



Ricerca di Sistema elettrico

Sistema di ricarica wireless dinamica: effetti del disallineamento e campo magnetico residuo

Antonino Genovese, Rosanna Pinto, Vanni Lopresto

SISTEMA DI RICARICA WIRELESS DINAMICA: EFFETTI DEL DISALLINEAMENTO E CAMPO MAGNETICO
RESIDUO

Antonino Genovese, Rosanna Pinto, Vanni Lopresto (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.8 Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Ricarica wireless dinamica

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA.....	6
3 SETUP SPERIMENTALE	9
4 RISULTATI DELLE PROVE DI EFFICIENZA.....	11
5 VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE AL CAMPO MAGNETICO EMESSO DAL PROTOTIPO DI RICARICA DINAMICO....	13
6 CONCLUSIONI.....	16

Sommario

Il lavoro descritto nel presente documento è la prosecuzione delle prove su sistema di ricarica wireless dinamica realizzato nel PAR 2017. In pratica vengono riportati i risultati dei test espletati al fine di verificare il comportamento del sistema al variare del disallineamento trasversale e quali sono i valori del campo magnetico nelle adiacenze del sistema al fine di valutarne l'entità e la rispondenza ai limiti massimi ammessi dalle norme di riferimento.

1 Introduzione

Quanto descritto nel presente documento si colloca nell'obiettivo b.1 Ricarica wireless dinamica che prevedeva la realizzazione di una sezione di prova del sistema di ricarica wireless dinamica ed il test per:

- a) la validazione del comportamento per gli aspetti relativi al decadimento delle prestazioni al variare delle condizioni geometriche di accoppiamento
- b) il valore dei campi magnetici esterni all'area di accoppiamento per le valutazioni di rischio sanitario.

Il primo punto è una conseguenza del tipo di utilizzo del sistema di ricarica che valorizza la possibilità di ricaricare con continuità il veicolo attraverso il trasferimento di energia durante il movimento lungo una direttrice equipaggiata con le bobine primarie. Infatti il livello di potenza trasferibile è influenzato dai parametri geometrici dell'accoppiamento mutuo quali ad esempio la distanza verticale tra le bobine trasmettenti e quella ricevente. Ma anche dallo scostamento laterale delle medesime causato ad esempio da una variazione della traiettoria di guida rispetto alla linea di riferimento longitudinale.

Il secondo punto rientra nella esigenza di valutare la componente del campo magnetico esternamente presente alle bobine lungo la direttrice di posa del sistema in strada. Infatti questo potrebbe essere fonte di problemi di interazione con la presenza di esseri umani nelle prossimità durante l'esercizio del sistema.

Il lavoro svolto è quindi importante sia per valutare i rischi connessi all'uso di un sistema di tale specie e la capacità ad operare in modo significativo in presenza di scostamenti lungo la direzione del moto. Questo non solo per validare le soluzioni di progetto avanzate ma anche per proporre eventuali soluzioni migliorative in presenza di condizioni poco ottimali.

Questo lavoro è quindi una prosecuzione delle attività portate avanti nel triennio 2015-2017 che hanno visto le fasi di progettazione, realizzazione e test della sezione di prove per quel che concerne la funzionalità di sistema.

2 Descrizione del sistema

La ricarica wireless dinamica può dimostrarsi un utile strumento nello sviluppo della mobilità elettrica operando in specifici settori ove maggiormente si manifestano i limiti dei sistemi di accumulo attuali. Più specificatamente l'esigenza di avere elevate capacità di accumulo per garantire ampia autonomia risulta in un maggiore aggravio in peso e volume a bordo del veicolo nonché in una infrastruttura di ricarica di taglia abbastanza ampia in potenza per soddisfare le esigenze di ricarica in tempi brevi. La presenza di una struttura continua di ricarica può essere applicabile in quei contesti di percorso stradale rigido ossia di quelle percorrenze ove è possibile conoscere a priori la rotta, come ad esempio il Trasporto Pubblico Urbano, oppure è plausibile pensare ad un percorso su una specifica corsia attrezzata. Ma anche il trasporto privato non è da meno nell'essere indicato come utilizzatore di tale tecnologia avendo, ad esempio, i percorsi autostradali, una modalità di guida su corsie di marcia ben definite.

Nel PAR 2017 è stata portata avanti la realizzazione di una sezione di prova di un sistema wireless dinamico per applicazioni veicolari. La potenza di progetto è di 3 kW ed è stata valutata in base alle specifiche esigenze del veicolo di prova ed alla velocità di lavoro del medesimo.

La sezione di prova è costituita da tre bobine di track ed una di pickup (Figura 1) : le prime tre sono alimentate con tre inverter e sono dotate di circuito LC per risuonare alla frequenza di lavoro intorno a 88 kHz, la ricevente invece è accoppiata ad un circuito raddrizzatore ed un successivo convertitore di tipo buck per adattarsi alla tensione delle batterie.

