



**Università degli studi di Padova**

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI  
FONDAMENTALI DI UN SISTEMA DI  
RICARICA DI AUTO ELETTRICHE  
“WHILE DRIVING”**

Relatore: Ch.mo Prof. Fabrizio Dughiero

Laureando: Marco Bertorelle

Anno Accademico: 2013/2014



# Sommario

La trasmissione di potenza wireless consiste nel trasferire potenza elettrica da un dispositivo ad un altro, senza l'utilizzo di conduttori per il collegamento, in modo da rendere più sicuro il trasferimento, anche per potenze elevate. Per fare questo, si usa una bobina sorgente e una ricevente, ove la prima, alimentata da una corrente elettrica alternata, induce una potenza elettrica nella ricevente.

La trasmissione wireless può avvenire a diverse frequenze, quindi nel presente lavoro è stato verificato il suo rendimento a 20, 85 e 140 kHz, tra due bobine distanziate 25 centimetri secondo il proprio asse, per la ricarica di veicoli elettrici.

Il problema è stato risolto realizzando un modello in MatLab che calcoli i parametri fondamentali del sistema al variare della potenza richiesta, necessaria alla ricarica della batteria.

I risultati ottenuti evidenziano come i rendimenti in assenza di rifasamento siano bassi mentre, nel caso si rifasi, migliorino notevolmente superando il 95%. Tuttavia questo è il rendimento solo del sistema di trasmissione, mentre se considerassimo anche le perdite nei conduttori di collegamento tra le bobine, nell'inverter e nella batteria, il rendimento complessivo potrà venire circa del 75%.



# Lista dei Simboli

<b>Grandezza</b>	<b>Simbolo</b>	<b>Unità</b>
resistenza	R	$\Omega$
induttanza	L	$H$
mutua induttanza	M	$H$
capacità	C	$F$
impedenza	Z	$\Omega$
frequenza	f	$Hz$
lunghezza	l	$m$
tempo	t	$s$
energia	E	$kWh$
potenza attiva	P	$W$
potenza reattiva	Q	$Var$
potenza apparente	S	$VA$
carica	-	$Ah$
induzione magnetica	B	$T$
flusso magnetico	$\phi$	$Wb$
tensione	V	$V$
corrente	I	$A$
densità di corrente	J	$A/m^2$
permeabilità magnetica	$\mu_0$	$H/m$
permittività elettrica	$\epsilon_0$	$F/m$



# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>Trasferimento di potenza wireless .....</b>	<b>3</b>
1.1 Witricity & Sistema tradizionale .....	3
1.2 Strong coupled mode .....	4
1.2.1 Coupled mode theory .....	4
1.2.2 Due oscillatori accoppiati .....	5
1.2.3 Modello analitico .....	7
1.2.4 Esempio sperimentale .....	10
1.3 Weak coupled mode .....	11
1.3.1 Modello analitico .....	11
1.3.2 Esempio sperimentale .....	13
<b>Sistemi per autotrazione .....</b>	<b>15</b>
2.1 Tecnologie in sviluppo .....	15
2.2 Sistema a bobine convenzionali .....	16
2.2.1 Circuito equivalente .....	17
2.2.2 Prova sperimentale .....	18
2.2.3 Rendimento .....	19
2.3 Sistema a bobine planari .....	22
2.3.1 Prova sperimentale .....	22
2.3.2 Misurazione del campo magnetico .....	24
2.4 Ricarica in movimento .....	25
2.4.1 Descrizione del dispositivo .....	25
2.4.2 Comportamento a diverse frequenze .....	26
2.4.3 Perdite dovute al manto stradale .....	27
2.4.4 Esempio reale .....	29
<b>Dimensionamento con metodi analitici .....</b>	<b>33</b>
3.1 Batterie al litio .....	33
3.2 Colonnine di Ricarica .....	35

3.3 Filo Litz .....	36
3.4 Trattazione analitica del modello .....	37
<b>Risultati Nissan Leaf .....</b>	<b>43</b>
4.1 Posizioni di calcolo .....	43
4.2 Prova a 20 kHz.....	45
4.2.1 Ricarica 2C (125 A).....	45
4.2.2 Ricarica 5C (330 A) .....	45
4.2.3 Risultati in forma grafica.....	50
4.3 Prova a 85 kHz.....	52
4.3.1 Ricarica 2C (125 A).....	52
4.3.2 Ricarica 5C (330 A).....	55
4.3.3 Risultati in forma grafica.....	58
4.4 Prova a 140 kHz.....	60
4.4.1 Ricarica 2C (125 A).....	60
4.4.2 Ricarica 5C (330 A).....	62
4.4.3 Risultati in forma grafica.....	65
4.5 Analisi dei risultati .....	67
<b>Risultati Tesla S .....</b>	<b>73</b>
5.1 Batterie al Litio.....	73
5.2 Risultati Analitici a 85 kHz.....	74
5.2.1 Ricarica 2C ( 420 A).....	74
5.2.2 Ricarica 5C (1050 A).....	77
5.2.3 Risultati in forma grafica.....	79
5.3 Analisi dei risultati .....	82
<b>Conclusioni.....</b>	<b>83</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>85</b>
<b>Appendice A.....</b>	<b>87</b>
<b>Appendice B.....</b>	<b>93</b>
<b>Appendice C.....</b>	<b>95</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>99</b>

# Indice delle figure

<b>Figura 1:</b> Componenti base del sistema wireless.....	3
<b>Figura 2:</b> Tensione di uscita del ricevitore in funzione della frequenza e della distanza. ..	4
<b>Figura 3:</b> Rendimento in funzione di $\sqrt{k/\Gamma_s\Gamma_D}$ .....	7
<b>Figura 4:</b> Schema della struttura sperimentale.....	10
<b>Figura 5:</b> Schema circuitale equivalente.....	12
<b>Figura 6:</b> Schema circuitale equivalente con incluse le capacità parassite.....	12
<b>Figura 7:</b> Potenza e Rendimento in funzione della distanza.....	14
<b>Figura 8:</b> Bus con supercapacitori a Shanghai.....	16
<b>Figura 9:</b> Circuito concettuale della ricarica wireless.....	16
<b>Figura 10:</b> Circuito equivalente del dispositivo wireless.....	17
<b>Figura 11:</b> Risultati ottenuti con $C=120$ nF e $f_0=2246$ Hz costante.....	20
<b>Figura 12:</b> Risultati ottenuti con $C=120$ nF e variando la frequenza.....	20
<b>Figura 13:</b> Risultati ottenuti con $C=15$ nF e variando la frequenza.....	21
<b>Figura 14:</b> Rendimento del trasferimento in funzione dello scorrimento degli assi.....	21
<b>Figura 15:</b> Prototipo del sistema di carica wireless.....	22
<b>Figura 16:</b> Bobina primaria e secondaria.....	23
<b>Figura 17:</b> Misurazione del campo magnetico nei due casi.....	24
<b>Figura 18:</b> Bobina induttrice e ricevente.....	25
<b>Figura 19:</b> Grandezze in funzione della frequenza.....	26
<b>Figura 20:</b> Circuito equivalente con l'inserimento dell'elemento dispersore $R_c$ e rappresentazione della prova eseguita in laboratorio con un campione di asfalto immerso tra le due bobine.....	27
<b>Figura 21:</b> Caso iniziale e intermedio della sovrapposizione tra bobina induttrice e ricevente.....	28
<b>Figura 22:</b> Rendimento in funzione della posizione del veicolo .....	28
<b>Figura 23:</b> Esempio di una strada con sistema OLEV.....	29
<b>Figura 24:</b> Carica e utilizzo dell'energia della batteria.....	30
<b>Figura 25:</b> Stato della carica in funzione dei chilometri percorsi.....	32
<b>Figura 26:</b> Disposizione batteria nella Nissan Leaf.....	34
<b>Figura 27:</b> Tensione della batteria in funzione dell'energia.....	35

<b>Figura 28:</b> Effetto pelle in un conduttore.....	36
<b>Figura 29:</b> Fili Litz con diversi tipi di guaina.....	37
<b>Figura 30:</b> rappresentazione di una spira rettangolare nel piano x-y.....	38
<b>Figura 31:</b> Circuito equivalente con rifasamento serie.....	42
<b>Figura 32:</b> Posizione della bobina ricevente rispetto alla sorgente; (a) l'auto passa centralmente alla corsia, (b) l'auto passa sfasata di 25 cm rispetto all'asse della bobina sorgente, (c) sfasamento di 50 cm, (d) sfasamento di 75 cm.....	45
<b>Figura 33:</b> Distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 2C (a) e 5C (b) a 20 kHz.....	51
<b>Figura 34:</b> Plot induzione magnetica lungo l'asse Y della bobina sorgente 20 kHz.....	52
<b>Figura 35:</b> Distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 2C (a) e 5C (b) a 85 kHz.....	59
<b>Figura 36:</b> Plot induzione magnetica lungo l'asse Y della bobina sorgente 85 kHz.....	59
<b>Figura 37:</b> Distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 2C (a) e 5C (b) a 140 kHz.....	66
<b>Figura 38:</b> Plot induzione magnetica lungo l'asse Y della bobina sorgente a 140 kHz.....	66
<b>Figura 39:</b> Rendimento del sistema a 85kHz con ricarica 2C con e senza rifasamento....	67
<b>Figura 40:</b> Rendimento del sistema a 85kHz con ricarica 5C con e senza rifasamento....	68
<b>Figura 41:</b> Chilometri necessari per ricaricare la batteria a due diverse potenze in funzione della velocità del veicolo.....	69
<b>Figura 42:</b> Distribuzione dell'induzione magnetica al variare della posizione reciproca tra bobina ricevente e sorgente.....	71
<b>Figura 43:</b> Tesla S.....	73
<b>Figura 44:</b> Posizionamento delle batterie sull'auto.....	74
<b>Figura 45:</b> Distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 2C (a) e 5C (b) a 85 kHz.....	81
<b>Figura 46:</b> Plot induzione magnetica lungo l'asse Y della bobina sorgente a 85 kHz.....	81
<b>Figura 47:</b> Confronto tra i chilometri necessari alla ricarica di 12 kWh della.....	82

# Introduzione

A causa dell'aumento vertiginoso di gas serra nell'atmosfera, soprattutto anidride carbonica, al quale si è assistito negli ultimi anni, si sta intervenendo per ridurre al minimo queste emissioni. Uno dei principali settori produttore di  $CO_2$  è quello dei trasporti, ecco perché si stanno sviluppando automobili che, invece di utilizzare combustibili fossili come alimentazione, utilizzino energia elettrica.

Purtroppo quest'ultime godono ancora di una bassa autonomia causata dalla limitata capacità della batteria, ecco perché si stanno sviluppando diversi metodi per ricaricarla con diverse modalità e sempre in minor tempo, come le colonnine a ricarica rapida, la ricarica wireless statica, oppure la ricarica wireless in movimento; in quest'ultimo punto si focalizzerà il nostro studio.

Lo scopo è stato di implementare un programma in MatLab, che permetterà il dimensionamento dei parametri di un sistema di ricarica wireless in movimento, al variare della potenza richiesta ai capi della batteria.

Oltre a valutare i parametri circuitali fondamentali, come il valore delle resistenze e delle induttanze, verranno valutati anche il rendimento del sistema al variare della posizione dell'auto rispetto alla bobina sorgente, inglobata nell'asfalto, con e senza rifasamento e infine, si valuterà il numero di bobine necessario alla ricarica al variare della velocità.

A seguire, nei primi due capitoli verrà spiegato come avviene la trasmissione di potenza wireless e verranno mostrati alcuni esempi già esistenti, spiegandone pregi e difetti. Poi verranno illustrate le principali formulazioni adottate e le ipotesi fatte per poi mostrare, negli ultimi capitoli, i risultati ottenuti con il modello analitico e le analisi su di essi.



# Capitolo 1

## Trasferimento di potenza wireless

Sempre più dispositivi portatili, per funzionare, necessitano di sistemi di accumulo di energia che costituiscono gran parte del costo dell'oggetto stesso. A seconda della modalità di utilizzo, nasce il bisogno di ricaricarli più o meno frequentemente con tutti i disagi che questo può comportare. Da qui entra in gioco l'onda elettromagnetica per permettere di ricaricare molteplici dispositivi senza l'ausilio di cavi e prese, aumentando in questo modo sia l'autonomia che il comfort di utilizzo.

### 1.1 Witricity & Sistema tradizionale

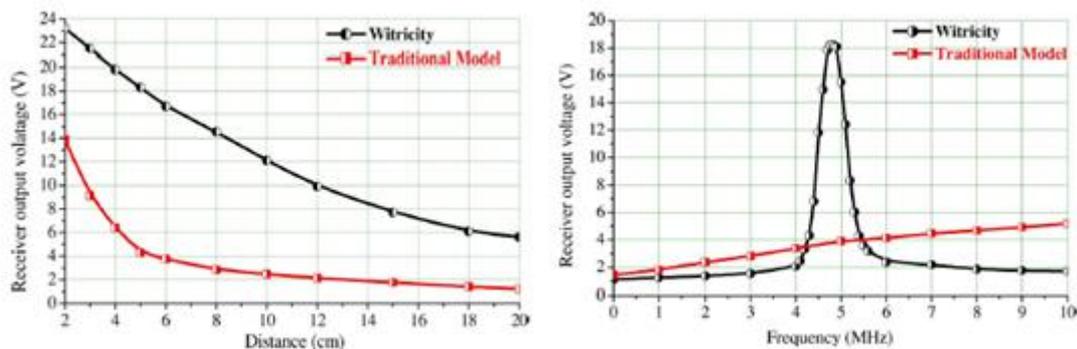
La nuova tecnologia di trasferimento induttivo wireless, si basa sul concetto di campo magnetico fortemente accoppiato e in risonanza. Il principio fondamentale è che gli oggetti in risonanza possono scambiarsi energia in modo efficiente mentre, quelli non risonanti interagiscono debolmente.



**Figura 1:** Componenti base del sistema wireless.

A causa del grande traferro i trasformatori utilizzati hanno grande induttanza di dispersione e piccola mutua induttanza, così da avere un coefficiente di accoppiamento piccolo, circa 0,1 a differenza dei trasformatori convenzionali che hanno 0,95-0,98. A giudicare da questo aspetto la tecnologia sarebbe impraticabile se non fosse per il fatto che alla frequenza di risonanza, il coefficiente di accoppiamento aumenta fino a valori compresi tra 0,7-0,9.

Per entrambi i sistemi, diminuendo la distanza tra le bobine aumenta l'intensità del campo magnetico e quindi la distanza gioca un ruolo fondamentale nel trasferimento di potenza wireless.



**Figura 2:** Tensione di uscita del ricevitore in funzione della frequenza e della distanza.

Nelle due figure [1] precedenti si nota che la tensione indotta dal sistema Witricity è massima quando la frequenza è pari a quella di risonanza mentre nel sistema tradizionale aumentando la frequenza la tensione cresce solo leggermente. Si vede anche che, aumentando la distanza fra bobina sorgente e ricevente, nel caso di sistema tradizionale la diminuzione di tensione è molto più marcata rispetto al Witricity.

## 1.2 Strong coupled mode

È il primo modello ideato da un gruppo di ricercatori del MIT di Boston, che ha concentrato la propria attenzione sull'utilizzo del fenomeno della risonanza. Concentrando l'analisi sul campo elettromagnetico, questo sistema offre indubbi vantaggi per il trasferimento di potenza a medio raggio (la distanza non supera la lunghezza caratteristica del sistema di 10 volte) quali non dover orientare la sorgente, non interagire con materiali non conduttori e infine non essere vincolata alla configurazione dell'ambiente circostante.

### 1.2.1 Coupled mode theory

Per comprendere a fondo questo sistema non basta analizzare i due dispositivi come dei circuiti LRC con gli elementi caratteristici concentrati in punti precisi, ma si ricorre alla

*coupled-mode theory*, che ci permette di avere una modellizzazione semplice ed accurata del circuito a parametri distribuiti.

Il principale pregio sta nel fatto che si riduce l'analisi di un sistema fisico in risonanza, alla soluzione del sistema di equazioni differenziale [2] :

$$a_m(t) = -(i\omega_m - i\Gamma_m)a_m(t) - \sum_{m \neq n} ik_{mn} a_n(t) + F_m(t) \quad (1.1)$$

Dove gli indici m e n denotano i differenti oggetti risonanti. La variabile  $a_m(t)$  è definita in modo che l'energia contenuta nell'oggetto m sia  $|a_m(t)|^2$ ,  $\omega_m$  è la frequenza di risonanza dell'oggetto isolato e  $\Gamma_m$  è il tasso di perdita intrinseco dovuto, per esempio, all'assorbimento e alle perdite radiali. Il  $k_{mn}$  è il coefficiente di accoppiamento tra gli oggetti indicati nel pedice e  $F_m(t)$  sono i termini forzanti del sistema. Le stesse variabili con pedice 0 si riferiscono invece ad un oscillatore non accoppiato e non pilotato.

È utile definire un parametro adimensionale denominato fattore di qualità:

$$Q = 2\pi \frac{\text{energia immagazinata}}{\text{potenza dissipata per periodo}} = \frac{\omega_0}{2\Gamma} \quad (1.2)$$

Indicante, per un periodo di oscillazione di un oggetto risonante, la perdita di 1/Q della sua energia.

Per utilizzare questo metodo è necessario supporre che l'intervallo delle frequenze d'interesse sia sufficientemente limitato in modo tale da poter considerare gli altri parametri costanti e l'equazione come lineare. Da questo deriva la possibilità di applicare la sovrapposizione degli effetti ai due oggetti per il calcolo dei campi.

### 1.2.2 Due oscillatori accoppiati

Analizzando il sistema costituito da due oscillatori accoppiati in risonanza, definiti in seguito sorgente (caratterizzato dal pedice S) e ricevente (caratterizzato dal pedice D), si ottiene il seguente sistema:

$$a_s = -i(\omega_S - \Gamma_S)a_s - ik a_D + F_m e^{-i\omega t} \quad (1.3)$$

$$\dot{a}_D = -i(\omega_D - \Gamma_D)a_D - ik a_S + F_m e^{-i\omega t} \quad (1.4)$$

dove  $k$  è senza pedice in quanto si stanno considerando due oscillatori identici. Le soluzioni del sistema risultano:

$$a_S = \frac{[\Gamma_D - i(\omega - \omega_D)F_m e^{-i\omega t}]}{k^2 + \Gamma_S \Gamma_D - (\omega_S - \omega)(\omega_D - \omega) + i[\Gamma_S(\omega_D - \omega) + \Gamma_D(\omega_S - \omega)]} \quad (1.5)$$

$$a_D = \frac{-ik F_m e^{-i\omega t}}{k^2 + \Gamma_S \Gamma_D - (\omega_S - \omega)(\omega_D - \omega) + i[\Gamma_S(\omega_D - \omega) + \Gamma_D(\omega_S - \omega)]} \quad (1.6)$$

Una volta che il ricevente è eccitato dalla sorgente si riesce a ricavare energia e convertirla in lavoro attraverso un carico (denotato da  $W$ ) aggiunto al circuito secondario che nel caso di un circuito elettrico è rappresentato da una resistenza elettrica  $R$ . Questa fa variare il tasso di perdita del ricevente facendolo diventare  $\Gamma'_D = \Gamma_D + \Gamma_W$ .

