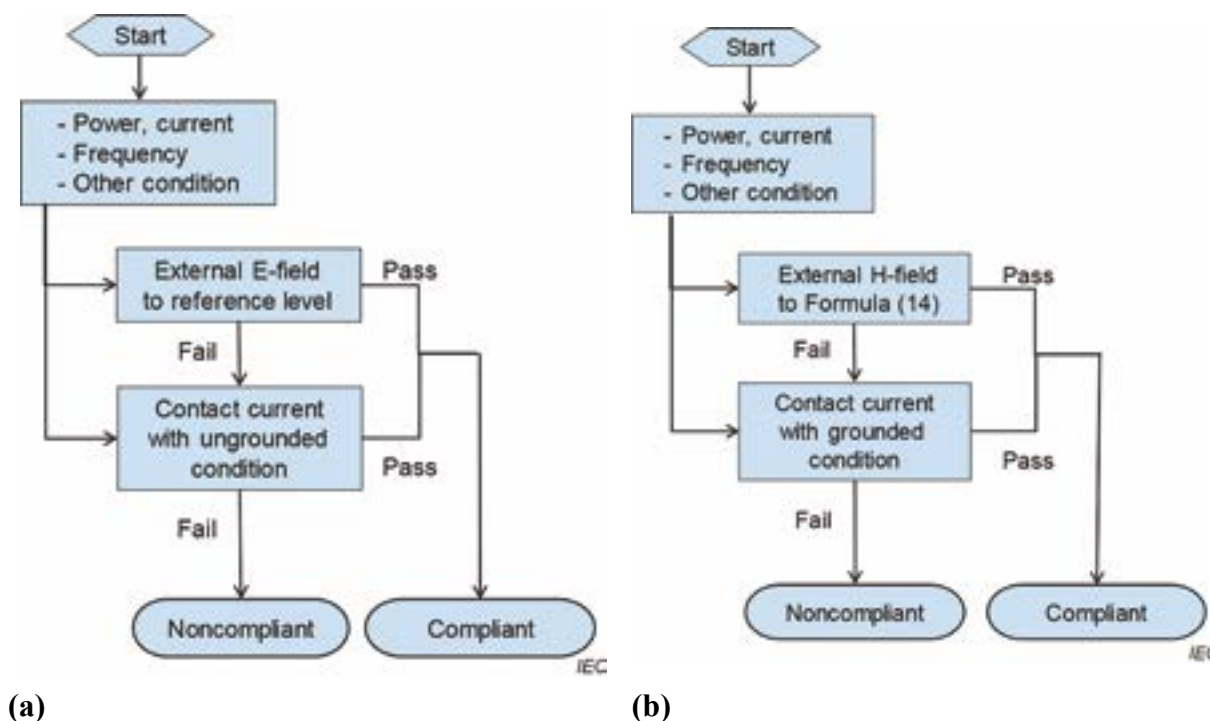


Figura 16 – Procedura di valutazione di conformità per le correnti di contatto: a) con oggetto metallico non collegato a terra (valutazione del campo elettrico incidente); b) con oggetto metallico collegato a terra (valutazione del campo magnetico incidente), (immagine tratta da [11]).

di calcolo per la valutazione dell'esposizione della popolazione generale e dei lavoratori ai CEM generati dai sistemi WPT sia di tipo induttivo che radiativo, tenendo conto di una serie di documenti tecnici e normativi disponibili (progetti di norme IEC e CENELEC, norme SAE, norme nazionali, documenti tecnici di buona prassi elaborati nell'ambito di progetti europei di ricerca, ecc.) e integrando le indicazioni sui metodi e sulle procedure di misura e di calcolo con altre informazioni di utilità per la valutazione dell'esposizione umana ai campi emessi dai sistemi WPT, in particolare attraverso esempi basati su casi di studio. Il Rapporto Tecnico intende rivolgersi a diverse tipologie di utilizzatori, quali i progettisti, i laboratori di prova e di ricerca e sviluppo, gli organismi di certificazione e gli enti di verifica, nonché i soggetti coinvolti a vario titolo nella valutazione dei rischi per la salute e la sicurezza derivanti dall'esposizione ai CEM [28].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nikola Tesla, U.S. patent 1,119,732 (1914).
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic', Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science* 317, 83, 2007.
- [3] G.A. Covic and J.T. Boys, "Inductive power transfer," *Proc. IEEE* vol. 101, pp. 1276-1289, Jun. 2013.
- [4] Decreto Legislativo 9 aprile 2008 n.81 (D.Lgs. 81/2008) – Testo coordinato con il D.Lgs. 3 agosto 2009, n. 106 – "Attuazione dell'art. 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro". Revisione novembre 2020.
- [5] Legge 22 febbraio 2001, n.36 "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici".