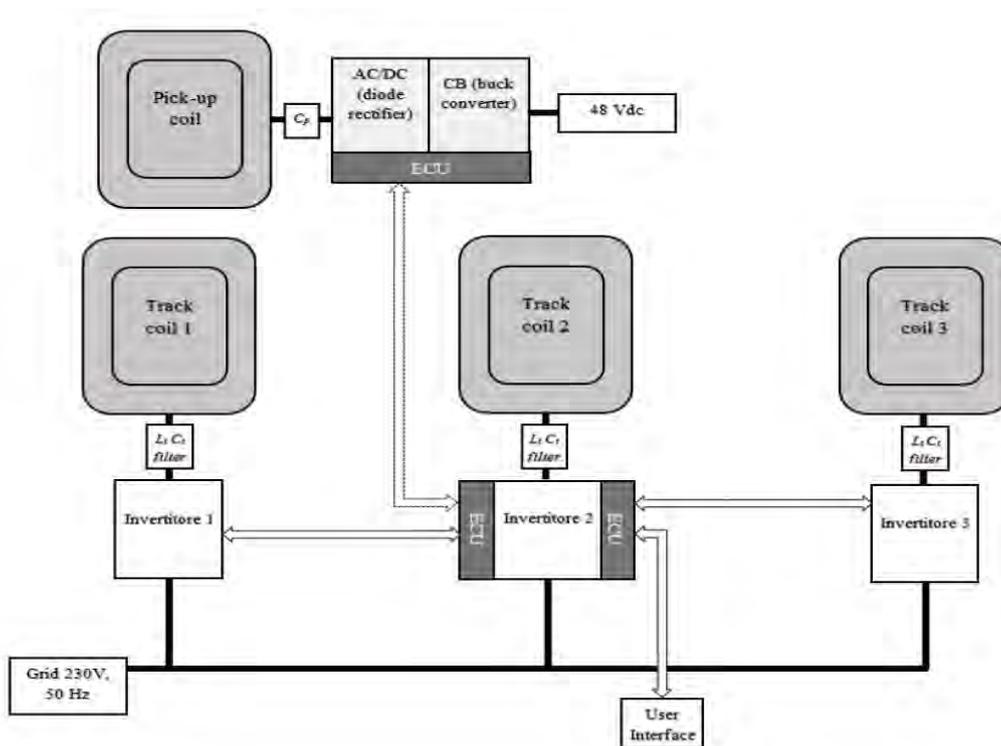


Figura 1: schema generale della sezione di prova

La verifica strumentale espletata nel PAR 2017 ha permesso di rilevare sperimentalmente l'andamento della mutua induttanza tra la bobina pick up (Rx) e quelle del track (Tx). Per l'esecuzione del test è stato appositamente realizzato una struttura sperimentale (Figura 2) in legno in grado di realizzare gli scorrimenti longitudinali e quindi di variare la posizione relativa della bobina ricevente rispetto a quelle trasmettenti.



Figura 2 : setup sperimentale per misura mutua induttanza

Le misure hanno verificato la variazione della induttanza delle singole bobine al variare della posizione della bobina di track lungo il senso di avanzamento (a passi discreti di 10 cm) come riportato in Figura 3.

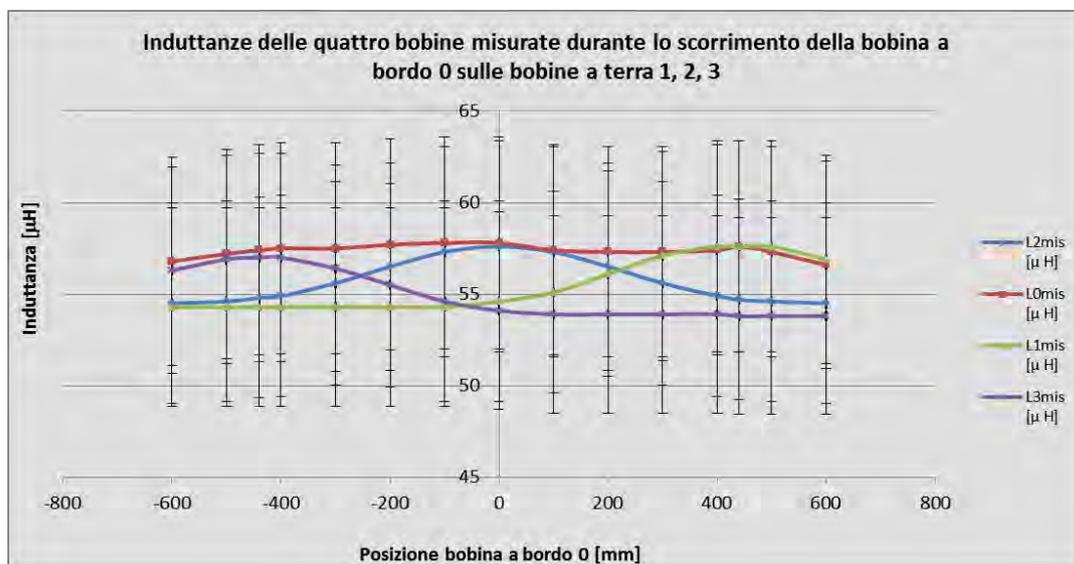


Figura 3 : induttanze bobine al variare della posizione di quella ricevente

La posizione 0 corrisponde alla posizione per la quale la bobina di bordo è esattamente allineata con la bobina di terra centrale (L2). Le posizioni ± 440 mm corrispondono alle posizioni per cui la bobina a bordo si trova esattamente allineata con le bobine laterali L3 e L1 rispettivamente. Come è evidente dalla Figura 3 l'induttanza della bobina a bordo è perlopiù costante ($57,4 \pm 0,3 \mu\text{H}$) durante il suo scorrimento sulle altre e questo permette di mantenere la risonanza del circuito, e quindi il suo massimo accoppiamento e rendimento, per tutto il passaggio della bobina a bordo su quelle a terra.

In Figura 4, sono mostrate le mutue induttanze della bobina a bordo rispetto a quelle a terra (M01, M02, M03) durante lo scorrimento di quest'ultima sulle altre. Questa misura ha confermato che la somma delle mutue induttanze è anch'essa costante durante lo scorrimento ($15,5 \pm 0,6 \mu\text{H}$, da - 440 a + 440 mm, posizioni per le quali la bobina a bordo si accoppia esattamente su quelle a terra, esterne). Questa caratteristica fa sì che il trasferimento di potenza dalle bobine a terra a quella a bordo e quindi alla batteria è costante durante il movimento.