Si procede ora al calcolo del rendimento totale del sistema:

$$\eta = \frac{\Gamma_W |a_D|^2}{\Gamma_S |a_S|^2 + (\Gamma_W + \Gamma_D) |a_D|^2} = \frac{\Gamma_W k^2}{\Gamma_S [(\Gamma_W + \Gamma_D)^2 + (\omega - \omega_D)^2] + (\Gamma_W + \Gamma_D) k^2} \quad (1.7)$$

da cui si ricava che risulta massimo per  $\omega = \omega_D$ .

Tuttavia, dato un certo sistema, l'unica cosa su cui si può agire è il carico da alimentare e quindi massimizzeremo il rendimento in funzione di  $\Gamma_W$  che conduce direttamente al valore  $\Gamma_W = \Gamma_D \sqrt{1 + k^2 / \Gamma_S \Gamma_D}$ . Si trova quindi che il rendimento dipende solamente dal parametro adimensionale  $k / \sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$ .

La condizione per aver un accoppiamento minimamente efficiente è  $k / \sqrt{\Gamma_S \Gamma_D} > 1$  e sopra di questo limite si considera lo stato in regime fortemente accoppiato (*strongly coupled regime*) nel quale il rendimento cresce velocemente e asintoticamente a 1. Questo si capisce anche intuitivamente visto che il numeratore rappresenta l'energia scambiata tra i due oggetti mentre il denominatore la velocità di dissipazione dell'energia stessa.

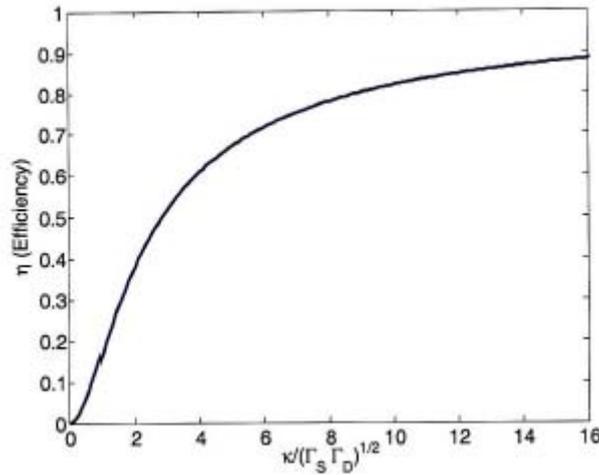


Figura 3: Rendimento in funzione di  $k/\sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$ .

### 1.2.3 Modello analitico

Il prototipo su cui si sono basati i ricercatori è costituito da due bobine di rame identiche formate da  $n$  avvolgimenti di raggio  $r$  e altezza  $h$ , per una lunghezza totale del conduttore  $l$  con sezione di raggio  $a$ .

Ponendo  $s$  parametro della coordinata spaziale e la coordinata zero al centro della bobina in modo che la lunghezza vari da  $l/2$  a  $-l/2$  si ottiene una corrente  $I = I_0 \cos\left(\frac{\pi s}{l}\right) e^{-i\omega t}$ .

Utilizzando l'equazione della continuità di carica:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad (1.8)$$

Si trova che la densità di carica lineare è della forma  $\lambda_0 \sin\left(\frac{\pi s}{l}\right) e^{-i\omega t}$ , tale da imporre che metà bobina contiene una carica oscillante di ampiezza  $q_0 = \lambda_0 l / \pi$  uguale e opposta all'altra metà.

Si procederà ora alla determinazione analitica delle diverse variabili necessarie per l'applicazione del *coupled-mode theory* al fine di avere un riscontro dei successivi risultati sperimentali che si otterranno.

Frequenza di risonanza  $f_0$ : quando la bobina entra in risonanza la corrente e la carica sono sfasate di  $\pi/2$ , cosicché quando la corrente ha la massima intensità, la densità di carica è nulla e quindi è possibile riferire l'energia in questo determinato istante all'azione della

sola corrente. Dalla teoria definiamo  $L$  e  $C$  per ogni bobina isolata, in riferimento alla geometria della stessa:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi|I_0|^2} \iint dr dr' \frac{J(r) \cdot J(r')}{|r - r'|} \quad (1.9)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0|q_0|^2} \iint dr dr' \frac{\rho(r) \cdot \rho(r')}{|r - r'|} \quad (1.10)$$

Dopo aver calcolato l'induttanza e la capacità della bobina, possiamo determinare l'energia da essi contenuta:

$$U = \frac{1}{2}L|I_0|^2 = \frac{1}{2} \frac{|q_0|^2}{C} \quad (1.11)$$

Da cui si ottiene insieme all'equazione di continuità della carica la frequenza di risonanza:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.12)$$

Grazie a queste considerazioni si può ora considerare la bobina come un oscillatore standard all'interno della *coupled-mode theory* definendo  $a(t) = \sqrt{\frac{L}{2}}I_0(t)$ .

Perdite: abbiamo perdite per effetto joule; Per calcolare la resistenza della bobina bisogna considerare che a frequenze di MHz l'effetto pelle è molto marcato e quantificabile come  $\sqrt{2/\mu_0\sigma\omega}$  dove  $\sigma$  è la conduttività del materiale. Quindi, poiché la media dell'ampiezza al quadrato di una distribuzione di corrente sinusoidale è  $|I_0|^2/2$ , si ottiene una resistenza complessiva pari a:

$$R_0 = \sqrt{\frac{\mu_0\omega}{2\sigma}} \frac{l}{4\pi a} \quad (1.13)$$

Per quanto riguarda il calcolo della radiazione persa, si può scomporre in due termini: il primo, dovuto alla circolazione nelle spire della corrente risulta approssimabile ad un dipolo magnetico e il secondo, causato dall'oscillazione della carica lungo la bobina, è assimilabile ad un dipolo elettrico. Grazie alle ipotesi fatte, l'energia totale dissipata è:

$$R_r = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left( \frac{\pi}{12} n^2 \left( \frac{\omega r}{c} \right)^4 + \frac{2}{3\pi^3} \left( \frac{\omega h}{c} \right)^2 \right) \quad (1.14)$$

Con il primo termine riferito al dipolo magnetico e il secondo a quello elettrico. Ora possiamo calcolare il tasso intrinseco di perdita associato alla *coupled-mode theory*  $\Gamma = (R_0 + R_r)/2L$ . Per un paragone con i risultati ottenuti dal calcolatore si definiscono i fattori di potenza ohmico  $Q_0 = \omega_0 L/R_0$  e radiativo  $Q_r = \omega_0 L/R_r$  che sono in relazione tra loro come  $Q^{-1} = Q_0^{-1} + Q_r^{-1}$ .

Coefficiente di accoppiamento  $k$ : assumendo uno stato quasi stazionario nelle quali le correnti e la densità di carica variano come  $e^{-i\omega_0 t}$ , si può ricavare il coefficiente di accoppiamento  $k_{DS}$  della potenza trasferita dalla sorgente al ricevente:

$$P_{DS} = \int dr E_S(r) \cdot J_D(r) = -\frac{1}{4\pi} \iint dr dr' \left( \mu_0 \frac{J_S(r')}{|r' - r|} + \frac{\rho_S(r')}{\varepsilon_0} \frac{r' - r}{|r' - r|^3} \right) \cdot J_D(r') \quad (1.15)$$

dove  $J_S$  e  $\rho_S$  sono proporzionali a  $I_S$  mentre  $J_D$  a  $I_D$  e quindi si ottiene:

$$P_{DS} = i\omega_0 M I_S I_D \quad (1.16)$$

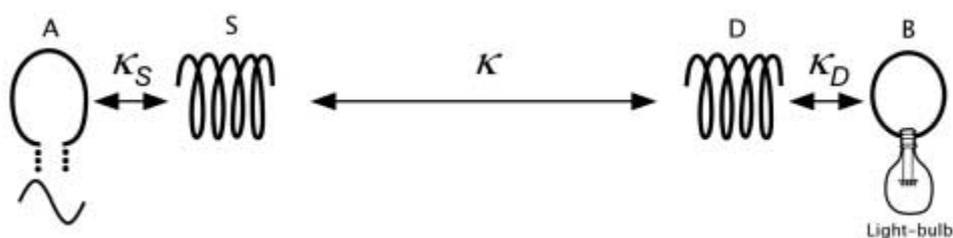
dove  $M$  è l'induttanza effettiva in funzione della geometria e della pulsazione di risonanza del sistema  $\omega_0$ . In definitiva si conclude l'analisi analitica del modello sperimentale determinando il valore di  $k$ , dato dalla seguente formula:

$$k = \omega_0 M / 2\sqrt{L_S L_D} \quad (1.17)$$

### 1.2.4 Esempio sperimentale

Le misure sperimentali di questi parametri sono state effettuate eccitando la sorgente attraverso una spira connessa a un generatore misurando poi l'ampiezza dell'eccitazione della bobina autorisonante attraverso una spira di ricezione collegata ad un oscilloscopio.

Come circuito pilota per regolare l'intero sistema di trasmissione wireless si utilizza un oscillatore Colpitts il cui elemento induttivo consiste in una spira di rame di raggio 25 cm (A), questo è accoppiato induttivamente con la bobina sorgente (S), posta nelle immediate vicinanze. Il carico, invece, consiste in una lampadina da 60 W collegata ad una spira (B) accoppiata induttivamente con la bobina ricevente (D), analogamente a quanto fatto con la sorgente [3].



**Figura 4:** Schema della struttura sperimentale.

Il circuito pilota crea un'onda sinusoidale di frequenza 9.90 MHz; la distanza tra il ricevitore e il circuito con la lampadina è stata ottimizzata in funzione del valore ottimale del rapporto  $\frac{\Gamma_W}{\Gamma_D} = \sqrt{1 + k^2/\Gamma^2}$  e la misura del rendimento è stata effettuata variando la potenza dell'oscillatore fino a che la lampadina non ha emesso la sua luminosità nominale.

Il rendimento riferito al solo trasferimento di potenza wireless è calcolabile con due diversi metodi: il primo ricavabile dal modello analitico attraverso le correnti e il secondo misurando la potenza estratta dalla parete per alimentare l'oscillatore, come si vedrà però questo metodo, non conducendo a un risultato certo, è utilizzato solo per verificare l'altro. Come prima cosa, utilizzando un amperometro che non abbassa il fattore di qualità in modo apprezzabile, si misurano le correnti al centro delle bobine risonanti  $I_S$  e  $I_D$  per poi inserirle nella formula per il calcolo della potenza di ognuna delle due bobine:

$$P_i = \Gamma L |I_i|^2 \quad (1.18)$$

Una volta note le potenze si può procedere con la determinazione del rendimento:

$$\eta = \frac{P_W}{P_S + P_D + P_W} \quad (1.19)$$

### 1.3 Weak coupled mode

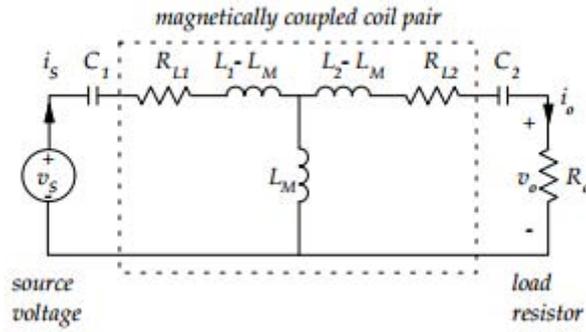
Un'alternativa al precedente modello è stata presentata da un team di ricercatori del Franklin W. Olin College of Engineering di Needham [4] che, per limitare l'interazione potenzialmente dannosa con i tessuti organici, si sono concentrati su un metodo di trasferimento basato sul *weakly coupled regime* il quale permette di utilizzare frequenze di risonanza dell'ordine del kHz non compromettendo significativamente il rendimento del sistema stesso.

#### 1.3.1 Modello analitico

Anche in questo caso il sistema sperimentale è costituito da due bobine che differiscono per piccoli difetti di lavorazione, una collegata alla sorgente e l'altra ricevente il segnale. L'unica differenza sta nel fatto che le bobine vengono connesse in serie a un condensatore che agisce da risonatore, quindi non è più basata sulla capacità intrinseca della bobina.

Inoltre, si è supposto possibile l'utilizzo della teoria riferita a elementi concentrati sotto le ipotesi che la distanza tra le bobine sia di qualche volta maggiore del suo raggio e l'accoppiamento magnetico sia sufficientemente debole da poter supporre nulla l'induttanza  $L_M$  della bobina ricevente vista dalla sorgente.

$$L_M = \sqrt{L_1 L_2} \ll L_1, L_2 \quad (1.20)$$



**Figura 5:** Schema circuitale equivalente.

Tenendo presente le ipotesi fatte, il coefficiente di accoppiamento magnetico diventa:

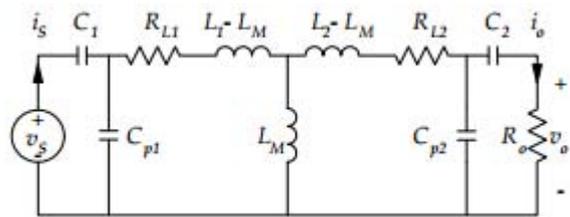
$$k^2 \ll \frac{1}{1 - \eta_{max, res}} \cdot \frac{1}{Q_1 Q_2} \quad (1.21)$$

dove  $Q_1$  e  $Q_2$  sono i fattori di qualità delle bobine, definiti come:

$$Q_1 = \frac{\sqrt{L_1/C_1}}{R_{L1}} \quad \text{e} \quad Q_2 = \frac{\sqrt{L_2/C_2}}{R_{L2}} \quad (1.22)$$

mentre il massimo rendimento ideale che il sistema raggiunge e la potenza massima trasmessa risultano in risonanza sono rispettivamente:

$$\eta_{max, res} = \frac{R_0}{R_0 + R_{L2}} \quad (1.23)$$



**Figura 6:** Schema circuitale equivalente con incluse le capacità parassite.

$$P = \frac{|V_S|^2}{2R_{L1}} \cdot \frac{k^2}{2} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{2} \quad (1.24)$$

L'efficienza utilizzando la risonanza è  $\frac{\eta_{p, res}}{\eta_p} = \frac{Q_1 Q_2}{2}$  volte più grande della reale efficienza

in un sistema senza risonanza.

La condizione per poter definire il regime di accoppiamento debole si ottiene dalla prima equazione:

$$k^2 \ll \frac{2}{Q_1 Q_2} \quad (1.25)$$

A differenza del *strong-coupled mode* che in un contesto di *coupled mode theory* potrebbe scriversi come  $k^2 \gg \frac{1}{Q_1 Q_2}$ .

### 1.3.2 Esempio sperimentale

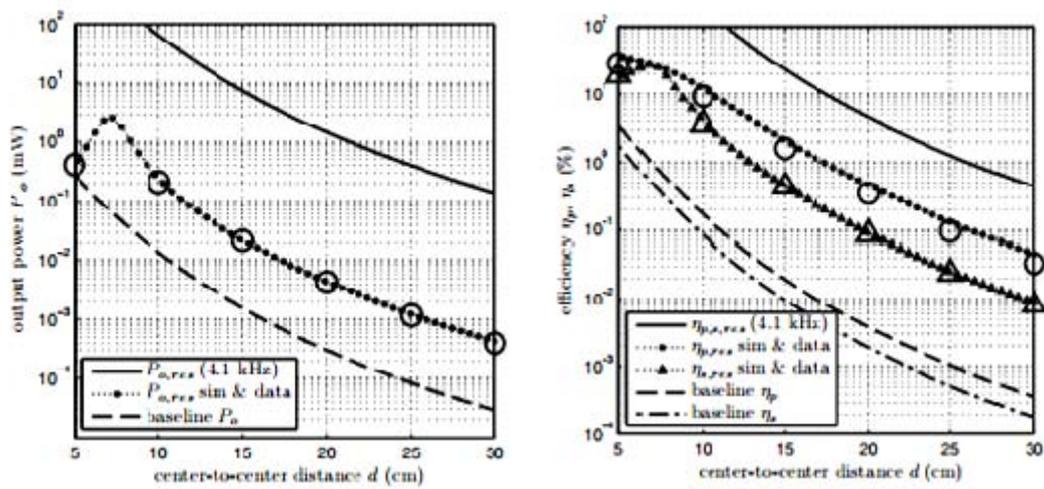
Le bobine sostanzialmente identiche sono allineate assialmente, formate da 2400 spire di rame 32 AWG con raggio  $r = 4,5 \div 5$  cm e  $l = 2,5$  cm. A causa di piccole differenze nella lavorazione, il valore dei parametri differisce un po':  $L_1 = 740$  mH e  $L_2 = 745$  mH, mentre la resistenza è uguale per entrambe a  $R_L = 395 \Omega$ .

Nella trattazione del caso reale bisogna considerare anche le capacità parassite di ogni bobina poiché paragonabili a quelle poste in serie alla stessa,  $C_1 = C_2 = 2$  nF, in questo caso risultano  $C_{L1} = 236$  pF e  $C_{L2} = 240$  pF. La frequenza di risonanza vale 4,1 kHz.

Il rendimento si trova dalla formula valida solamente per  $d \gg 4.8r$ :

$$\eta = \frac{Q_1 Q_2}{16(d/\sqrt{r_1 r_2})^6} \quad (1.26)$$

dove  $Q_1$  e  $Q_2$  sono i fattori di qualità delle bobine espressi precedentemente.



**Figura 7:** Potenza e Rendimento in funzione della distanza.

Il *weak coupled mode* è in grado di trasmettere potenza ad una certa distanza con una caduta di rendimento pari a  $1/d^6$  del tutto paragonabile al *strong coupled mode*.

# Capitolo 2

## Sistemi per autotrazione

### 2.1 Tecnologie in sviluppo

Nel corso degli ultimi decenni si è assistito ad un aumento vertiginoso di gas serra nell'atmosfera, principalmente anidride carbonica, causato maggiormente dal settore dei trasporti. Esso utilizza quasi esclusivamente derivati del petrolio, uno dei maggiori produttori di CO<sub>2</sub>, quindi è uno dei campi dove si può agire maggiormente per migliorare l'ambiente.

Già da qualche anno si è iniziato a fare questo, basti guardare come stanno evolvendo rapidamente i sistemi di propulsione delle vetture: dal semplice motore a combustione interna, attraverso tecnologie ibride, fino a veicoli completamente elettrici. Tuttavia quest'ultimi fanno fatica ad affermarsi sul mercato a causa dell'elevato costo causato dalle grandi quantità di sistemi di accumulo chimico che non riescono a garantire elevate autonomie al veicolo stesso.