- [6] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003 “Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz”.
- [7] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 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”.
- [8] Legge 221/2012, Conversione in legge, con modificazioni, del Decreto Legge 18 ottobre 2012, n. 179 recante "Ulteriori misure urgenti per la crescita del Paese" (c.d. Decreto Crescita 2.0), coordinato con la legge di conversione 17 dicembre 2012, n. 221". Art. 14 “Interventi per la diffusione delle tecnologie digitali”. Comma 10, 11 e 12.
- [9] Raccomandazione del Consiglio delle Comunità europee, 12 luglio 1999 “Limitazione dell’esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz (1999/519/CE)”.
- [10] Direttiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 26 giugno 2013 sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all’esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) (ventesima Direttiva particolare ai sensi dell’art. 16, par. 1, della Direttiva 89/391/CEE) e che abroga la Direttiva 2004/40/CE; Direttiva 90/385/CEE del Consiglio, del 20 giugno 1990, per il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati Membri relative ai dispositivi medici impiantabili attivi.
- [11] IEC PAS 63184 (2021-05) 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).
- [12] IEC DTR 63377 Procedures for the assessment of human exposure to electromagnetic fields from radiative wireless power transfer systems - measurement and computational methods (Frequency range of 30 MHz to 300 GHz).
- [13] 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, disponibile su: <https://www.micev.eu/>
- [14] CEI EN IEC 61980-1 (2021-07) Sistemi di trasferimento di potenza wireless per veicoli elettrici (WPT) - Parte 1: Requisiti generali
- [15] CEI CLC IEC/TS 61980-2 (2021-05) Sistemi di trasferimento di potenza senza fili per veicoli elettrici (WPT). Parte 2: Requisiti particolari per la comunicazione tra veicolo elettrico (EV) e l’infrastruttura di ricarica.
- [16] CEI CLC IEC/TS 61980-3 (2021-05) Sistemi di trasferimento di potenza senza fili per veicoli elettrici (WPT). Parte 3: Requisiti particolari per sistemi di trasferimento di potenza senza fili a campo magnetico.
- [17] SAE J2954, “Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology”, revisione 20-10-2020.
- [18] SAE J2954/2, “Wireless Power Transfer & Alignment for Heavy Duty Applications”, versione bozza 2/12/2020.
- [19] H. K. Dashora, G. Buja, M. Bertoluzzo., R. Pinto, and V. Lopresto, “Analysis and design of DD coupler for dynamic wireless charging of electric vehicles”, *Journal of Electroma-*

- gnetic Waves and Applications*, vol. 32, no. 2, pp. 170-189, 2018. DOI: 10.1080/09205071.2017.1373036.
- [20] M.P. Theodoridis, "Effective capacitive power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 12, pp. 4906-4913, Dec. 2012.
- [21] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Phys.*, vol. 74, pp. 494-522, 1998.
- [22] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying Electric and magnetic fields (1Hz – 100 kHz)," *Health Physics*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, 2010.
- [23] ICNIRP. "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Phys.*, vol. 118, 483-542, 2020.
- [24] CEI EN 62232 (2018-03) Determinazione della intensità di campo elettromagnetico a radiofrequenza (RF), della densità di potenza e del tasso di assorbimento specifico (SAR) per valutare l'esposizione umana in prossimità di stazioni radio base.
- [25] CEI EN 62479 (2013-09) Valutazione della conformità di apparati elettrici ed elettronici di debole potenza alle restrizioni di base relative all'esposizione umana ai campi elettromagnetici (10 MHz - 300 GHz).
- [26] CEI EN 50663 (2018-05) Norma generica per la valutazione della conformità di apparecchiature elettroniche ed elettriche di bassa potenza ai limiti dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici (10 MHz - 300 GHz).
- [27] IEC TR 63167:2018, Assessment of contact current related to human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields.
- [28] CEI 106-45 (2021-01) Guida CEM - Guida alla valutazione dei rischi per la salute e la sicurezza derivante dall'esposizione ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (CEM) fra 0 Hz e 300 GHz nei luoghi di lavoro.