In Figura 5 è mostrato anche l'andamento della mutua induttanza della bobina a bordo rispetto una delle tre a terra (M02) durante il suo spostamento trasversale lungo la direzione X. In questo caso è evidente un accoppiamento ancora accettabile ($M02 > 10 \mu\text{H}$) fino a spostamenti trasversali di 10 cm rispetto alla posizione di accoppiamento ottimale. Per disallineamenti dell'ordine di 30 cm l'accoppiamento è nullo. Questo risultato è importante poiché è indicazione della capacità del sistema a trasferire potenza in caso di disallineamento tra il veicolo ed il track.

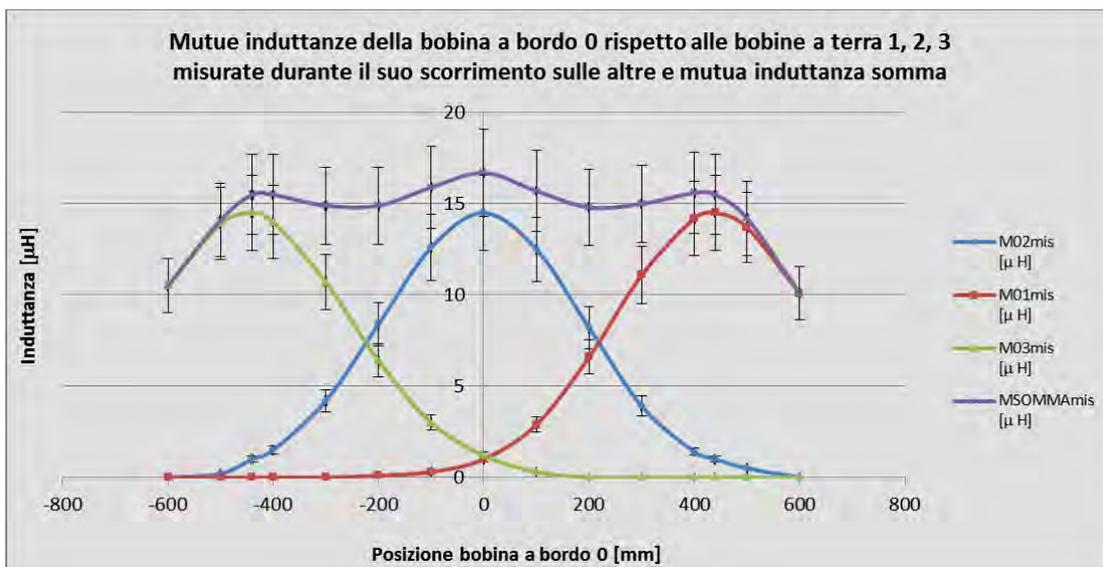


Figura 4: mutua induttanza tra le bobine a terra e quella di bordo al variare della posizione



Figura 5: variazione mutua induttanza a causa dello scorrimento trasversale

Come evidente in Figura 5 l’andamento della mutua induttanza della bobina a bordo rispetto una delle tre a terra (M02) durante il suo spostamento trasversale lungo la direzione X riporta un accoppiamento ancora accettabile ($M02 > 10 \mu H$) fino a spostamenti trasversali di 10 cm rispetto alla posizione di accoppiamento ottimale. Per disallineamenti dell’ordine di 30 cm l’accoppiamento è nullo. Con tali risultati ci si aspetta una riduzione della potenza trasferita al variare del disallineamento laterale.

Per valutare quanto effettivamente si perde in efficienza di trasferimento per il mancato allineamento trasversale si è eseguita una campagna di misure per la determinazione del rapporto potenza sul carico/potenza di ingresso. In Figura 6 è mostrato il circuito di alimentazione delle tre bobine di track ed in Figura 7 il circuito di uscita lato bobina di pickup.