Per soccombere a questo limite si sono pensati vari rimedi come l'utilizzo di supercondensatori, celle a idrogeno e il collegamento degli automezzi direttamente alla rete elettrica. I supercondensatori [5] hanno ancora una bassa autonomia anche se i più recenti sistemi permettono con una carica di 30 secondi di poter usufruire del mezzo per oltre 15 minuti, peculiarità che si adatta perfettamente all'utilizzo su mezzi pubblici, costretti a fermarsi frequentemente per il servizio che svolgono. Le celle a combustibile sono una valida alternativa, anche se a causa dell'alto consumo di energia per l'idrolisi hanno costi elevati difficilmente sostenibili mentre il collegamento diretto alla rete elettrica, tramite pantografi, risulta difficile perché bisognerebbe elettrificare tutte le strade, con investimenti molto onerosi deturpando l'ambiente circostante.



Figura 8: Bus con supercapacitori a Shanghai.

L'alternativa che più si addice a questo sistema è il collegamento wireless tra i veicoli e la rete che viene inglobata nella strada, non deturpando l'ambiente e migliorando la sicurezza. Di seguito verranno analizzate le principali direzioni di ricerca che vengono battute per ottenere la ricarica sia in movimento che a veicolo fermo.

## 2.2 Sistema a bobine convenzionali

E' un prototipo formato da due bobine di rame, quella sorgente immersa nella sede stradale di un parcheggio attrezzato, e quella ricevente nella parte inferiore dell'autovettura, una davanti all'altra e sullo stesso asse. In questo modo, oltre a evitare pericoli derivanti dal contatto tra persone e parti in tensione, si riesce a orientare correttamente la bobina ricevitrice rispetto alla sorgente, senza particolari difficoltà rispettando civilmente l'ordine del parcheggio.

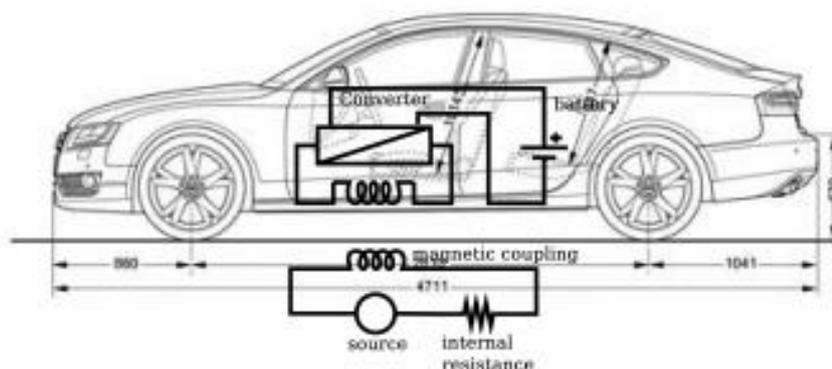


Figura 9: Circuito concettuale della ricarica wireless.

### 2.2.1 Circuito equivalente

Questo sistema, noto come “trasformatore a nucleo d’aria”, è ben descritto dal seguente sistema, potendo trascurare le capacità relative degli avvolgimenti:

$$\begin{cases} V_1 = (R_1 + jX_1)I_1 - j\omega MI_2 \\ 0 = (R_{22} + jX_{22})I_2 - j\omega MI_1 \end{cases} \quad (2.1)$$

Dove  $\omega$  è la pulsazione angolare,  $V_1$  la tensione al primario,  $I_1$  e  $I_2$  rispettivamente la corrente al primario e al secondario,  $R_1$  e  $X_1$  resistenza e induttanza dell’avvolgimento al primario,  $R_{22}$  e  $X_{22}$  resistenza e induttanza dell’avvolgimento al secondario e del carico mentre  $M$  è la mutua induttanza tra i due avvolgimenti.

Dalla prima equazione si ottiene la corrente al primario è  $I_1 = \frac{V_1}{(R_1 - R_{ref}) + j(X_1 + X_{ref})}$  con

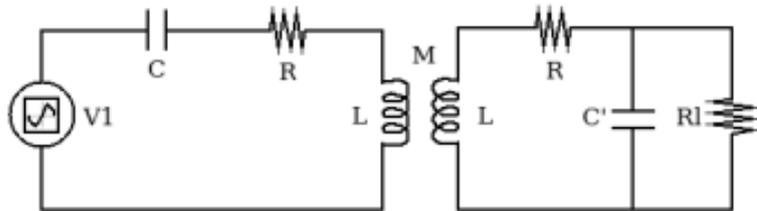
$$R_{ref} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} \cdot R_{22} \quad e \quad X_{ref} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} \cdot X_{22}. \quad (2.2)$$

La corrente in condizione di massima potenza trasmessa si ha quando  $R_{ref} = R_1$  e  $X_1 + X_{ref} = 0$ .

Ora si possono determinare anche i valori di  $\omega$  e  $L_1$ :

$$\omega = R_{22} \sqrt{\frac{R_1}{M^2 R_{22} - L_{22}^2 R_1}} \quad e \quad L_1 = \frac{L_{22}}{R_{22}} R_1 \quad (2.3)$$

che forniscono la condizione di risonanza e massimo trasferimento di potenza.



**Figura 10:** Circuito equivalente del dispositivo wireless.

Il fattore di qualità risulta essere

$$Q = L_{22} \sqrt{\frac{R_1}{M^2 R_{22} - L_{22}^2 R_1}}. \quad (2.4)$$

Per raggiungere queste condizioni è possibile variare le induttanze del sistema al primario e al secondario introducendo dei condensatori in serie, così da risultare

$$X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \quad (2.5)$$

$$X_2 = \omega L_{22} - \frac{1}{\omega C_{22}} = \sqrt{\frac{\omega^2 M^2 R_{22} - R_1 R_{22}^2}{R_1}} \quad (2.6)$$

Da cui si può ottenere la reale condizione per massimizzare il rendimento:

$$\omega M \geq \sqrt{R_1 R_{22}}. \quad (2.7)$$

### 2.2.2 Prova sperimentale

Il sistema è composto da due bobine di rame verniciato affacciate l'una sull'altra coassialmente [6], a queste sono collegati in serie due capacitori. La bobina sorgente è alimentata da un amplificatore con banda da 20 Hz a 20 kHz e un picco di tensione di 20 V pilotato da un generatore di segnali mentre il carico è connesso in parallelo al condensatore al secondario.

Con questo tipo di circuito, raffigurato in figura 2.3, e supponendo le due bobine identiche, il rendimento mostra un massimo teorico alla frequenza:

$$f_{peak} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R + R_l}{R_l C}} \left( \frac{1}{L^2 + M^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.8)$$

dove  $R_l$  e  $R$  sono rispettivamente la resistenza del carico e della bobina mentre  $L, M, C$  rappresentano i valori di induttanza, mutua induttanza e capacità.

Le operazioni che svolge il prototipo è di generare il segnale di potenza, mandarlo all'amplificatore che alimenta la bobina sorgente e di conseguenza, quella ricevente e il carico.

Le due bobine sono uguali e sono costituite da un filo di rame di diametro 0,71 mm, di lunghezza complessiva di 284 m, raggio medio 15,5 cm avvolto in 264 spire per una resistenza totale, misurata in corrente continua, di circa 13  $\Omega$  e induttanza di 53 mH e peso totale del rame utilizzato di circa 2 Kg. I due condensatori in serie hanno una capacità di 120 nF e una massima tensione applicabile di 1000V.

Inoltre i fattori di qualità per i due circuiti risonanti: per la sorgente essendo un circuito RLC serie diventa

$$Q_s = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{13} \sqrt{\frac{53 \cdot 10^{-3}}{120 \cdot 10^{-9}}} = 51,12 \quad (2.9)$$

mentre il ricevitore, considerando la resistenza del carico  $R_l = 80 \text{ k}\Omega$ , risulta

$$Q_d = \frac{\omega L}{R + \frac{R_l}{(\omega R_l C)^2 + 1}} = 36,14. \quad (2.10)$$

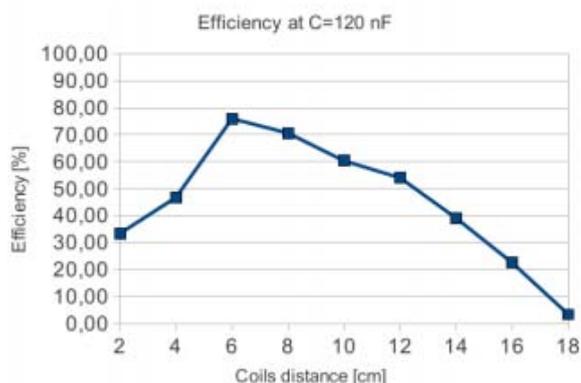
### 2.2.3 Rendimento

L'efficienza della trasmissione di potenza è fortemente dipendente dalla distanza e dal posizionamento reciproco delle bobine, sorgente e ricevente, e per ottenere informazioni riguardo l'aspetto quantitativo del sistema sono stati effettuati alcuni test dove viene usato come carico una lampadina LED.

#### Primo test

La prima prova è stata condotta introducendo due condensatori da 120 nF e variando la distanza tra le due bobine a step di 2 cm. La frequenza di risonanza calcolata risulta

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 2246 \text{ Hz, verificata tramite gli apparecchi sperimentali.}$$

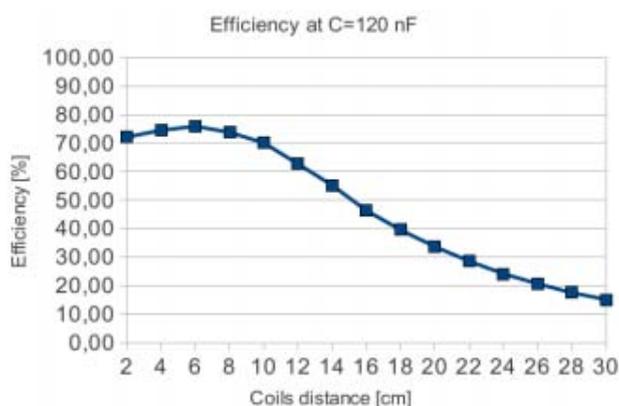


**Figura 11:** Risultati ottenuti con  $C=120$  nF e  $f_0=2246$  Hz costante.

Dai risultati ottenuti si nota che il rendimento è accettabile fino ad una distanza di pochi cm tra le bobine.

### Secondo test

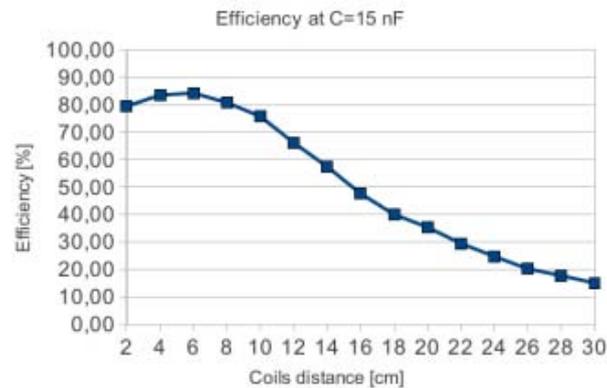
Successivamente è stata eseguita una prova analoga alla precedente, con la differenza che si è regolato il generatore in modo più fine per aumentare il rendimento finale. Questa manovra è stata eseguita manualmente con un analizzatore di spettro e dimostra che con un risintonizzatore del sistema, variando la frequenza di risonanza e utilizzando un condensatore da 120 nF, si possono raggiungere efficienze mediamente superiori su range di distanze maggiori.



**Figura 12:** Risultati ottenuti con  $C=120$  nF e variando la frequenza.

### Terzo test

In questa ulteriore misura sono stati introdotti due condensatori in serie al circuito, come nel primo test, ma con un valore di 15 nF, facendo aumentare la frequenza di risonanza  $f_0 = 5500$  Hz.

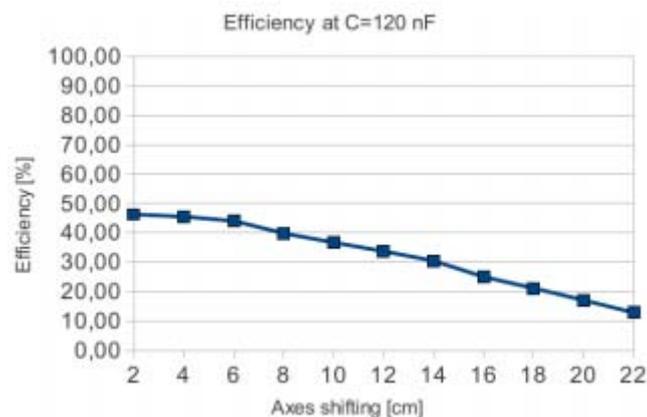


**Figura 13:** Risultati ottenuti con C=15 nF e variando la frequenza.

Con frequenze maggiori si nota che il rendimento aumenta in modo abbastanza consistente.

### Quarto test

Come ultima prova è stata valutata l'efficienza della trasmissione d'energia, variando lo spostamento trasversale tra le bobine a step di 2 cm, da 0 a 22 cm, mantenendo gli assi sempre paralleli ed ad una distanza fissa di 16 cm.



**Figura 14:** Rendimento del trasferimento in funzione dello scorrimento degli assi.

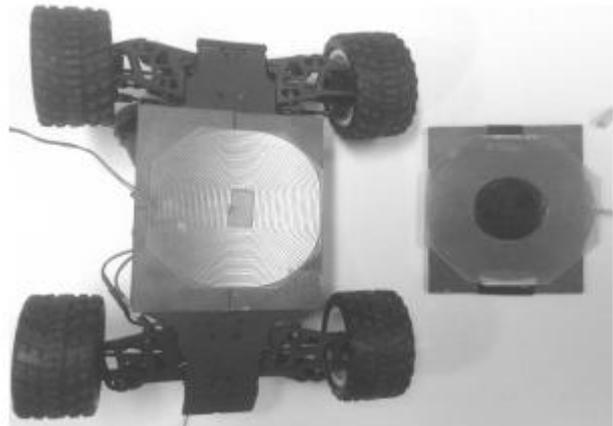
Questo test è stato condotto per valutare il comportamento del sistema in caso di allineamento non ottimale, come in un parcheggio eseguito male. Dal grafico si evince come per un discostamento fino a 6 cm, quindi per piccoli discostamenti, l'efficienza rimane praticamente costante e, più in generale, è possibile affermare che il sistema non è particolarmente sensibile ai disallineamenti.

## 2.3 Sistema a bobine planari

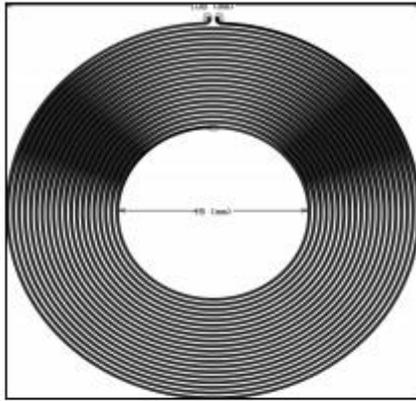
L'alternativa al sistema precedente si basa su una diversa geometria della bobina che è sviluppata su un piano anziché in profondità, il sistema in questa configurazione viene chiamato *High Frequency Wireless Planar Transformers (HFWPT)*. Questo permette, come si vedrà, una minor dispersione del campo elettromagnetico tra la sorgente e il ricevente e può essere fornito di nucleo ferromagnetico per minimizzare le perdite e aumentare l'impedenza magnetizzante.

### 2.3.1 Prova sperimentale

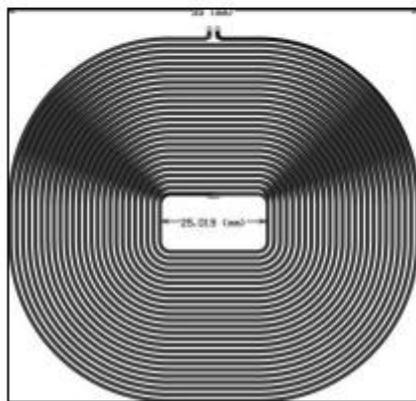
In Figura 15 è rappresentato il prototipo utilizzato per studiare l'efficienza della trasmissione di potenza [7] dall'avvolgimento primario al secondario, posto sotto il veicolo. Il rendimento è abbassato notevolmente dalla distanza tra le due piastre perché, a causa della bassa permeabilità dell'aria, la direzione del flusso magnetico si espande oltre alla piastra ricevente.



**Figura 15:** Prototipo del sistema di carica wireless.



(a)



(b)

**Figura 16:** Bobina primaria e secondaria.

La prima bobina bifilare che viene utilizzata, è rappresentata in Figura 16 (a) e presenta un diametro esterno di 108 mm e interno di 49 mm, modellata in accordo con l'equazione semplificata di Wheeler, dove l'induttanza è proporzionale al numero di avvolgimenti e al diametro:

$$L_{m\omega} = K_1 \times \mu_0 \left( n^2 \times \frac{d_{avg}}{1 + K_2 \rho} \right) \quad (2.11)$$

dove  $K_1$  e  $K_2$  sono le costanti di forma,  $\mu_0$  la permeabilità dell'aria,  $n$  il numero di avvolgimenti,  $d_{avg}$  il diametro medio e infine  $\rho$  il coefficiente di riempimento, di cui gli ultimi due dati rispettivamente dalle formule:

$$d_{avg} = 0.5(d_{out} + d_{in}) \quad (2.12)$$

$$\rho = \frac{(d_{out} - d_{in})}{(d_{out} + d_{in})} \quad (2.13)$$

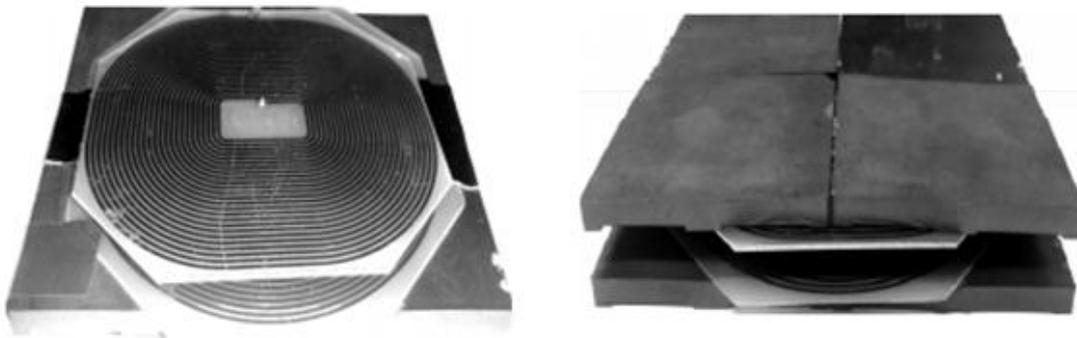
In Figura 16 (b) viene rappresentata la bobina secondaria, che presenta un design rettangolare al fine di massimizzare l'area superficiale e ridurre le correnti parassite alle estremità. Le misure tra le spire sono state mantenute uguali a quelle della bobina primaria mentre l'area interna è stata progettata per essere la più piccola possibile,  $25 \times 13 \text{ mm}^2$ , poiché la maggior interazione con le linee di flusso garantisce un miglior trasferimento tra le bobine. In totale questa piastra conta 50 spire, 25 per lato in una configurazione bifilare, che permettono di aumentare la tensione al secondario di 1,25 volte compensando dunque le perdite nell'aria.