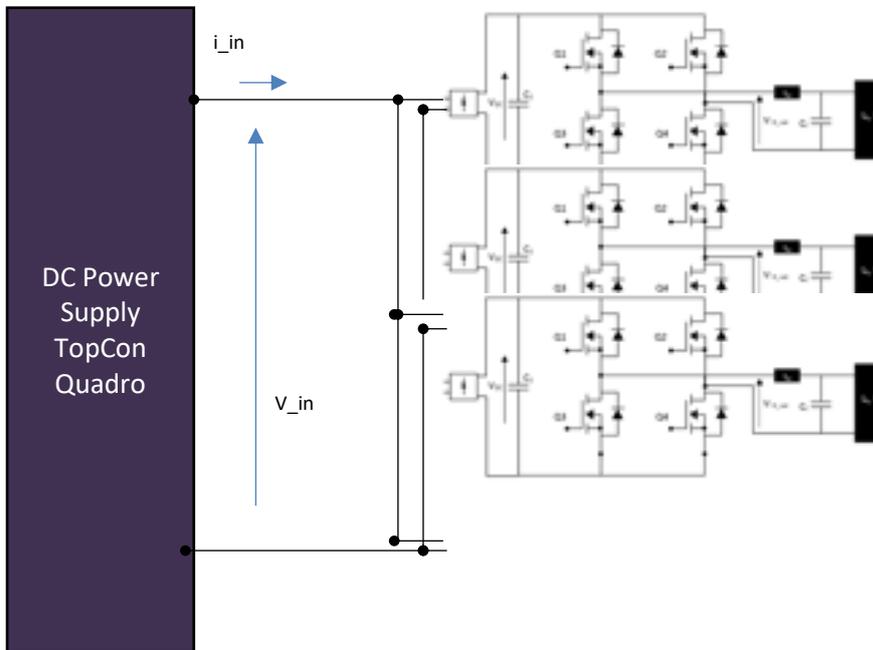


Figura 6 : circuito di misura ingresso

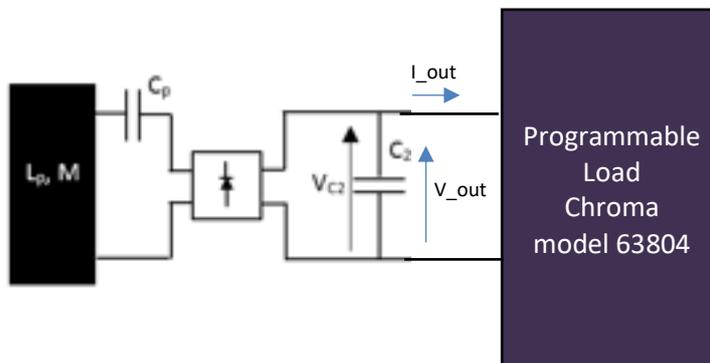


Figura 7 : circuito di misura in uscita

3 Setup sperimentale

Nella Figura 8 è mostrato il sistema in prova e la direzione di spostamento trasversale. Le prove sono state eseguite a carico costante (2.18Ω). Se l'accoppiamento decresce la tensione indotta sulla bobina ricevente sarà minore e di conseguenza anche la corrente. Sul primario si ridurrà la corrente e quindi la potenza trasmessa. In queste condizioni peggiora anche l'efficienza di trasferimento.

L'efficienza di trasferimento cambia durante lo spostamento longitudinale a causa della diversa posizione che le spire subiscono durante il movimento di avanzamento. Per questo si è operato con un rilevamento a

diverse distanze di avanzamento della bobina ricevente (Figura 9): posizione longitudinale dei punti di rilevamento: il rilevamento è dallo spigolo sinistro della ricevente bobina rispetto il medesimo spigolo della prima bobina componente la sezione di trasmissione. Esse sono riportate in Tabella 1 ed indicativamente corrispondono alle posizioni di copertura di metà o di tutta la spira per ogni bobina ricevente.

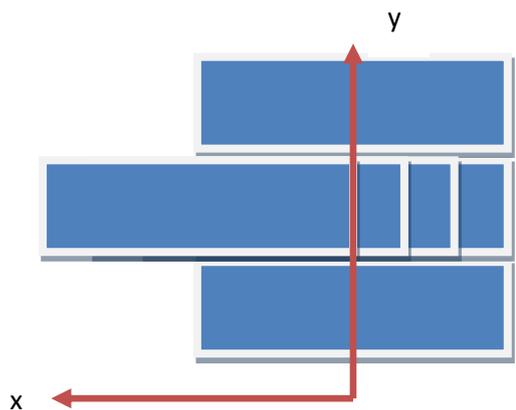


Figura 8: spostamento trasversale della bobina di pickup

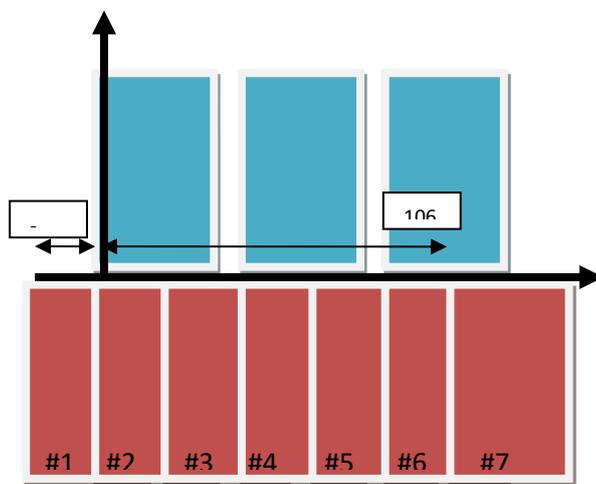


Figura 9: posizione longitudinale dei punti di rilevamento

	X (mm)	Y (mm)
1	0	-210
2	0	0
3	0	225
4	0	445
5	0	645
6	0	895
7	0	1065

Tabella 1: distanze di riferimento per l'avanzamento

4 Risultati delle prove di efficienza

La misura dell'efficienza di trasferimento è quindi espressa in funzione della posizione longitudinale della bobina ricevente. In Figura 10 è mostrato l'andamento dell'efficienza nelle diverse posizioni trasversali e longitudinali.

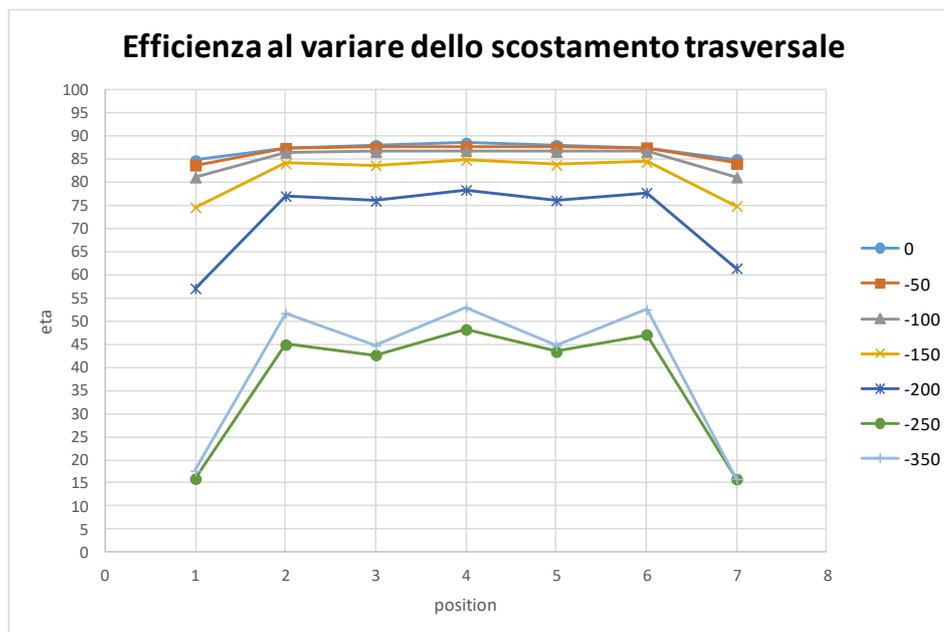


Figura 10: variazione dell'efficienza di trasferimento al variare dello scostamento trasversale

Poiché il trasferimento completo di energia si ha dopo un attraversamento globale si riporta l'efficienza come rapporto della somma della potenza nelle varie posizioni piuttosto che come media delle singole efficienze. La Figura 11 mostra come vi sia un decadimento significativo oltre i 20 cm di scostamento laterale.

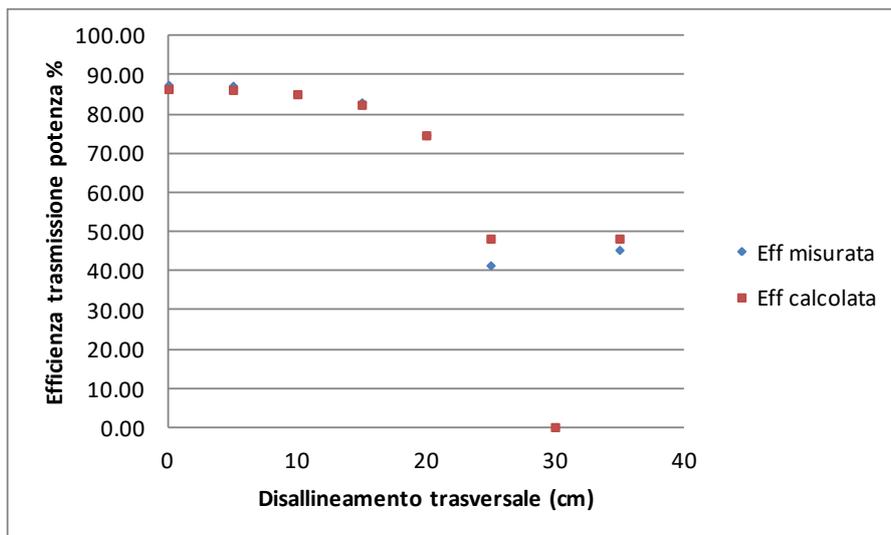


Figura 11: efficienza globale in relazione al disallineamento

I valori rilevati sperimentalmente sono confrontati con quelli calcolati attraverso il modello matematico del sistema di accoppiamento mutuo alla frequenza di risonanza:

$$\eta = \frac{Rl * (\omega M)^2}{(Rl + R2)(Rl + R2 + (\omega M)^2)}$$

con $Rl=2.16 \Omega$ ed $R2=0.25 \Omega$. Il valore della mutua induttanza è stato oggetto di misura nella precedente annualità e sono stati utilizzati i medesimi valori.

scostamento (cm)	Eff misurata	M misurata (μH)	Eff calcolata
0	87.50	14.5	86.45
5	87.28	14.0	86.23
10	85.15	12.1	85.14
15	83.05	9.4	82.43
20	74.67	6.2	74.65
25	41.43	3.0	48.26
30		0.1	0.12
35	45.37	3.0	48.26

Tabella 2: confronto valori misurati e calcolati per l'efficienza

La Tabella 2 riporta i valori calcolati che sono anche mostrati in comparazione grafica nella Figura 11. Dal confronto i valori sono ben in accordo escluso un maggiore scostamento per i maggiori valori di disallineamento laterale. Ma nelle condizioni di utilizzo la potenza in gioco è minima e l'influenza delle perdite per il controllo introduce uno scostamento che può spiegare la differenza.

5 Valutazione dell'esposizione al campo magnetico emesso dal prototipo di ricarica dinamica

Verificato il funzionamento del sistema di ricarica dinamica, si sono eseguite le misure del campo magnetico emesso in prossimità del sistema, finalizzate alla valutazione dell'esposizione per fini protezionistici. L'impianto normativo italiano per la protezione della popolazione dall'esposizione ai campi elettromagnetici, alla frequenza di lavoro del sistema di ricarica in esame (89 kHz), prevede l'adozione della Raccomandazione Europea del 1999. Il valore del campo di induzione magnetica (B) massimo permesso per l'esposizione della popolazione, a questa frequenza è pari a $6.25 \mu\text{T}$ (RMS).

Ad oggi, non esiste un protocollo di misura standardizzato per questa tipologia di sistemi, pertanto, in una prima fase, si è messo a punto un protocollo per la valutazione dell'esposizione ai campi magnetici emessi dal prototipo durante il suo funzionamento. Il protocollo è stato poi eseguito sul prototipo montato su banco, per poter lavorare in condizioni di riferimento riproducibili (Figura 8) Lo strumento utilizzato per queste misure è un misuratore di campo magnetico (ELT 400, Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, Germany), isotropo e con banda passante pari a 1 Hz – 400 kHz. Questo strumento è dotato di un sensore di campo magnetico triassiale di diametro pari a 90 mm. Le impostazioni selezionate sono state le seguenti:

1. Modalità 'Field strenght'
2. Misura 'root mean square' (RMS)
3. 'Low cut filter' impostato a 10 Hz

L'incertezza espansa è pari a $\pm 8\%$ considerando un fattore di copertura pari a 2 (livello di confidenza 95 %). Il sistema di riferimento adottato è quello di Figura 12.