### 2.3.2 Misurazione del campo magnetico

Si è misurato il campo magnetico in due casi: nel primo caso si è posto un nucleo in ferrite su entrambe le piastre mentre nel secondo si è posta la ferrite solo sulla piastra al primario, simulando un eventuale veicolo che, per renderlo più leggero, è sprovvisto di questo accorgimento. La ferrite presenta una permeabilità eccelsa nelle condizioni ottimali di frequenza compresa tra 0,1 e 2 MHz, inoltre può essere utilizzata come schermo magnetico o per incrementare l'impedenza.

Il test è stato eseguito alla frequenza di risonanza di 100 kHz da cui si vede che con i nuclei ferromagnetici da entrambi i lati, questi assorbono quasi completamente il flusso prodotto dalla sorgente, infatti il flusso disperso è minimo e concentrato sui lati con un valore compreso tra  $1,5 \div 2$  mWb, dove per altro la piastra non è coperta totalmente dal nucleo.

Nel secondo caso, si ha invece un aumento del flusso disperso che si presentano anche nella zona centrale,  $10 \div 15$  mWb, oltre che vicino ai bordi per un valore compreso tra  $5 \div 10$  mWb.



**Figura 17:** Misurazione del campo magnetico nei due casi.

Si riscontra un effetto benefico utilizzando la ferrite che riesce a diminuire il flusso magnetico disperso di circa un fattore 5, passando da  $5 \div 10$  mWb a  $1,5 \div 2$  mWb. In più aumenta il coefficiente di accoppiamento tra le due piastre che ottimizza di conseguenza l'efficienza della trasmissione.

## 2.4 Ricarica in movimento

La difficoltà della diffusione delle auto elettriche è legata al loro costo e alla loro bassa autonomia di percorrenza, la cui causa principale è il sistema di accumulo di energia. Per ovviare a questo basta collegare direttamente il veicolo ibrido o elettrico alla rete elettrica, anche durante il suo utilizzo, riducendo così le dimensioni, ingombro, peso e costo dei sistemi di accumulo e aumentandone l'autonomia.

### 2.4.1 Descrizione del dispositivo

Il sistema primario [8], quello inglobato nella strada, è costituito da un raddrizzatore *front-end* con correttore del fattore di potenza alimentato dalla rete elettrica, un invertitore a ponte e due bobine induttrici collegate con due condensatori in serie, rispettivamente  $C_{T1}$  e  $C_{T2}$ .

Sul fondo del veicolo è posta una bobina ricevente collegata in parallelo a un capacitore  $C_R$ , un raddrizzatore a ponte con un filtro  $C_0$  e la batteria con un sistema di protezione contro tensioni superiori a  $U_b$ .

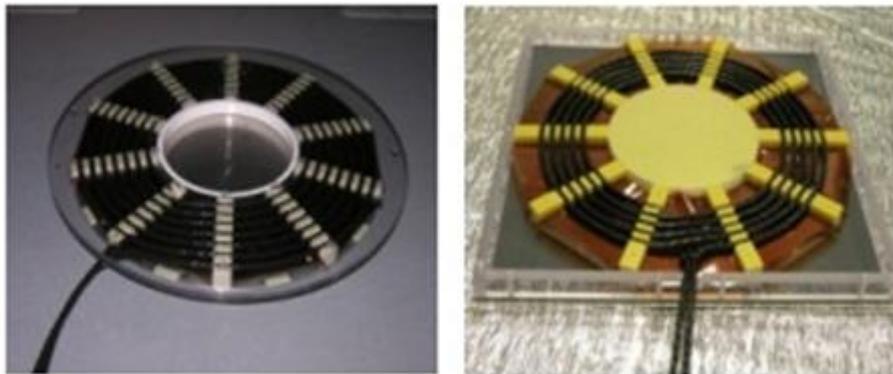


Figura 18: Bobina induttrice e ricevente.

Le bobine, sia quella sorgente formata da 7 spire e quella ricevente formata da 5, sono composte da un filo di Litz, in modo da ridurre l'effetto pelle e di prossimità, posto sopra ad una struttura in materiale ferromagnetico dolce e una copertura non magnetica di piccolo spessore. L'inverter controlla la potenza trasmessa, regolando la frequenza, il duty cycle e la tensione in ingresso a se stesso, a seconda del posizionamento relativo tra le bobine in modo da ottenere sempre la condizione con il massimo rendimento.

### 2.4.2 Comportamento a diverse frequenze

Di particolare interesse è il comportamento del sistema a frequenze prossime a quella di risonanza, per questo vengono effettuate prove misurando le potenze attive e reattive al primario e secondario, i fattori di potenza e il rendimento. Durante l'esperimento le bobine sono perfettamente allineate ad una distanza di 10 cm e sottoposte ad una tensione costante di 27,5 V applicata all'ingresso dell'inverter, inoltre il carico è costituito da una batteria da 14 kWh operante ad una differenza di potenziale costante di 72 V. La bobina sorgente ha le seguenti caratteristiche:

$$L_1 = 24 \mu\text{H}; C_1 = 2,0 \mu\text{F}; f_{01} = 23 \text{ kHz}; R_{1dc} = 9,08 \text{ m}\Omega$$

mentre quella ricevente:

$$L_2 = 18,4 \mu\text{H}; C_2 = 2,9 \mu\text{F}; f_{02} = 21,8 \text{ kHz}; R_{2dc} = 11,5 \text{ m}\Omega$$

e infine il rapporto spire è  $n = 0,876$ . L'inverter è regolato con un duty cycle di 0,8 alla tensione della batteria: in queste condizioni, come si vede dalla Figura 19, il picco di potenza è 2 kW a  $f_0 = 23 \text{ kHz}$  e il rendimento del sistema è particolarmente elevato.

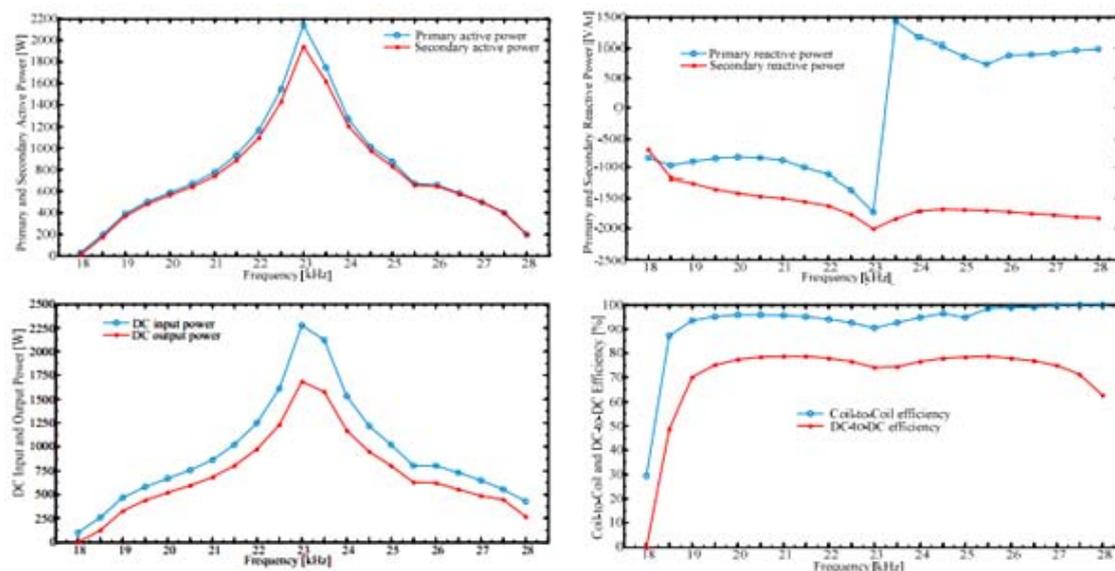
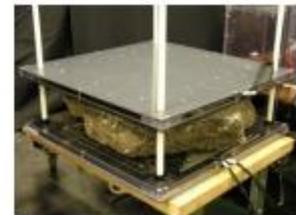
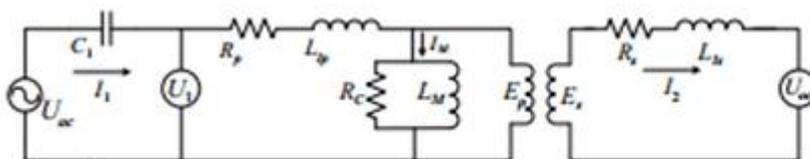


Figura 19: Grandezze in funzione della frequenza.

Si nota anche il salto della potenza reattiva al primario a cavallo del picco di potenza attiva. Questo è dovuto al comportamento variabile del circuito che diventa molto capacitivo o induttivo a seconda che la frequenza diminuisca o aumenti rispetto a quella di risonanza. La potenza reattiva dipende in modo inversamente proporzionale al duty cycle a causa del freewheeling dei diodi che mantengono in conduzione l'inverter, con il risultato che questi sistemi devono utilizzare inverter di potenza con un tasso di potenza reattiva maggiore di quella attiva se è implementato questo tipo di controllo.

### 2.4.3 Perdite dovute al manto stradale

Per avere riscontri più realistici, in questo esperimento si sono quantificate le perdite dovute ad uno strato di calcestruzzo o asfalto, sottoposto alle intemperie e al traffico per 10 anni, posto tra il veicolo e la bobina sorgente. Nell'asfalto si trova la presenza di materiali conduttori come ferriti e alluminio e per tenere conto di questi, visto che schermano parzialmente la zona di interazione tra le bobine, si mette una resistenza  $R_c$  nel ramo di magnetizzazione del circuito rappresentato in figura:



**Figura 20:** Circuito equivalente con l'inserimento dell'elemento dispersore  $R_c$  e rappresentazione della prova eseguita in laboratorio con un campione di asfalto immesso tra le due bobine.

Dalle varie prove effettuate si riscontra che l'influenza sul sistema è solo marginale, infatti viene modificato l'angolo di fase in input di un massimo del 10%.

In questo caso le perdite nel nucleo senza calcestruzzo sono pari a 6,26 W mentre, sono pari a 13,99 W con la presenza di calcestruzzo con uno spessore pari a 11 cm. Da qui si vede che la posa sotto il manto stradale intacca minimamente il rendimento totale del sistema, risultando una soluzione più che accettabile.

## CAPITOLO 2. SISTEMI PER AUTOTRAZIONE

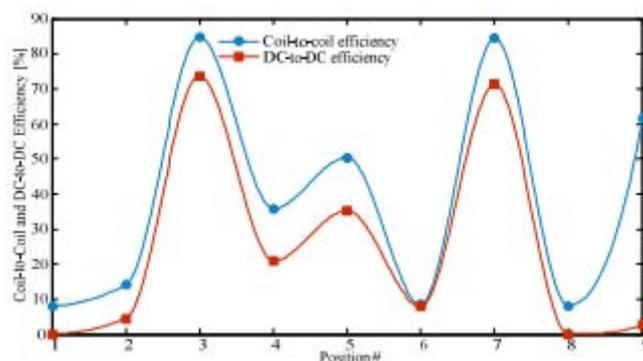
Per dimostrare la bontà del sistema, sono state effettuate delle prove in laboratorio, facendo passare, un veicolo elettrico munito del circuito ricevente, sopra due diverse bobine posizionate consecutivamente. Per vedere meglio il funzionamento nelle varie posizioni tra bobine primarie e secondaria, sono state effettuate nove prove in cui il veicolo si trova:

- giusto prima della prima bobina;
- sovrapposto per metà con la prima bobina;
- perfettamente allineato con la prima bobina;
- sopra a metà della prima bobina ma è già un po' sopra anche alla seconda;
- nella mezzera tra le due bobine;
- sopra a metà della seconda bobina ma ancora in collegamento con la prima;
- perfettamente allineato con la seconda bobina;
- sovrapposto per metà con la seconda bobina;
- appena dopo la seconda bobina.



**Figura 21:** Caso iniziale e intermedio della sovrapposizione tra bobina induttrice e ricevente.

In seguito si è riportato il grafico in cui è rappresentato il rendimento del sistema nelle varie posizioni del veicolo.



**Figura 22:** Rendimento in funzione della posizione del veicolo.

Si può vedere come i punti in cui il rendimento è massimo sono riscontrati nelle posizioni di perfetto allineamento tra le bobine con lo svantaggio che appena il veicolo esce dalla zona predisposta, l'efficienza si azzerava velocemente. Inoltre visto le pericolose oscillazioni della tensione d'uscita, la batteria necessita di una protezione *clamping voltage* per evitare di essere danneggiata.

#### 2.4.4 Esempio reale

OLEV [9] è un innovativo sistema di ricarica wireless dei veicoli elettrici ideato dal *Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)*, già operativo nel *Seoul National Grand Park*. Il funzionamento è del tutto simile a quello spiegato nei paragrafi precedenti infatti si pongono le bobine induttrici inglobate nel manto stradale mentre quella ricevitrice sul fondo del veicolo in modo da permettere la ricarica in movimento, senza la necessità di soste e senza l'ausilio di cavi elettrici.

Il sistema OLEV è composto da un numero definito di veicoli uguali circolanti su una strada circolare fissa, ove ci sono varie stazioni dove i passeggeri possono salire e scendere dal veicolo, e la stazione primaria è la partenza e la fine del circuito circolare.

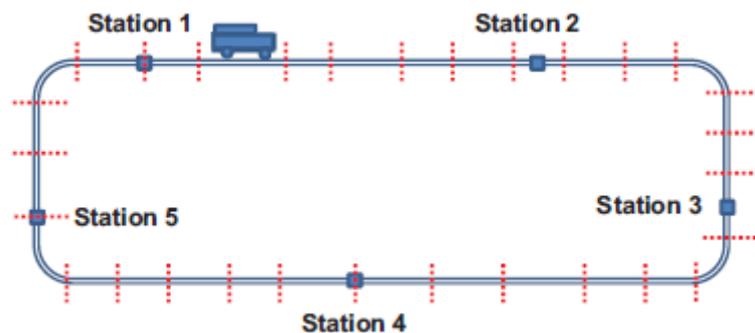
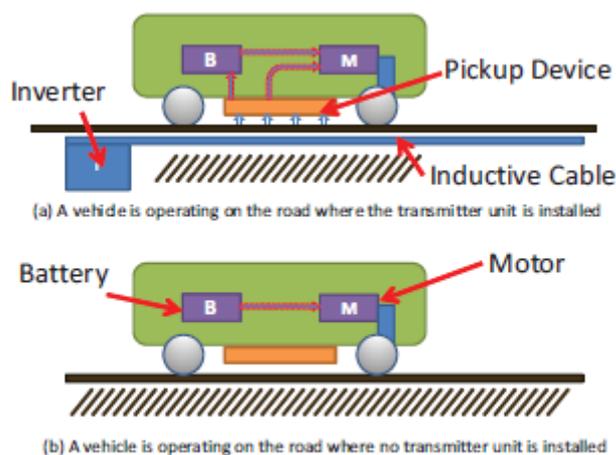


Figura 23: Esempio di una strada con sistema OLEV.

I veicoli sono tutti uguali e le capacità delle batterie equipaggiate sono le stesse, anche se il valore verrà poi valutato nello studio del modello. La strada è divisa in N segmenti di lunghezza variabile e in alcuni di essi è inglobata nel manto stradale la bobina necessaria alla ricarica, mentre negli altri dove la bobina non è presente, il veicolo trarrà l'energia necessaria al suo funzionamento dalla batteria. Nei tratti adibiti alla ricarica elettrica la

trasmissione di energia avviene grazie all'utilizzo di un inverter collegato a un cavo induttore, la cui lunghezza dipende dalla potenza richiesta dal veicolo. Nel caso in cui due tratti consecutivi siano adibiti alla ricarica, si può utilizzare un unico inverter collegando in serie i due cavi induttori in serie.



**Figura 24:** Carica e utilizzo dell'energia della batteria.

Nello studio del modello sono state utilizzate le seguenti variabili:

- $k$  è il numero di veicoli circolanti.
- $J$  sono il numero delle stazioni mentre  $R(j)$  rappresenta la stazione.
- $c_{battery}$  è il costo della batteria per unità di carica e  $I_{max}$  è la corrente massima di carica, quindi il costo della batteria per veicolo è  $c_{battery} \times I_{max}$ .
- lo stato della carica alla fine del segmento  $i$  è rappresentato da  $I(t)$ .
- la strada è divisa in  $N$  segmenti, il punto iniziale è  $x^0(i)$ , il punto finale è  $x^f(i)$  e la distanza degli  $i^{th}$  segmenti è considerata dalla prima stazione.
- il posizionamento del cavo induttore è indicato dalla variabile  $l(i)$ . Se il cavo induttore c'è allora  $l(i) = 1$  altrimenti  $l(i) = 0$ .
- $d(i)$  rappresenta il consumo di energia del segmento  $i$ -esimo quando è passato il veicolo.
- se un veicolo è passato sul segmento  $i$  e il cavo induttore è installato nel segmento, allora il livello di energia della batteria sarà aumentato di  $s(i)$ . Il valore è determinato dal tempo che il veicolo stà sul segmento quindi dipende dalla velocità e dalla lunghezza del segmento.
- $c_{cable}$  e  $c_{inverter}$  sono rispettivamente il costo del cavo induttore e dell'inverter.

## CAPITOLO 2. SISTEMI PER AUTOTRAZIONE

L'ottimizzazione del modello cerca la capacità della batteria e la locazione dell'alimentazione al minimo costo soddisfacendo tutti i requisiti. La variazione totale del costo è descritta dall'equazione:

$$k \cdot (c_{battery} \cdot I_{max}) + c_{inverter} \cdot \sum_{i=1}^N [l(i) - l(i-1)] \cdot l(i) + c_{cable} \cdot \sum_{i=1}^N [x(i)^f - x(i)^0] \cdot l(i) \quad (2.14)$$

dove il primo termine rappresenta il costo della batteria, con  $k$  veicoli equipaggiati con la stessa batteria. Il secondo e terzo rappresentano il costo dell'alimentazione composta dall'inverter e dal cavo induttore. L'obiettivo dell'ottimizzazione è minimizzare il costo espresso nell'equazione precedente. Bisogna notare che il primo termine rappresenta il costo totale di tutte le batterie nel sistema mentre il secondo e il terzo il costo dell'alimentazione. Se il numero dei veicoli aumenta, il costo delle batterie influirà maggiormente nel costo totale mentre il numero di inverter e la lunghezza dei cavi induttori sarà determinato dalla potenza richiesta dai veicoli.