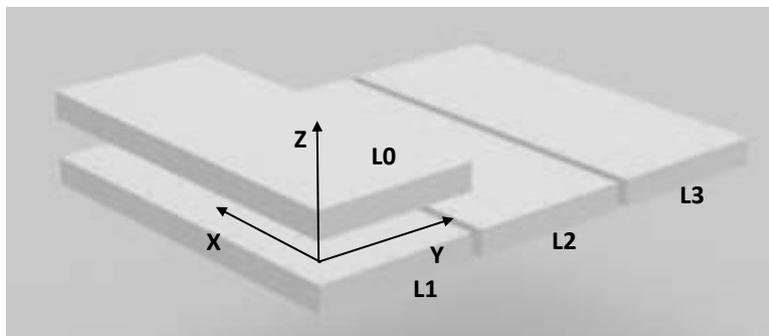


Figura 12: Schema del prototipo su banco e del sistema di riferimento adottato

Il centro degli assi è posto ad una quota posta al centro del traferro di aria tra le bobine e in corrispondenza dello spigolo esterno sinistro della prima bobina a terra (L1). Nella posizione (0, 0, 0) la bobina di pick up (L0) è perfettamente sovrapposta alla prima bobina a terra (L1).

La prima valutazione effettuata è stata la determinazione della distanza di rispetto da una coppia di bobine, perfettamente accoppiate, in configurazione statica. La distanza di rispetto è definita come la distanza dalla sorgente per la quale i valori di campo B misurato risultano inferiori a $6,25 \mu\text{T}$. Si sono quindi attivate solo le due bobine L0 e L1: il campo B è stato misurato posizionando il sensore a una quota pari al centro del traferro di aria e allontanandolo trasversalmente dalla sorgente, lungo la direzione X, Figura 13a, a passi discreti.

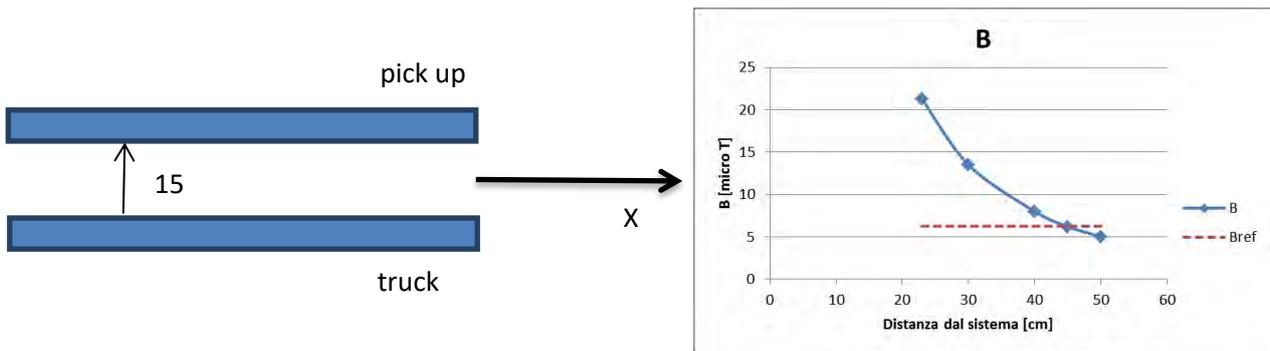


Figura 13: (a) sistema di misura; (b) campo B misurato in funzione della distanza trasversale dalla sorgente

Dato l'ingombro del supporto di legno che sostiene la bobina di pick up e l'ingombro del sensore, la distanza minore dalla sorgente, per la quale si è potuta eseguire una misura, è stata pari a 23 cm. I punti successivi sono stati 30 cm, 40 cm, 45 cm, 50 cm. I risultati sono riportati nel grafico in Figura 13b.

La distanza di rispetto dal sistema in configurazione statica è pari a 45 cm.

Fissata la distanza trasversale dal sistema a 45 cm si sono eseguite misure di campo B in 7 posizioni distinte del sensore e facendo muovere la bobina di pick up sulle altre accese, lungo la direzione Y, a passi discreti di 10 cm (Figura 14)

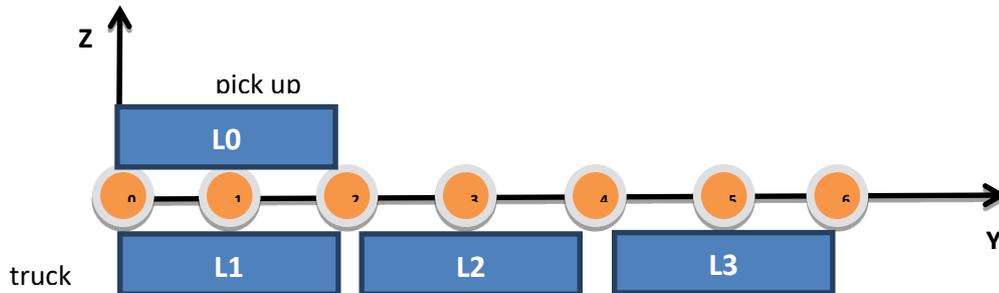


Figura 14: Sistema di riferimento per le misure di campo B durante il movimento della coil di pick up sulle altre. I punti da 0 a 6 sono i punti in cui è stato posizionato il sensore.

Le posizioni 0 e 6 sono state poste alle estremità delle bobine di terra. Le posizioni 1, 3, 5 sono state poste in corrispondenza del centro delle bobine di terra. Le posizioni 2 e 4 sono state poste in corrispondenza del punto centrale dello spazio tra le bobine, pari a 3 cm.

In Figura 15 sono mostrati gli andamenti del campo B, in funzione della posizione della bobina di pick up rispetto a quelle a terra e misurato nelle posizioni 1, 3 e 5. Analogamente in Figura 15 e Figura 16 sono mostrati gli andamenti del campo B nelle posizioni 0, 6 e 2 e 4 rispettivamente.

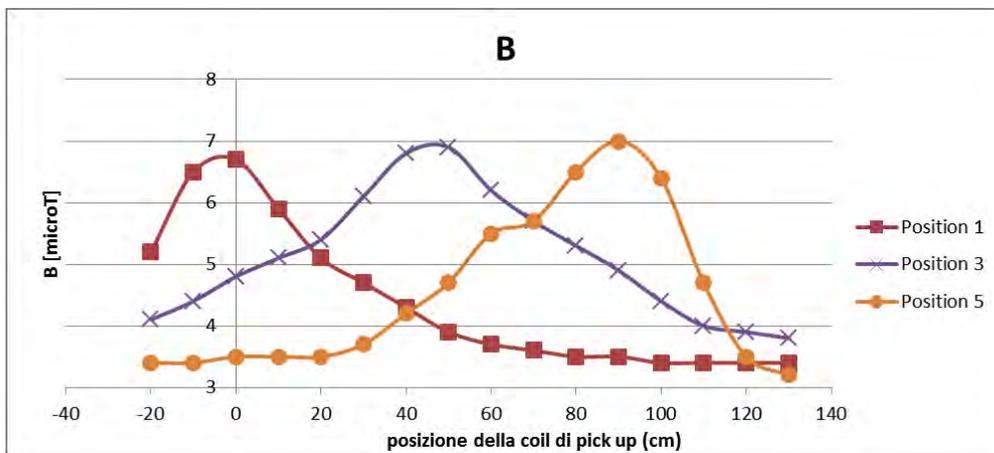


Figura 15: Campo B misurato nelle posizioni 1, 3, 5 in funzione dello spostamento della bobina di pick up rispetto quelle a terra.

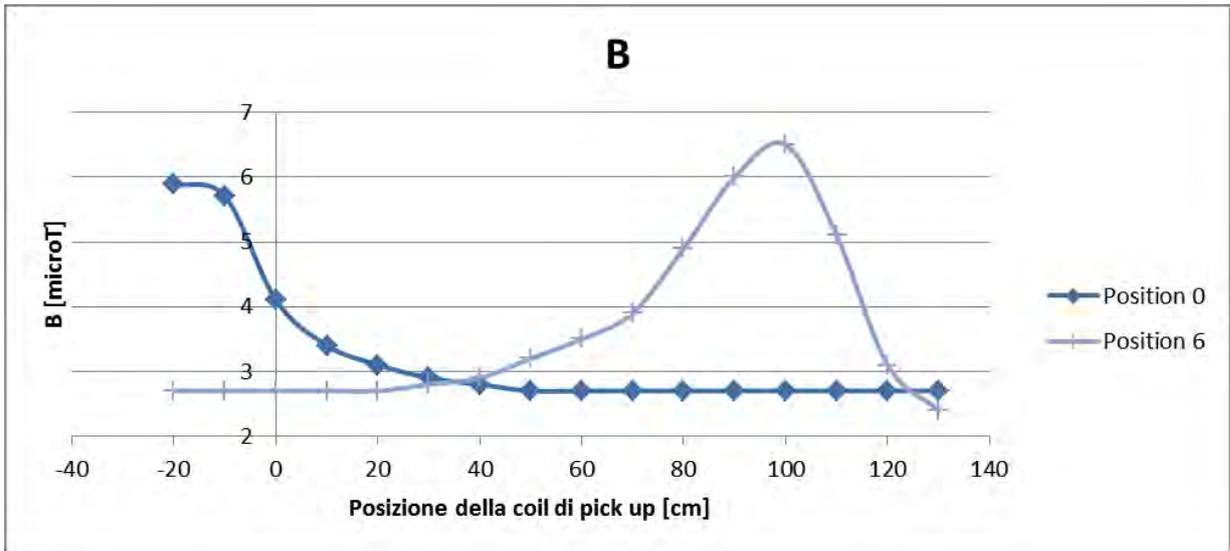


Figura 16: Campo B misurato nelle posizioni 0 e 6 in funzione dello spostamento della bobina di pick up rispetto a quelle a terra.