L'energia nella batteria in ogni segmento è espressa dalla formula:

$$I(i) = I(i-1) + s(i) \cdot l(i) - d(i), \quad i = 1, \dots, N \quad (2.15)$$

dove l'energia nella batteria non deve superare il valore massimo  $I_{max}$  e il valore minimo  $I_{min}$ . Dall'equazione si vede che quando un veicolo passa il segmento  $i^{th}$ , il consumo di potenza elettrica corrisponde a  $d(i)$ . Se nel segmento è alloggiato un cavo induttore, la batteria del veicolo riceve l'energia pari a  $s(i)$  simultaneamente. In caso contrario nessuna energia verrà trasmessa alla batteria.

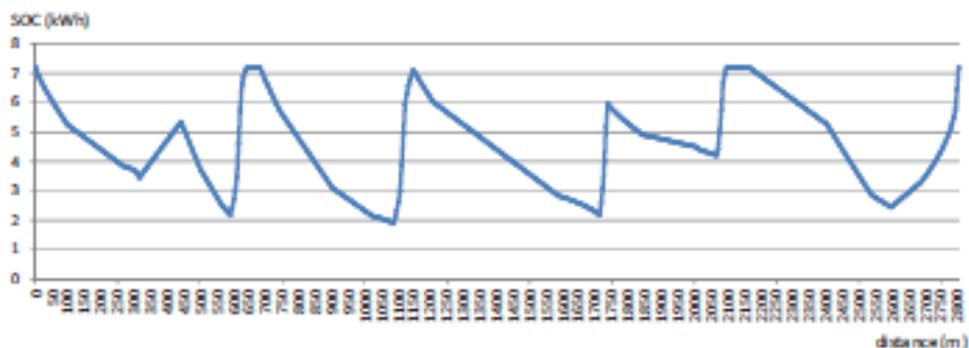
Avendo una strada circolare con 5 stazioni e i veicoli che circolando tutti nella stessa direzione partono e finiscono il loro tragitto nella prima stazione. La prima stazione, dove la batteria dei veicoli dovrà essere completamente carica, è il punto di riferimento e le altre stazioni sono situate a 620 m, 1,115 m, 1,730 m e 2,080 m dalla stazione primaria nella direzione di movimento dei veicoli. La lunghezza totale della strada è 2,800 m e settiamo la lunghezza di ogni segmento pari a 5 m avendone così 560.

## CAPITOLO 2. SISTEMI PER AUTOTRAZIONE

Avendo considerato 5 veicoli con capacità della batteria pari a 9 kWh si trova che sono necessarie sei alimentazioni. Più in dettaglio le alimentazioni sono:

<b>ALIMENTAZIONE</b>	<b>LUNGHEZZA TRATTO</b>
<b>prima</b>	320 m – 440 m
<b>seconda</b>	595 m – 680 m
<b>terza</b>	1,090 m – 1,145 m
<b>quarta</b>	1,725 m – 1,735 m
<b>quinta</b>	2,070 m – 2,165 m
<b>sesta</b>	2,600 m – 2,800 m

La lunghezza totale dei segmenti che comprendono l'alimentazione corrisponde a 575 m, approssimativamente il 20 % della lunghezza totale della strada. Lo stato della carica della batteria (SOC) valutato con l'ottimizzazione è illustrato nella figura seguente.



**Figura 25:** Stato della carica in funzione dei chilometri percorsi.

Si nota che la carica iniziale della batteria e quella finale sono uguali e è pari 7,2 kWh, cioè al massimo della carica.

# Capitolo 3

## Dimensionamento con metodi analitici

Lo scopo è quello di realizzare un programma in MatLab che permetta, al variare della potenza richiesta dalla batteria del veicolo e della frequenza di risonanza, di determinare i parametri fondamentali delle bobine (sorgente e ricevente), la tensione e la corrente della bobina sorgente.

Innanzitutto, prima di descrivere il programma e i risultati ottenuti, diamo qualche nozione teorica sulle batterie utilizzate attualmente nelle auto elettriche, le varie tipologie di ricarica e i conduttori utilizzati per realizzare le bobine.

### 3.1 Batterie al litio

Attualmente le batterie agli ioni di litio sono quelle più utilizzate nella trazione elettrica grazie ad un ottimo rapporto peso/potenza, nessun effetto memoria e ad una lenta perdita della carica quando non è in uso. Queste batterie usano il metallo più leggero che esista come mezzo di stoccaggio dell'energia che gode del vantaggio di poter immagazzinare enormi quantità di energia.

I tre partecipanti alle reazioni elettrochimiche in una batteria agli ioni di litio e come in tutte le batterie sono l'anodo, il catodo e l'elettrolita. Il principio base di funzionamento si basa sul trasferimento di ioni di litio ( $\text{Li}^+$ ) da un elettrodo ad un altro, infatti durante la ricarica, il litio si trasferisce, sotto forma ionica dall'elettrodo positivo al negativo, passando dunque dal catodo (+) all'anodo (-). Durante l'utilizzazione il processo avviene in modo opposto, cioè gli ioni passano dall'anodo al catodo. Poiché il metallo di litio, che potrebbe essere prodotto in condizioni irregolari di carica è molto reattivo e può causare esplosioni, le batterie agli ioni di litio solitamente hanno incorporati circuiti elettronici protettivi e/o fusibili per evitare l'inversione di polarità, sovraccarichi di tensione e surriscaldamento.

La potenza massima che può essere prelevata in continuo dalla batteria dipende dalla sua capacità espressa in Ah.

Il vantaggio di questa batteria, oltre a quello sopra descritto dell'ottimo rapporto peso/potenza, sta nel fatto che possono essere costruite in varie forme e dimensioni, in modo da riempire efficacemente gli spazi disponibili nei dispositivi che le utilizzano. Il principale svantaggio è che presenta un degrado progressivo anche se non viene utilizzata, fino a un 40% in un anno.



**Figura 26:** Disposizione batteria nella Nissan Leaf.

Nel nostro caso abbiamo considerato la batteria della *Nissan Leaf*, visto che attualmente è una delle auto elettriche più vendute nel mondo. Le caratteristiche [10] della sua batteria sono:

- Tipo: ioni di litio laminata
- Numero di celle: 192
- Configurazione celle: 96 celle in serie per due vie in parallelo
- Tensione nominale cella: 3,8 V
- Tensione nominale batteria: 364,8 V
- Capacità: 66,2 Ah

- Energia: 24 kWh
- Massima tensione di carica della cella: 4,2 V
- Minima tensione di scarica della cella: 2,5 V

Noi considereremo, per la ricarica wireless, la ricarica in  $2C$  (125 Ah) e  $5C$  (330 Ah) in modo da valutare la soluzione ottimale rendimento/tempo.

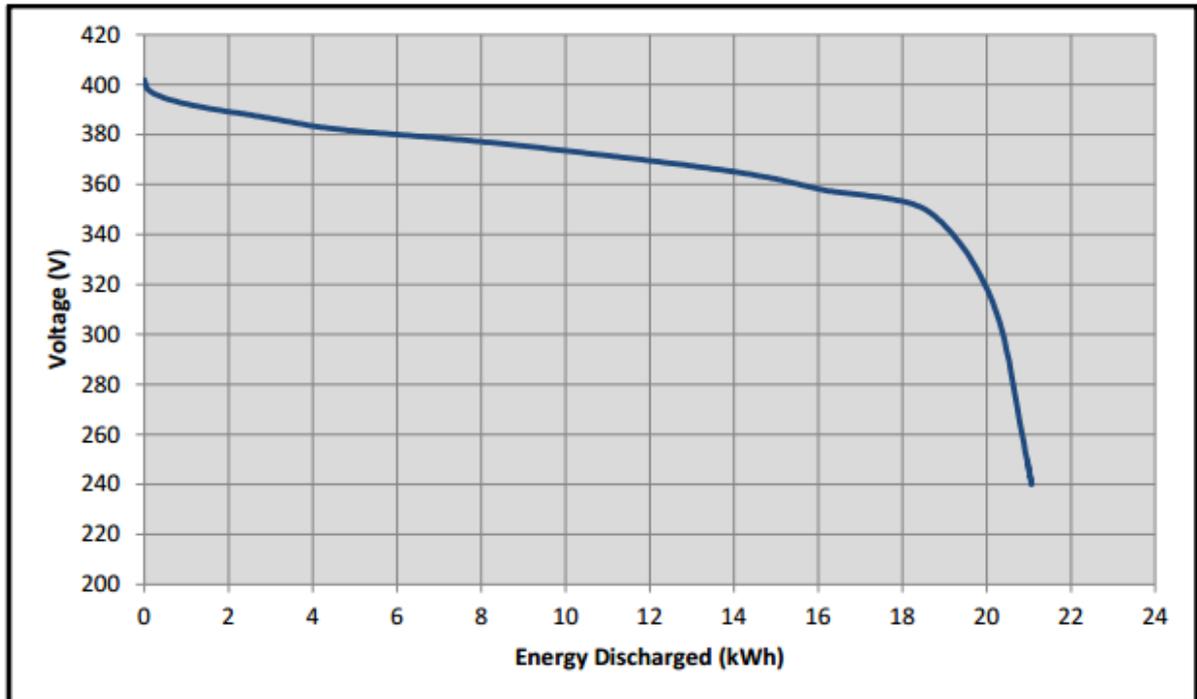


Figura 27: Tensione della batteria in funzione dell'energia.

### 3.2 Colonnine di Ricarica

Lo scopo della ricarica veloce è quello di ricaricare il proprio mezzo nel più breve tempo possibile. L'alimentazione che arriva dalla rete elettrica è in corrente alternata e dovrà essere raddrizzata in continua grazie all'utilizzo di un raddrizzatore, che può essere posto nel veicolo o nella colonnina.

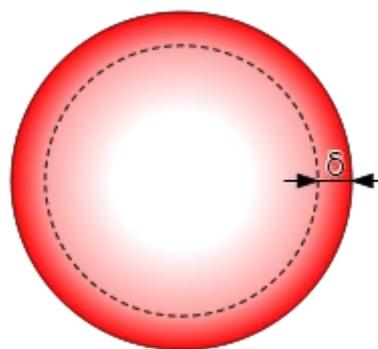
Attualmente la capacità media delle batterie di un veicolo elettrico è di circa 20 kWh, per un'autonomia di circa 150 Km. Vista la bassa autonomia, l'utente dovrà ricaricare il mezzo non appena ne ha la possibilità. A seconda del tipo di ricarica cambia il tempo necessario, come si vede nella tabella seguente:

TEMPO DI RICARICA	ALIMENTAZIONE	VOLTAGGIO	CORRENTE MAX
<b>6-8 ore</b>	Monofase - 3.3 kW	230 VAC	16 A
<b>2-3 ore</b>	Trifase - 10 kW	400 VAC	16 A
<b>3-4 ore</b>	Monofase - 7 kW	230 VAC	32 A
<b>20-30 minuti</b>	Trifase - 43 kW	400 VAC	63 A
<b>20-30 minuti</b>	Continua - 50 kW	400-500 VDC	100-125 A
<b>1-2 ore</b>	Trifase - 24 kW	400 VAC	32 A

Noi non ci focalizzeremo sulla ricarica domestica che prevede lunghi tempi di ricarica, nell'ordine delle 8 ore, ma sulla ricarica rapida cioè con potenze maggiori di 20 kW.

### 3.3 Filo Litz

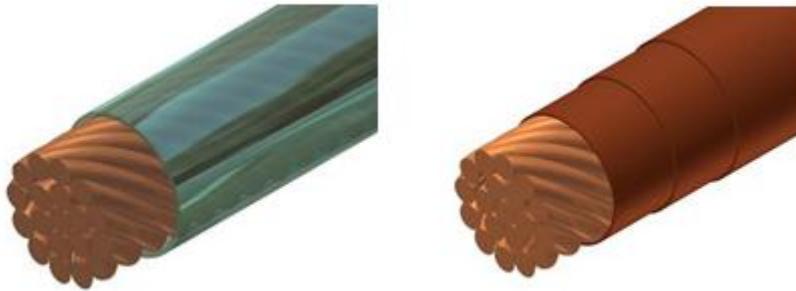
L'effetto pelle è la tendenza di una corrente elettrica alternata a distribuirsi all'interno di un conduttore in modo non uniforme: la sua densità è maggiore sulla superficie ed inferiore all'interno. Questo comporta un aumento della resistenza elettrica soprattutto alle alte frequenze ed è come se una parte del conduttore non venisse utilizzata, comportando una maggiore dissipazione di potenza a parità di corrente applicata.



**Figura 28:** Effetto pelle in un conduttore.

Per ridurre questo effetto è utilizzato il filo Litz, il quale è costituito da numerosi fili isolati tra loro mediante smaltatura, in modo che la corrente abbia lo stesso effetto su tutti i singoli fili della matassa.

In base alla frequenza utilizzata, corrisponde un filo Litz di diametro diverso; cioè man mano che la frequenza aumenta, il diametro del filo diminuisce. Ci sono delle tabelle in cui vengono riportati i diametri da utilizzare, l'area del conduttore, la resistenza del rame e la corrente massima espressa in Ampere.



**Figura 29:** Fili Litz con diversi tipi di guaina.

In base alle norme vigenti, abbiamo scelto la dimensione del filo Litz che dipende dalla frequenza e dalla tensione.

Frequenza Max (kHz)	AWG	Diametro (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Resistenza (Ω / km)	Corrente massima (A)
21	19	0,91186	0,653	26,40728	1,8
85	25	0,45466	0,162	106,1736	0,457
170	28	0,32004	0,081	212,872	0,226

### 3.4 Trattazione analitica del modello

Lo scopo dello studio è quello di trovare i parametri delle bobine (sorgente e ricevente) per una data potenza richiesta all'arrivo. Per fare questo, come prima cosa, si è determinata l'induzione magnetica  $B$  prodotta da una spira rettangolare sull'asse  $z$  utilizzando il potenziale vettore.

Considerando una spira rettangolare, sensibilmente filiforme, con corrente  $I_1$ , immersa in un mezzo con permeabilità  $\mu_0$  uniforme, con il lato minore che misura  $2b$  e lato maggiore  $2a$ , determiniamo i coefficienti che poi serviranno per implementare il calcolo dell'induzione magnetica [11] :

$$C_1 = -C_4 = a_1 + x \quad (3.1)$$

$$C_2 = -C_3 = a_1 - x \quad (3.2)$$

$$d_1 = d_2 = y + b \quad (3.3)$$

$$d_3 = d_4 = y - b \quad (3.4)$$

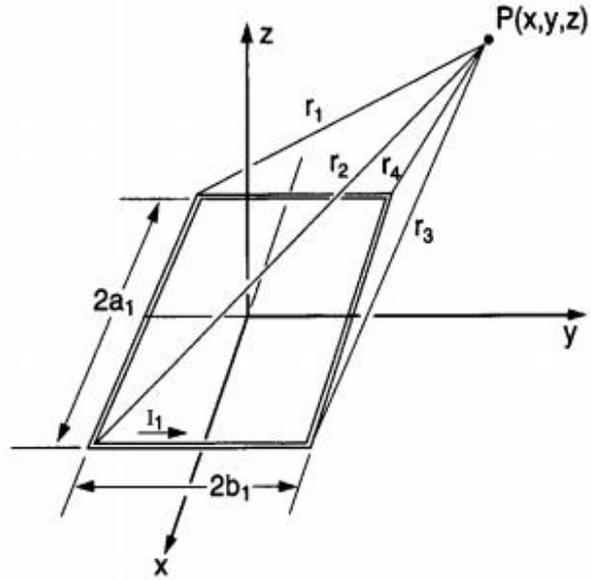


Figura 30: rappresentazione di una spira rettangolare nel piano x-y.

$$r_1 = \sqrt{(a_1 + x)^2 + (y + b_1)^2 + z^2} \quad (3.5)$$

$$r_2 = \sqrt{(a_1 - x)^2 + (y + b_1)^2 + z^2} \quad (3.6)$$

$$r_3 = \sqrt{(a_1 - x)^2 + (y - b_1)^2 + z^2} \quad (3.7)$$

$$r_4 = \sqrt{(a_1 + x)^2 + (y - b_1)^2 + z^2} \quad (3.8)$$

i quali considerano lo spostamento del punto di calcolo P(x,y,z) rispetto al centro della bobina. Successivamente, trovati questi coefficienti, si potrà determinare l'induzione magnetica sull'asse x,y e z.

$$B_x = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[ \frac{(-1)^{\alpha+1} z}{r_\alpha [r_\alpha + d_\alpha]} \right] \quad (3.9)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[ \frac{(-1)^{\alpha+1} z}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} C_\alpha]} \right] \quad (3.10)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \sum_{\alpha=1}^4 \left[ \frac{(-1)^{\alpha+1} d_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + (-1)^{\alpha+1} C_\alpha]} - \frac{C_\alpha}{r_\alpha [r_\alpha + d_\alpha]} \right] \quad (3.11)$$

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3.12)$$

Ora, grazie alla legge di Gauss, si determina il flusso prodotto dalla bobina sorgente su una certa superficie  $S$ , dato dalla formula:

$$\phi(t) = \int_S B \cdot n \cdot dS \quad (3.13)$$

Per trovare il coefficiente di auto induzione della bobina sorgente, conoscendo la corrente circolante, si calcoli il flusso magnetico del campo concatenato al circuito stesso e il coefficiente di auto induzione sarà dato dal rapporto di quest'ultimo e la corrente.

$$L_1 = \frac{\phi_1}{I_1} \quad (3.14)$$

dove

$$\phi_1 = \int_{S_1} B_1 \cdot n \cdot dS \quad (3.15)$$

Il coefficiente di autoinduzione della bobina ricevente si trova allo stesso modo e sarà uguale a:

$$L_2 = \frac{\phi_2}{I_2} \quad (3.16)$$

dove

$$\phi_2 = \int_{S_2} B_2 \cdot n \cdot dS \quad (3.17)$$

Avendo due circuiti elettricamente separati, quando il campo magnetico generato da uno esercita una forza elettromotrice sull'altro e viceversa, entra in gioco un altro coefficiente detto di mutua induzione. Quest'ultimo sarà dato dal rapporto tra il flusso magnetico del campo concatenato all'altro circuito e la corrente che percorre se stesso.

$$M_{1,2} = \frac{\phi_{1,2}}{I_1} ; M_{2,1} = \frac{\phi_{2,1}}{I_2} \quad (3.18)$$

dove

$$\phi_{1,2} = \int_{S_2} B_1 \cdot n \cdot dS \quad (3.19)$$

$$\phi_{2,1} = \int_{S_1} B_2 \cdot n \cdot dS \quad (3.20)$$

essendo  $S_1$  e  $S_2$  le superfici della bobina sorgente e ricevente rispettivamente.

Attraverso il potenziale vettore si determina che:

$$M_{1,2} = M_{2,1} = M \quad (3.21)$$

$M$  avrà un valore diverso da zero per circuiti accoppiati mentre sarà pari a zero per circuiti disaccoppiati.