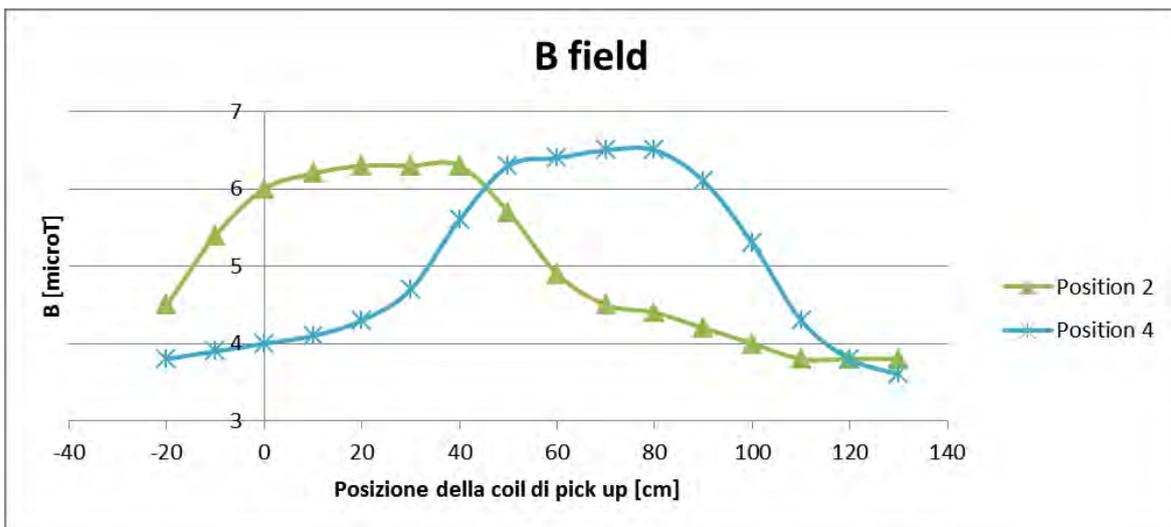


Figura 17: Campo B misurato nelle posizioni 2 e 4 in funzione dello spostamento della bobina di pick up rispetto a quelle a terra.

La prima cosa che si può notare dal confronto dei grafici nelle Figura 15,16,17 è che gli andamenti del campo B misurato sono diversi a seconda delle posizioni del sensore. C'è una similarità di andamento tra posizioni che possiamo definire omologhe, vale a dire le posizioni per le quali il sensore è al centro delle bobine di terra (posizioni 1, 3, 5) agli estremi del prototipo (0, 6) e al centro dello spazio di 3 cm tra le bobine di terra (2, 4). Pertanto gli andamenti del campo B non sono indipendenti dalla posizione del sensore rispetto al prototipo. I valori di campo B massimo (circa 7 μT) si misurano quando il sensore è posizionato in corrispondenza del centro delle bobine e quando la bobina di pick up è perfettamente accoppiata con una di quelle a terra. In questo caso, infatti le correnti in gioco sono le più elevate e, di conseguenza, anche i campi magnetici emessi (Figura 18).

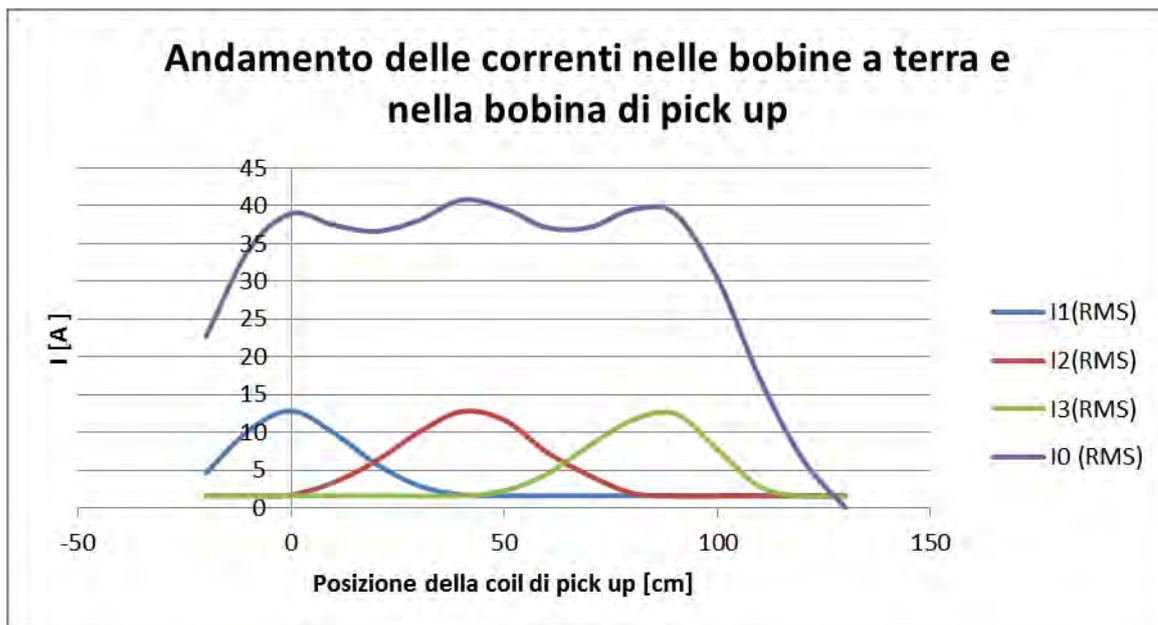


Figura 18: Correnti RMS nelle bobine in funzione dello spostamento della bobina di pick up rispetto quelle a terra

6 Conclusioni

L'attività di test ha verificato la dipendenza del trasferimento della potenza dagli scostamenti laterali. Questo era stato preliminarmente valutato attraverso la rilevazione dell'andamento della mutua induttanza in fase di realizzazione delle spire. Le misure hanno confermato che la realizzazione in base al progetto delle spire ha consentito di mantenere buone capacità di accoppiamento che si mantengono accettabili sino a 20 cm di scostamento laterale ma che risentono di una forte riduzione oltre tale valore. La qualità della realizzazione delle bobine conferma la rispondenza del modello matematico di efficienza con i valori di misura in campo.

Per i valori di campo magnetico la distanza di rispetto è stata individuata in 45 cm e in essa si sono determinati i comportamenti del campo magnetico al variare dello scorrimento longitudinale. Il campo magnetico dipende dalla posizione della bobina ricevente e risulta massimo in corrispondenza del centro delle bobine quando la bobina ricevente risulta centrata su esse. Questo poiché la corrente è maggiore per il massimo di trasferimento della potenza e il relativo campo è superiore.