Ora, il circuito di trasmissione potrà essere assimilato a quello di un trasformatore con la differenza che il traferro tra le due bobine è molto maggiore rispetto a un trasformatore tradizionale, avendo così un coefficiente di accoppiamento minore, che sarà dato dalla formula:

$$K \triangleq \frac{M}{\sqrt{L_T L_R}} \quad \text{con } 0 \leq K \leq 1 \quad (3.22)$$

Le equazioni che discretizzano un trasformatore sono:

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \dot{Z}_1 \bar{I}_1 + j\omega M \bar{I}_2 \\ \bar{V}_2 = j\omega M \bar{I}_1 + \dot{Z}_2 \bar{I}_2 \end{cases} \quad (3.23)$$

dove  $Z_1$  e  $Z_2$  sono le impedenze rispettivamente del trasmettitore e del ricevente

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (3.24)$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 \quad (3.25)$$

con  $V_1$  tensione della bobina sorgente,  $\omega$  la frequenza angolare,  $R_1$  e  $j\omega L_1$  sono la resistenza e la reattanza al primario,  $R_2$  e  $j\omega L_2$  le resistenze e la reattanza al secondario e infine  $I_1$  e  $I_2$  sono rispettivamente la corrente al primario e al secondario.

Nel nostro caso, avendo impostato la potenza  $P_2$  richiesta al carico [12][13]

$$P_2 = R_L \|\bar{I}_2\|^2 = \frac{R_L \bar{V}_1^2 \omega^2 M^2}{\|\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \omega^2 M^2\|^2} \quad (3.26)$$

si determina la tensione e la corrente necessari per alimentare la bobina sorgente con le seguenti formule, ricavate dalle precedenti:

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = \dot{Z}_2 \bar{I}_2 / j\omega M \\ \bar{V}_1 = \dot{Z}_1 \bar{I}_1 + j\omega M \bar{I}_2 \end{cases} \quad (3.27)$$

Conoscendo la tensione e la corrente al primario si trova la potenza complessa all'alimentazione che sarà formata da una parte attiva e una reattiva:

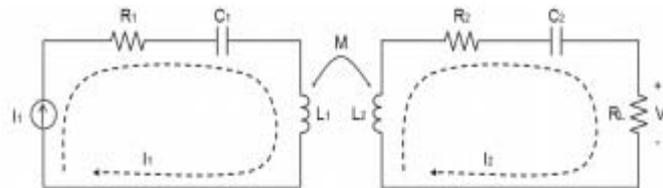
$$\bar{S}_1 = \bar{V}_1 \bar{I}_1^* = P_1 + jQ_1 = \frac{|\bar{V}_1|^2}{|\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \omega^2 M^2|^2} \dot{Z}_2^* (\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \omega^2 M^2) \quad (3.28)$$

Ora che abbiamo la potenza al primario, l'efficienza del nostro sistema induttivo è data dalla formula:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{R_L \omega^2 M^2}{[(R_2 + R_L)^2 + \omega^2 L_2^2] R_1 + \omega^2 M^2 (R_2 + R_L)} \quad (3.29)$$

sapendo che  $P_1 = \text{Re}[\bar{S}_1]$ .

Nel caso si inseriscano due condensatori in serie alle bobine cambiano le due impedenze, diventando:



**Figura 31:** Circuito equivalente con rifasamento serie.

$$Z_1 = R_1 + j \left( \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \quad (3.30)$$

$$Z_2 = R_2 + R_L + j \left( \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) \quad (3.31)$$

mentre tutte le altre formulazioni rimangono invariate.

# Capitolo 4

## Risultati *Nissan Leaf*

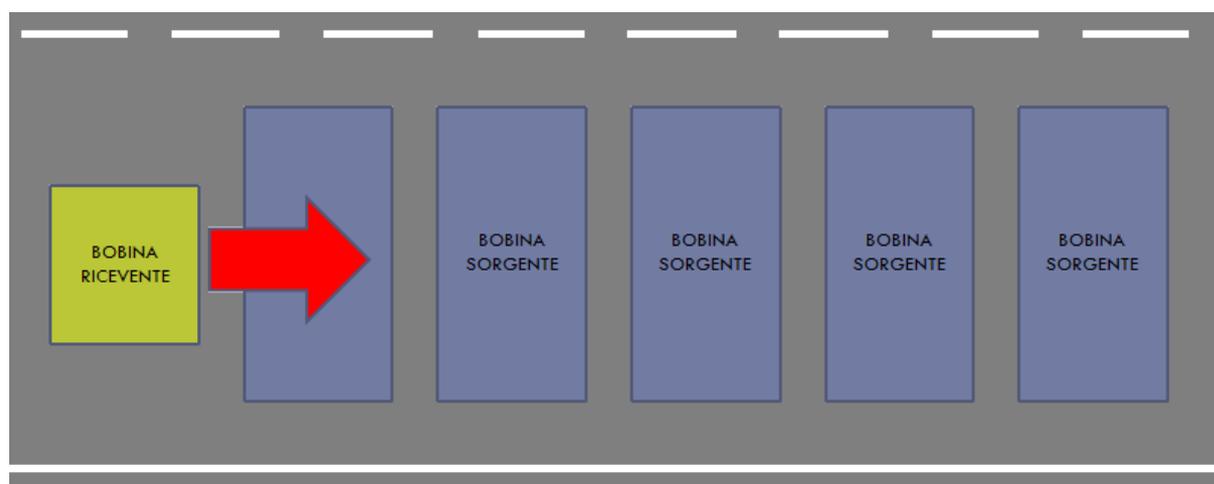
Lo scopo è stato quello di implementare un programma in MatLab, in cui al variare della potenza richiesta all'arrivo, oppure impostando tensione e corrente della bobina sorgente, mi calcoli tutti i parametri del sistema come induttanze, mutue induttanze, resistenze, tensioni e correnti. Oltre a questi si è determinato il tempo necessario per ricaricare al 50% la capacità della batteria e quindi i chilometri necessari alla ricarica, con ricarica 2C e 5C, con e senza rifasamento, alle frequenze 20 kHz, 85 kHz e 140 kHz.

### 4.1 Posizioni di calcolo

Qui di seguito verranno descritte le varie posizioni di passaggio dell'auto rispetto alle bobine sorgenti per poi essere richiamate nei calcoli dei capitoli seguenti.

#### Posizione 1

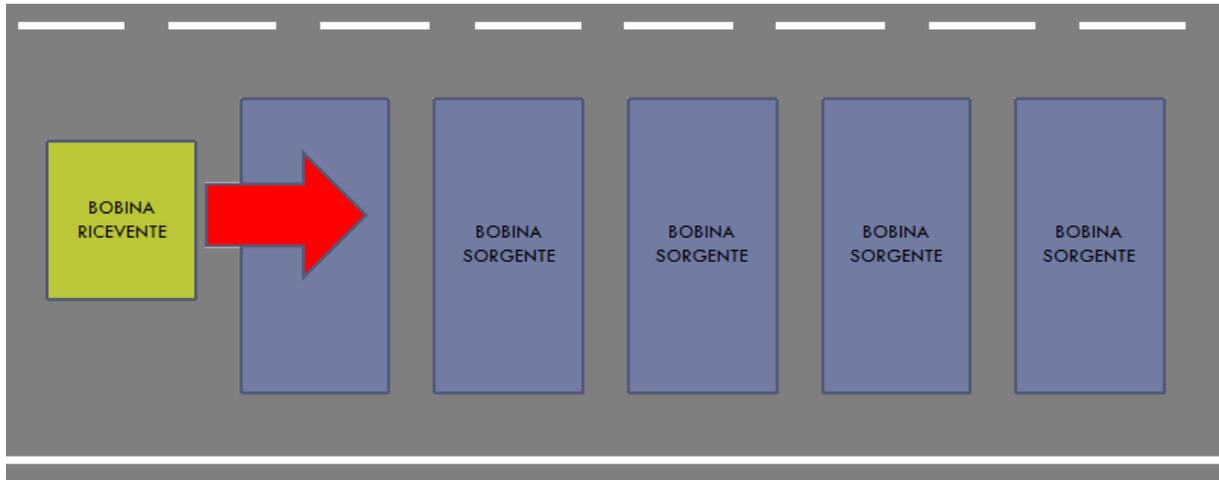
In questo caso l'auto passa perfettamente al centro della corsia e quindi al centro delle bobine sorgenti.



(a)

**Posizione 2**

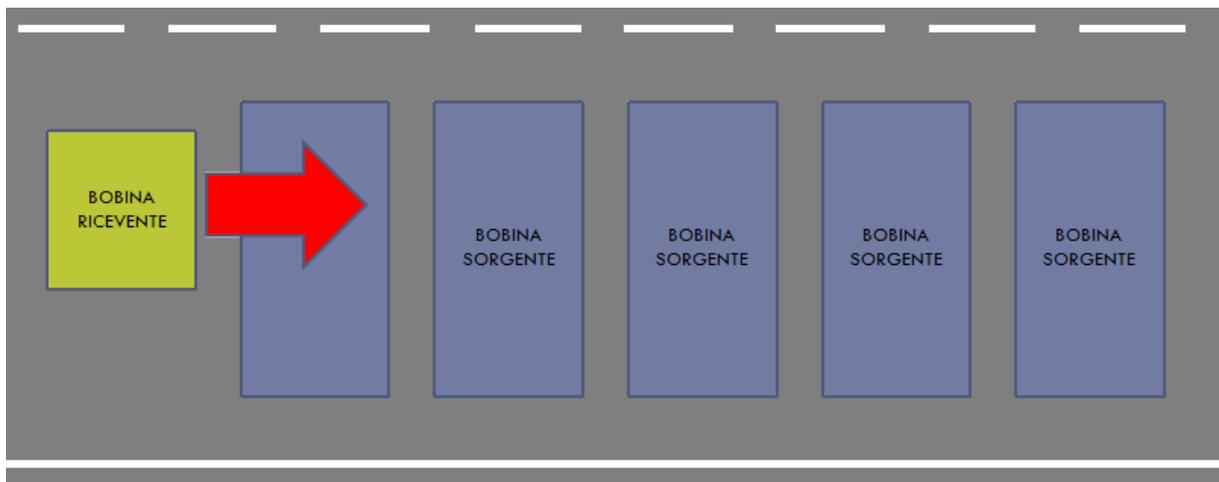
In questo secondo caso l'auto percorre la corsia leggermente traslata rispetto al centro di essa, con una traslazione di 0,25 metri rispetto l'asse delle bobine sorgenti.



(b)

**Posizione 3**

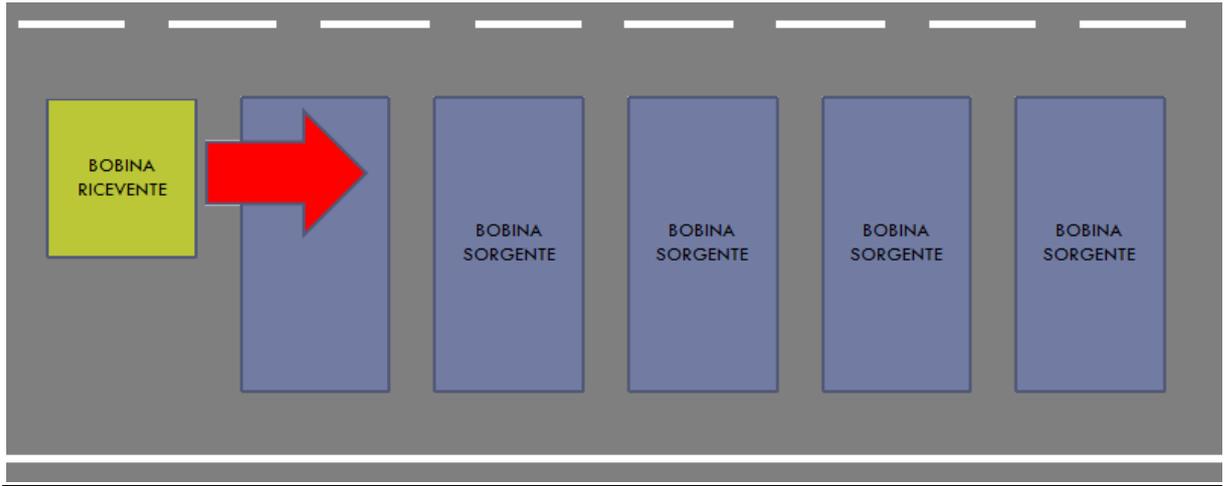
In questo caso l'auto percorrere la corsia traslata di 0,5 metri rispetto l'asse delle bobine sorgenti.



(c)

**Posizione 4**

In quest'ultimo caso l'auto percorre la corsia spostata verso il centro della carreggiata, con una traslazione di 0,75 metri rispetto l'asse delle bobine sorgenti.



(d)

**Figura 32:** Posizione della bobina ricevente rispetto alla sorgente; (a) l'auto passa centralmente alla corsia, (b) l'auto passa sfasata di 25 cm rispetto all'asse della bobina sorgente, (c) sfasamento di 50 cm, (d) sfasamento di 75 cm.

## 4.2 Prova a 20 kHz

In questa prova si è verificato il tempo necessario alla ricarica della batteria con e senza rifasamento, nelle modalità di ricarica 2C (125 A) e 5C (330 A).

### 4.2.1 Ricarica 2C (125 A)

A questa frequenza la corrente massima che supporta un singolo filo Litz è di 1,8 A quindi nel nostro caso, avendo 125 A:

$$N_{fili} = \frac{125}{1,8} = 70; d_{tot} = 2\sqrt{A/\pi} = 7,63 \text{ mm} \quad (4.1)$$

si potrà avere al massimo 58 spire nella bobina sorgente e 26 nella ricevente.

Nel nostro studio considereremo 25 spire per la bobina ricevente e 40 per la sorgente nel caso di ricarica 2C mentre, per la 5C, considereremo 15 spire per la ricevente e 35 per la sorgente.

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

Servendoci 70 fili per formare il trefolo si avrà una resistenza totale:

$$R_x = R_{filo} \cdot l_{spira\ media} \cdot N_{spire} \quad (4.2)$$

$$R_{bobina\ sorgente} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{sorgente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0571 \Omega \quad (4.3)$$

$$R_{bobina\ ricevente} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ricevente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0153 \Omega \quad (4.4)$$

### Posizione 1

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1111,4+	71,99-	109390+	109390	50000	45,71	16800	17,36
60	j694,1	j42,32	j2931,2				14400	14,68
50							12000	12,24

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	6,6738e-16+	j42,32	50341-	50341	50000	99,32	16800	17,36
60	j1189,5		j1,39e-11				14400	14,68
50							12000	12,24

### Posizione 2

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1231+	79,73-	145560+	145560	50000	34,35	16800	17,36
60	j1011,7	j46,87	j22964				14400	14,68
50							12000	12,24

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	7,3915e-16+	j46,87	50364-	50364	50000	99,23	16800	17,36
60	j1074,5		j1,39e-11				14400	14,68
50							12000	12,24

### Posizione 3

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1731,4+	112,14-	337120+	337120	50000	14,83	16800	17,36
60	j2168,4	j65,92	j129040				14400	14,68
50							12000	12,24

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1,0396-15+	j65,92	50487-	50487	50000	99,03	16800	17,36
60	j765,8		j1,40e-11				14400	14,68
50							12000	12,24

### Posizione 4

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	3721,3+	241,04-	1739200+	1739200	50000	2,87	16800	17,36
60	j5944,1	j141,70	j905440				14400	14,68
50							12000	12,24

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80		3,91e-					19200	19,58
70	2,23e-15+	14+	51385+	51385	50000	97,30	16800	17,36
60	j362,64	j141,7	j1.45e-11				14400	14,68
50							12000	12,24

### 4.2.2 Ricarica 5C (330 A)

A questa frequenza la corrente massima che supporto un singolo filo Litz è di 1,8 A quindi nel nostro caso, avendo 330 A:

$$N_{fili} = \frac{330}{1,8} = 180 ; d_{tot} = 2\sqrt{A/\pi} = 12,23 \text{ mm} \quad (4.5)$$

si potrà avere al massimo 36 spire nella bobina sorgente e 16 nella ricevente.

Servendoci 180 fili per formare il trefolo si avrà una resistenza totale:

$$R_x = R_{filo} \cdot l_{spira \text{ media}} \cdot N_{spire} \quad (4.6)$$

$$R_{bobina \text{ sorgente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{sorgente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0194 \Omega \quad (4.7)$$

$$R_{bobina \text{ ricevente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ricevente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0036 \Omega \quad (4.8)$$

### Posizione 1

### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	1723,4+	203,16-	566930+	566930	132000	23,28	6364	6,49
60	j2777,7	j78,05	j429790				5455	5,57
50							4546	4,64

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	2.77e-13+	j78,05	132510 –	132510	132000	99,61	6364	6,49
60	j1697,6		j2,68e-11				5455	5,57
50							4546	4,64

### Posizione 2

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	1887,9+	224,91-	718750+	718750	132000	18,36	6364	6,49
60	j3424	j85,90	j607900				5455	5,57
50							4546	4,64

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	3.06e-013+	j86,41	132530-	132530	132000	99,59	6364	6,49
60	j1533,8		j2.19e-011				5455	5,57
50							4546	4,64

### Posizione 3

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	2651,1+	315,83-	1545200+	1545200	132000	8,54	6364	6,49
60	j5868,4	j120,63	j1533600				5455	5,57
50							4546	4,64

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80		4,43e-					7273	7,42
70	4,30e-13+	14+	132670-	132670	132000	99,49	6364	6,49
60	j1093,4	j121,34	j3,74e-12				5455	5,57
50							4546	4,64

### Posizione 4

#### Senza rifasamento

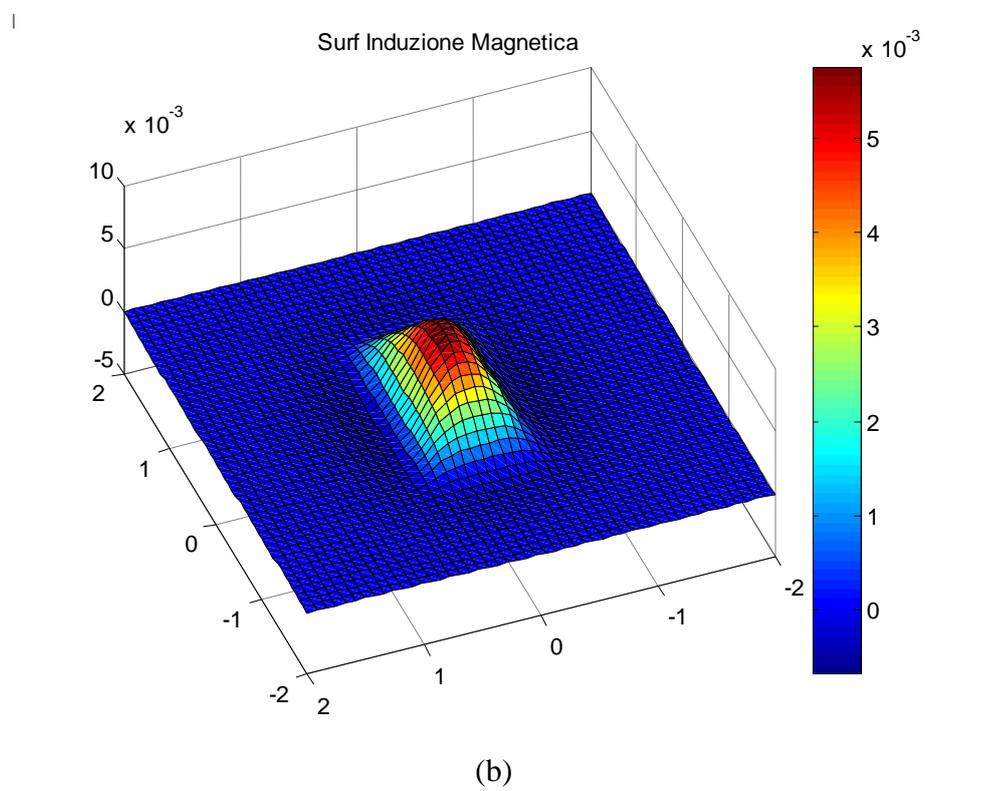
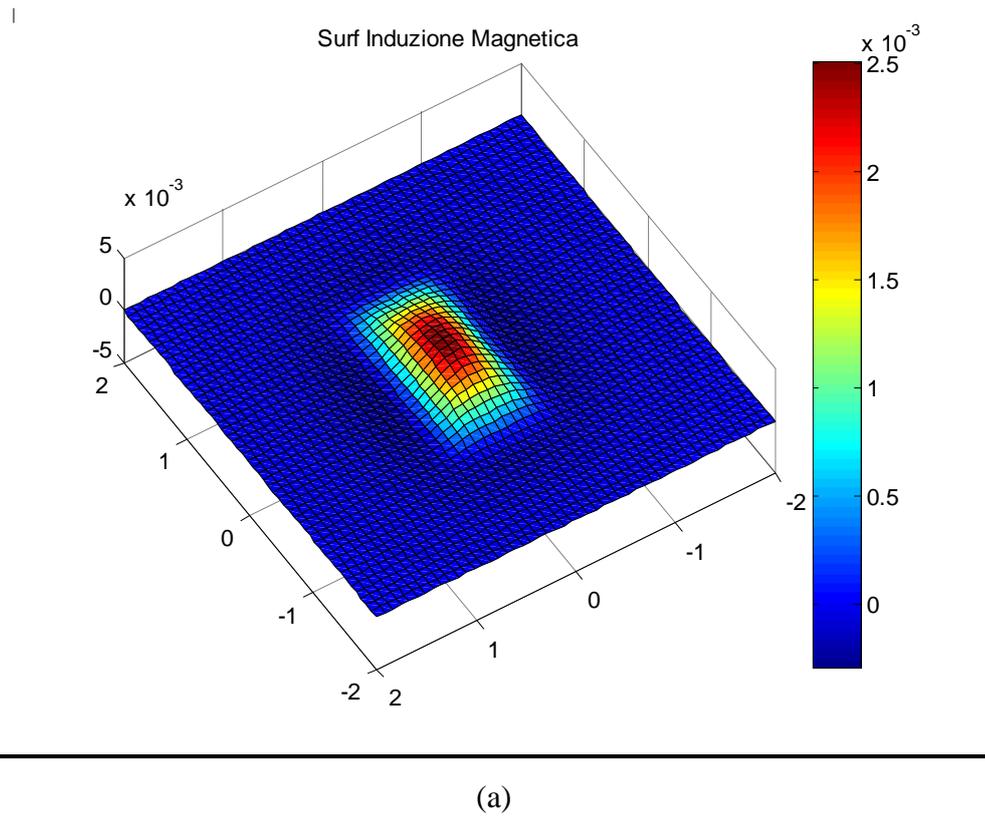
$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	5731,5+	675,6	7602500+	7602500	132000	1.74	6364	6,49
60	j1436,9	j259,6	j8220400				5455	5,57
50							4546	4,64

#### Con rifasamento

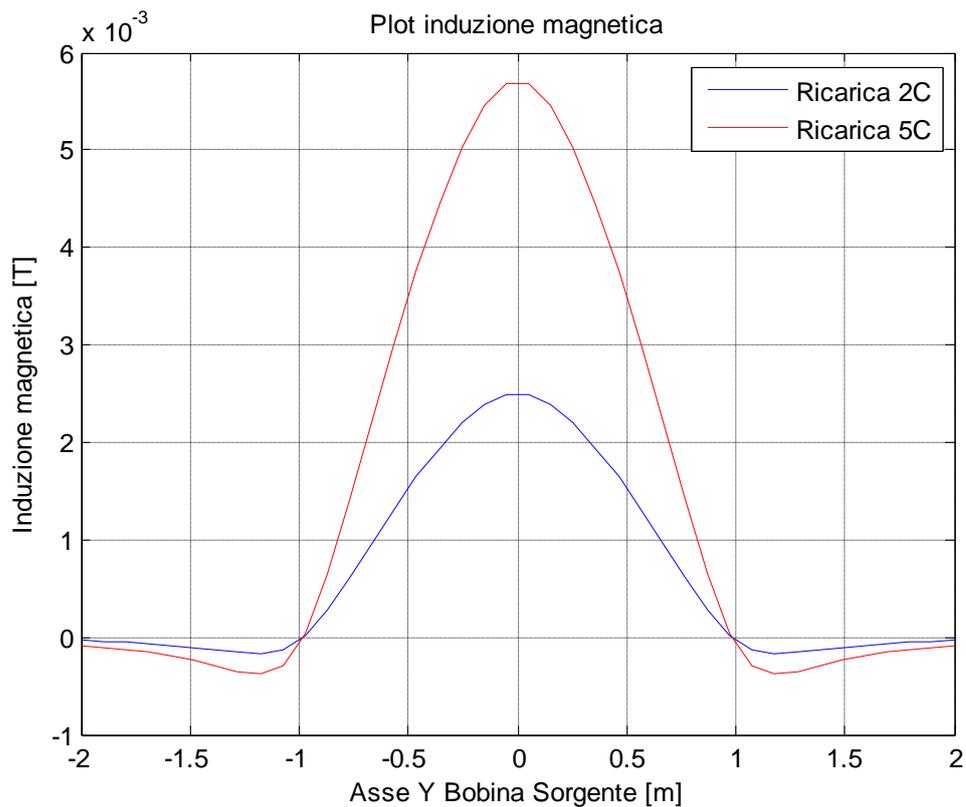
$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80		9.48e-					7273	7,42
70	9,20e-13+	14+	133700-	133700	132000	98,73	6364	6,49
60	j515,03	j259,6	j1,90e-10				5455	5,57
50							4546	4,64

### 4.2.3 Risultati in forma grafica

Ora si metterà a confronto la distribuzione di induzione magnetica nel caso di ricarica 2C e 5C senza rifasamento, nella posizione 1.



**Figura 33:** Distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 2C (a) e 5C (b) a 20 kHz.



**Figura 34:** Plot induzione magnetica lungo l'asse Y della bobina sorgente 20 kHz.

Si nota come nel caso della ricarica 5C in cui la corrente che percorre la bobina sorgente è maggiore rispetto al caso 2C, il picco di induzione magnetica su una superficie posta a 0,25 metri di altezza, è circa il doppio.

### 4.3 Prova a 85 kHz

In questa si è verificato il tempo necessario alla ricarica della batteria con e senza rifasamento, nelle modalità di ricarica 2C (125 A) e 5C (330 A) alla frequenza imposta dalla normativa.

#### 4.3.1 Ricarica 2C (125 A)

A questa frequenza la corrente massima che supporto un singolo filo Litz è di 0,457 A quindi nel nostro caso, avendo 125 A:

#### CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

$$N_{fili} = \frac{180}{0,457} = 270 ; d_{tot} = 2\sqrt{A/\pi} = 7,46 \text{ mm} \quad (4.9)$$

si potrà avere al massimo 60 spire nella bobina sorgente e 26 nella ricevente.

Servendoci 270 fili per formare il trefolo si avrà una resistenza totale:

$$R_x = R_{filo} \cdot l_{spira \text{ media}} \cdot N_{spire} \quad (4.10)$$

$$R_{bobina \text{ sorgente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{sorgente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0595\Omega \quad (4.11)$$

$$R_{bobina \text{ ricevente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ricevente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0159 \Omega \quad (4.12)$$

### Posizione 1

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1111,8+	71,99-	109520+	109520	50000	45,65	16800	17,36
60	j2959,6	j9,96	j201980				14400	14,68
50							12000	12,24

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1,42e-13+	j9,96	50255-	50255	50000	99,49	16800	17,36
60	j5045,8		j1,41e-12				14400	14,68
50							12000	12,24

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

### Posizione 2

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1231,4-	79,73-	145730+	145730	50000	34,31	16800	17,36
60	j4310,3	j11,03	j330080				14400	14,68
50							12000	12,24

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1,57e-13+	j11,03	50256-	50256	50000	99,49	16800	17,36
60	j4556		j1,73e-12				14400	14,68
50							12000	12,24

### Posizione 3

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1732,0+	112,14-	337450+	337450	50000	14,82	16800	17,36
60	j9231,0	j15,51	j1008300				14400	14,68
50							12000	12,24

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	2,20e-13+	j15,51	50263-	50263	50000	99,47	16800	17,36
60	j3239,6		j3,42e-12				14400	14,68
50							12000	12,24

**Posizione 4**

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	3722,6+	241,04+	1740800+	1740800	50000	2.87	16800	17,36
60	j25295	j33,35	j5972800				14400	14,68
50							12000	12,24

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	4,74e-13+	j33,35	50315-	50315	50000	99,37	16800	17,36
60	j1508,8		j1,58e-11				14400	14,68
50							12000	12,24

**4.3.2 Ricarica 5C (330 A)**

A questa frequenza la corrente massima che supporto un singolo filo Litz è di 0,457 A quindi nel nostro caso, avendo 330 A:

$$N_{fili} = \frac{330}{0,457} = 722 ; d_{tot} = 2\sqrt{A/\pi} = 12,2 \text{ mm} \quad (4.13)$$

si potrà avere al massimo 36 spire nella bobina sorgente e 16 nella ricevente.

Servendoci 722 fili per formare il trefolo si avrà una resistenza totale:

$$R_x = R_{filo} \cdot l_{spira \text{ media}} \cdot N_{spire} \quad (3.14)$$

$$R_{bobina \text{ sorgente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{sorgente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0195\Omega \quad (4.15)$$

$$R_{bobina \text{ ricevente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ricevente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0036 \Omega \quad (4.16)$$

CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

**Posizione 1**

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	1723,4+	203,16-	567050+	567050	132000	23,28	6364	6,49
60	j11811	j18,37	j2367900				5455	5,57
50							4546	4,64

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	2,61e-13+	j18,37	132400+	132400	132000	99,70	6364	6,49
60	j7208,7		j4,79e-12				5455	5,57
50							4546	4,64

**Posizione 2**

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	1907,9+	224,91-	724820+	724820	132000	18,21	6364	6,49
60	j14544	j20,33	j3232400				5455	5,57
50							4546	4,64

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	2,89e-13+	j20,33	132400-	132400	132000	99,69	6364	6,49
60	j6511,7		j5,87e-12				5455	5,57
50							4546	4,64

CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

**Posizione 3**

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	2679,1+	315,83	1557900+	1557900	132000	8,47	6364	6,49
60	j24930	j28,55	j7797100				5455	5,57
50							4546	4,64

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	4,06e-13+	j28,55	132410-	132410	132000	99,69	6364	6,49
60	j4637,5		j1,16e-11				5455	5,57
50							4546	4,64

**Posizione 4**

Senza rifasamento

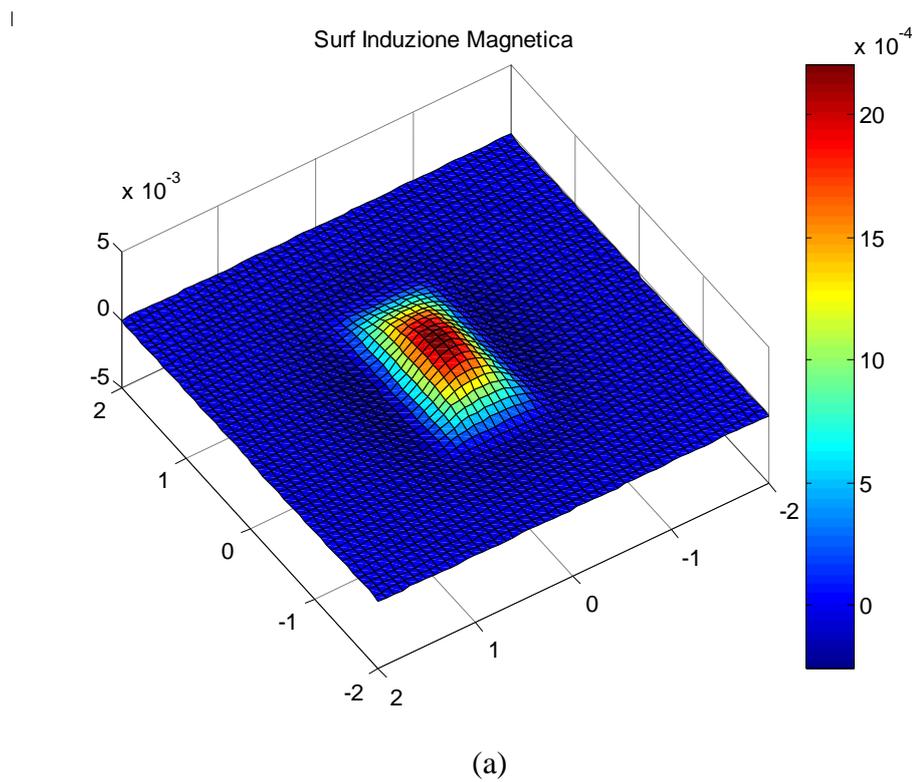
$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	5731,6+	675,66-	7603800+	7603800	132000	1,74	6364	6,49
60	j61087	j61,08	j40924000				5455	5,57
50							4546	4,64

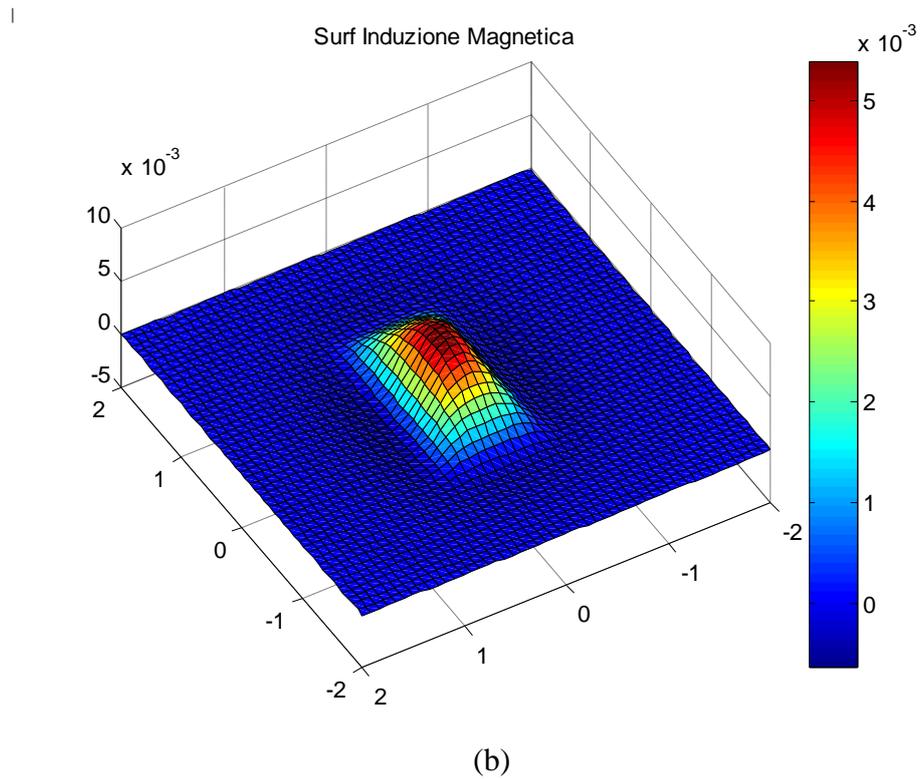
Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	8,68e-13+	j61,08	132460-	132460	132000	99,65	6364	6,49
60	j2168,6		j5.30e-11				5455	5,57
50							4546	4,64

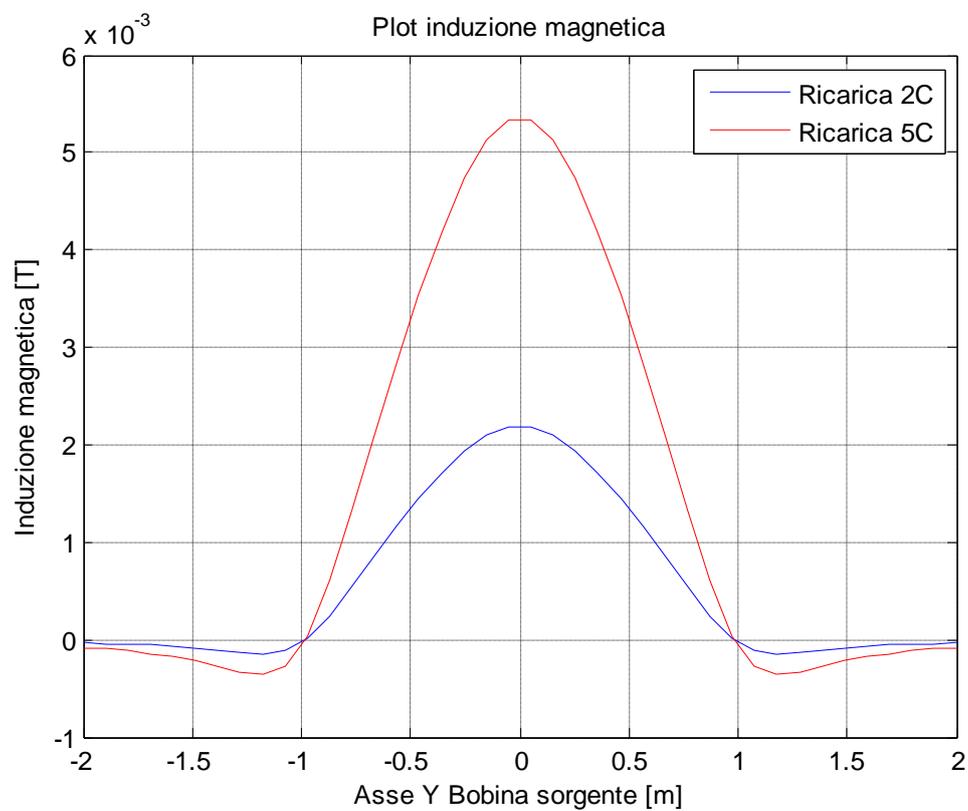
### 4.3.3 Risultati in forma grafica

Ora si metter  a confronto la distribuzione di induzione magnetica nel caso di ricarica 2C e 5C senza rifasamento, nella posizione 1.





**Figura 35:** Distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 2C (a) e 5C (b) a 85 kHz.



**Figura 36:** Plot induzione magnetica lungo l'asse Y della bobina sorgente 85 kHz.

#### 4.4 Prova a 140 kHz

In questa prova si è verificato il tempo necessario alla ricarica della batteria con e senza rifasamento, nelle modalità di ricarica 2C (125 A) e 5C (330 A) a una frequenza maggiore rispetto al caso precedente.

##### 4.4.1 Ricarica 2C (125 A)

A questa frequenza la corrente massima che supporto un singolo filo Litz è di 0,226 A quindi nel nostro caso, avendo 125 A:

$$N_{fili} = \frac{180}{0,226} = 553; d_{tot} = 2\sqrt{A/\pi} = 7,55 \text{ mm} \quad (4.17)$$

si potrà avere al massimo 59 spire nella bobina sorgente e 26 nella ricevente.

Servendoci 553 fili per formare il trefolo si avrà una resistenza totale:

$$R_x = R_{filo} \cdot l_{spira \text{ media}} \cdot N_{spire} \quad (4.18)$$

$$R_{bobina \text{ sorgente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{sorgente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0583 \Omega \quad (4.19)$$

$$R_{bobina \text{ ricevente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ricevente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0156 \Omega \quad (4.20)$$

#### Posizione 1

##### Senza rifasamento

<i>V</i> (km/h)	<i>V</i> <sub>1</sub> (V)	<i>I</i> <sub>1</sub> (A)	<i>S</i> <sub>1</sub> (VA)	<i>P</i> <sub>1</sub> (W)	<i>P</i> <sub>2</sub> (W)	<i>η</i> (%)	<i>N</i> <sub>bobine</sub>	<i>Km</i>
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1111,6+	71,99-	109500+	109500	50000	45,66	16800	17,36
60	j4875,2	j6,05	j344240				14400	14,68
50							12000	12,24

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	7,78e-16+	j6,05	50246-	50246	50000	99,51	16800	17,36
60	j8310,1		j1,11e-10				14400	14,68
50							12000	12,24

### Posizione 2

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1231,2+	79,73-	145710+	145710	50000	34,31	16800	17,36
60	j7100,0	j6,69	j557850				14400	14,68
50							12000	12,24

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	8,62e-16+	j6,69	50246-	50246	50000	99,51	16800	17,36
60	j7503,3		1,11e-10				14400	14,68
50							12000	12,24

### Posizione 3

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1731,7+	112,14+	337410+	337410	50000	14,82	16800	17,36
60	j15205	j9,42	j1688800				14400	14,68
50							12000	12,24

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	1,21e-15+	j9,42	50249-	50249	50000	99,50	16800	17,36
60	j5334,9		j1,11e-10				14400	14,68
50							12000	12,24

### Posizione 4

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	3721,9+	241,04-	1740600+	1740600	50000	2,87	16800	17,36
60	j41664	j20,25	j9967200				14400	14,68
50							12000	12,24

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							21600	22,03
80							19200	19,58
70	2,61e-15+	j20,24	50268-	50268	50000	99,47	16800	17,36
60	j2483,0		j1,11e-10				14400	14,68
50							12000	12,24

#### 4.4.2 Ricarica 5C (330 A)

A questa frequenza la corrente massima che supporto un singolo filo Litz è di 0,226 A quindi nel nostro caso, avendo 330 A:

$$N_{fili} = \frac{330}{0,226} = 1460; d_{tot} = 2\sqrt{A/\pi} = 12,27 \text{ mm} \quad (4.21)$$

si potrà avere al massimo 36 spire nella bobina sorgente e 16 nella ricevente.

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

Servendoci 722 fili per formare il trefolo si avrà una resistenza totale:

$$R_x = R_{filo} \cdot l_{spira\ media} \cdot N_{spire} \quad (4.22)$$

$$R_{bobina\ sorgente} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{sorgente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0193 \Omega \quad (4.23)$$

$$R_{bobina\ ricevente} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ricevente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0035 \Omega \quad (4.24)$$

### Posizione 1

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	1723,3+	203,16-	567030+	567030	132000	23,28	6364	6,49
60	j19454	j11,15	j3933000				5455	5,57
50							4546	4,64

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	3,17e-13+	j11,15	132390-	132390	132000	99,71	6364	6,49
60	j11873		j3,53e-12				5455	5,57
50							4546	4,64

### Posizione 2

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	1907,8+	224,91-	724800+	724800	132000	18,21	6364	6,49
60	j23956	j12,34	j5364300				5455	5,57
50							4546	4,64

## CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	3,51e-13+	12,34	132390-	132390	132000	99,70	6364	6,49
60	j10725		j4,33e-12				5455	5,57
50							4546	4,64

### Posizione 3

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	2679,0+	315,83-	1557900+	1557900	132000	8,47	6364	6,49
60	j41062	j17,33	j12922000				5455	5,57
50							4546	4,64

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	4,93e-13+	j17,33	132390-	132390	132000	99,70	6364	6,49
60	j7637,6		j8,54e-12				5455	5,57
50							4546	4,64

### Posizione 4

#### Senza rifasamento

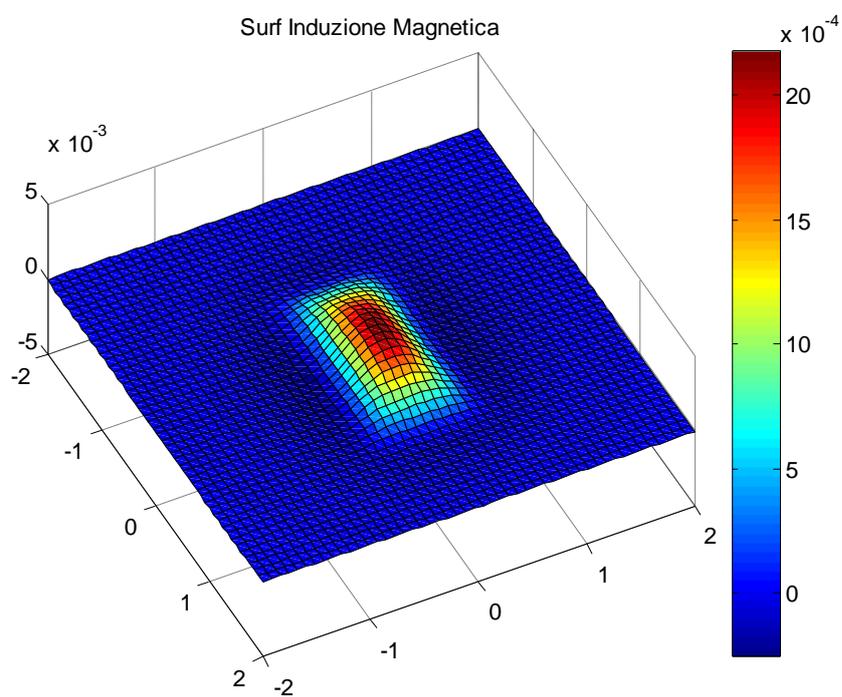
$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	5731,3+	675,66-	7603600+	7603600	132000	1,74	6364	6,49
60	j100610	j37,08	j67769000				5455	5,57
50							4546	4,64

Con rifasamento

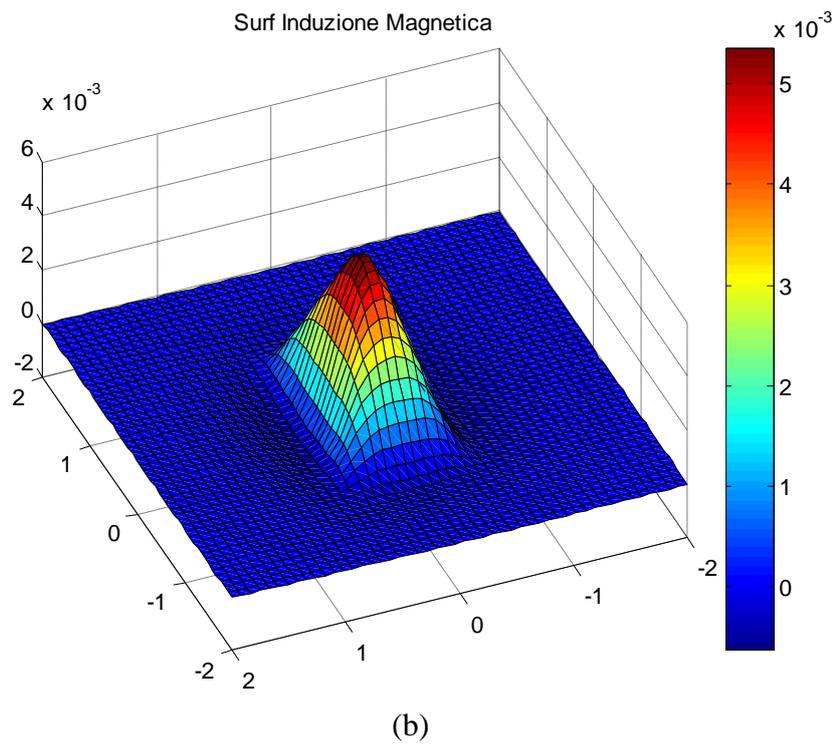
$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							8182	8,35
80							7273	7,42
70	1,05e-12	j37,08	132410-	132410	132000	99,68	6364	6,49
60	j3570,6		j3,91e-11				5455	5,57
50							4546	4,64

**4.4.3 Risultati in forma grafica**

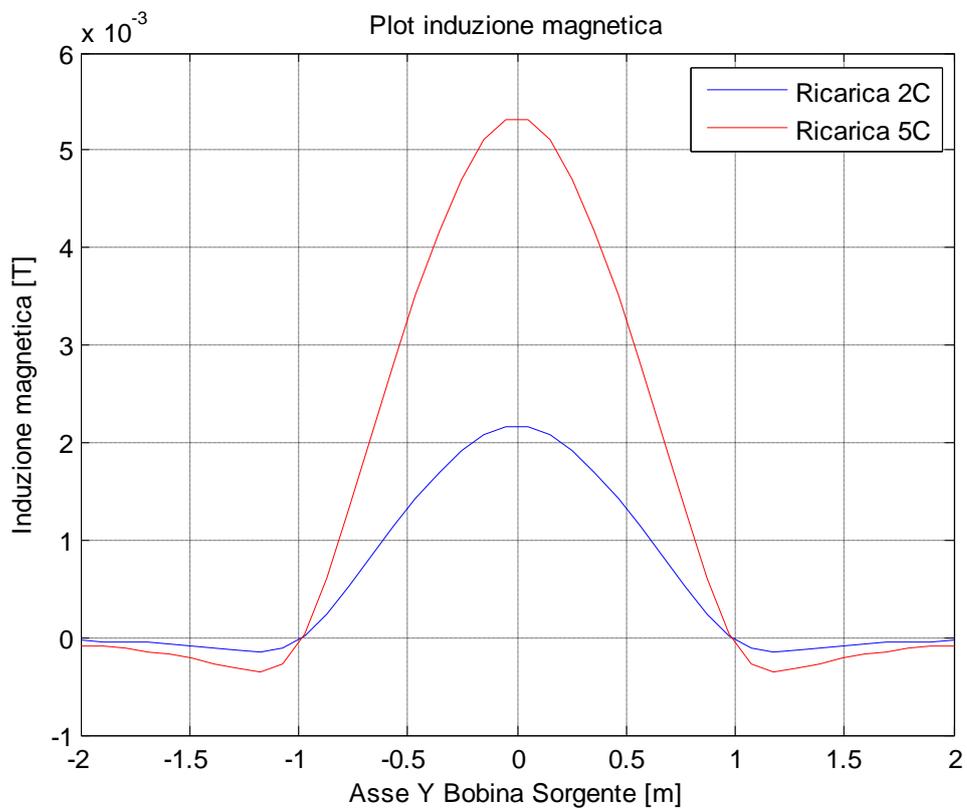
Ora si metter  a confronto la distribuzione di induzione magnetica nel caso di ricarica 2C e 5C senza rifasamento, nella posizione 1.



(a)



**Figura 37:** Distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 2C (a) e 5C (b) a 140 kHz.

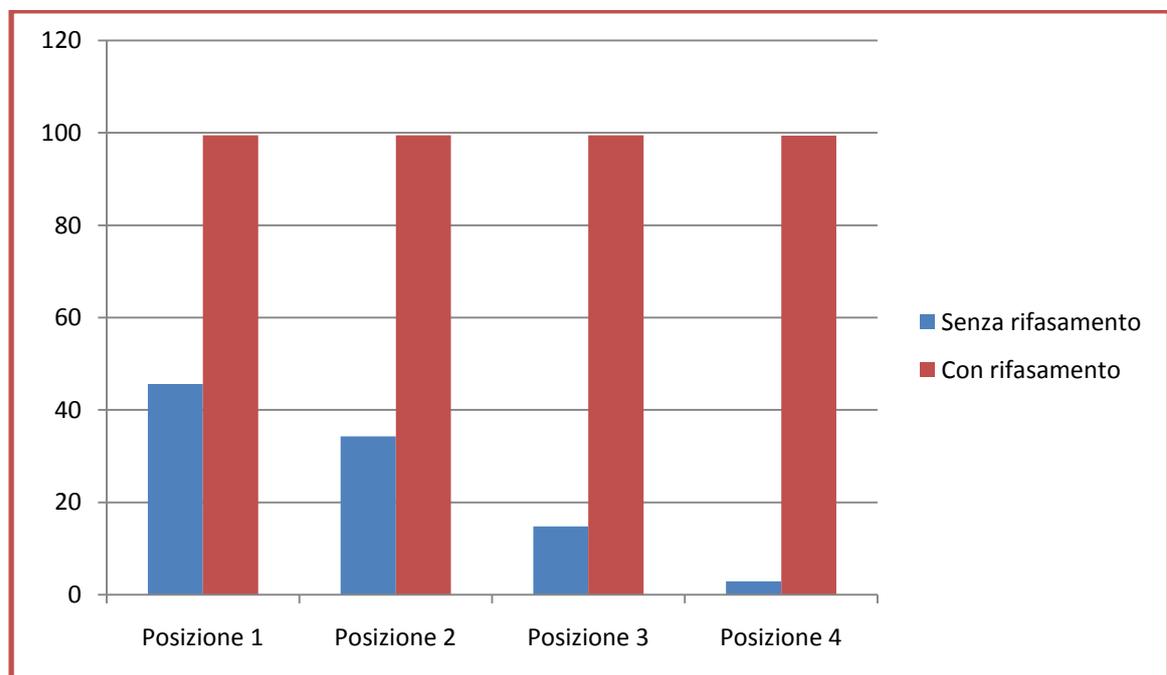


**Figura 38:** Plot induzione magnetica lungo l'asse Y della bobina sorgente a 140 kHz.

## 4.5 Analisi dei risultati

La prima cosa che si nota dai risultati è che all'aumentare della frequenza di risonanza, aumenta la tensione di alimentazione della bobina sorgente mentre diminuisce la corrente. Questo si vede soprattutto nei casi di rifasamento, infatti considerando la corrente quando l'auto passa centralmente nella corsia (posizione 1 a 2C) alle tre frequenze si vede che il valore passa da 42,32A a 20kHz, 9,96A a 85 kHz per arrivare a 6,05A a 140kHz. La diminuzione del valore della corrente va bene perché diminuiscono, anche se lievemente visto le basse resistenze, le perdite joule nelle bobine, ma bisogna fare attenzione al dimensionamento degli altri apparecchi circuitali come i condensatori che dovranno essere dimensionati per alti valori di tensione.

Dopo aver visto dai risultati, che alle varie frequenze il rendimento cambia pochissimo, per analizzare il sistema ci focalizzeremo al caso degli 85kHz visto che in futuro, le normative, imporranno di utilizzare questa frequenza di risonanza.

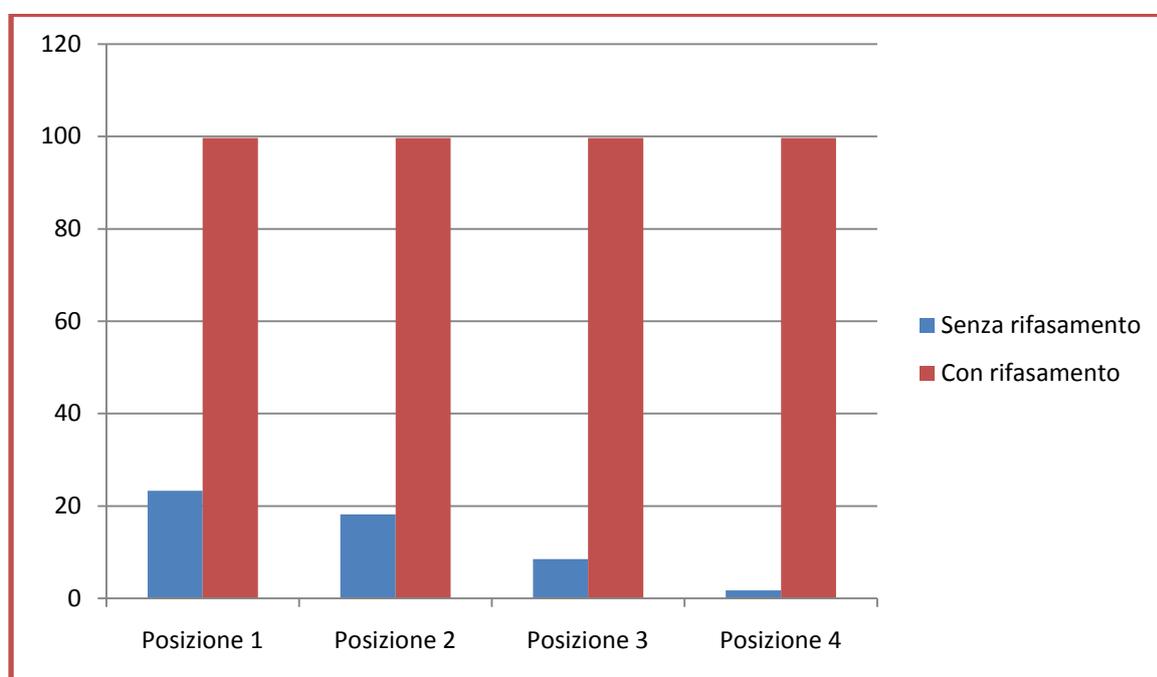


**Figura 39:** Rendimento del sistema a 85kHz con ricarica 2C con e senza rifasamento.

#### CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF

Come si vede nelle figure 39 e 40, nel caso in cui si rifasino le induttanze delle bobine, il rendimento cambia pochissimo anche se l'auto, invece di passare centralmente alla corsia passa lateralmente, e questo perché le resistenze sono piccole e le correnti cambiano poco e di conseguenza la potenza persa  $P_j$  è modesta. Nel caso in cui non si rifasi invece, la tensione diminuisce ma aumenta la corrente e quindi si avranno più perdite  $P_j$  negli avvolgimenti (bobine).

Queste considerazioni fatte per la ricarica  $2C$ , possono esser fatte anche per la  $5C$ , come si vede nella figura seguente:



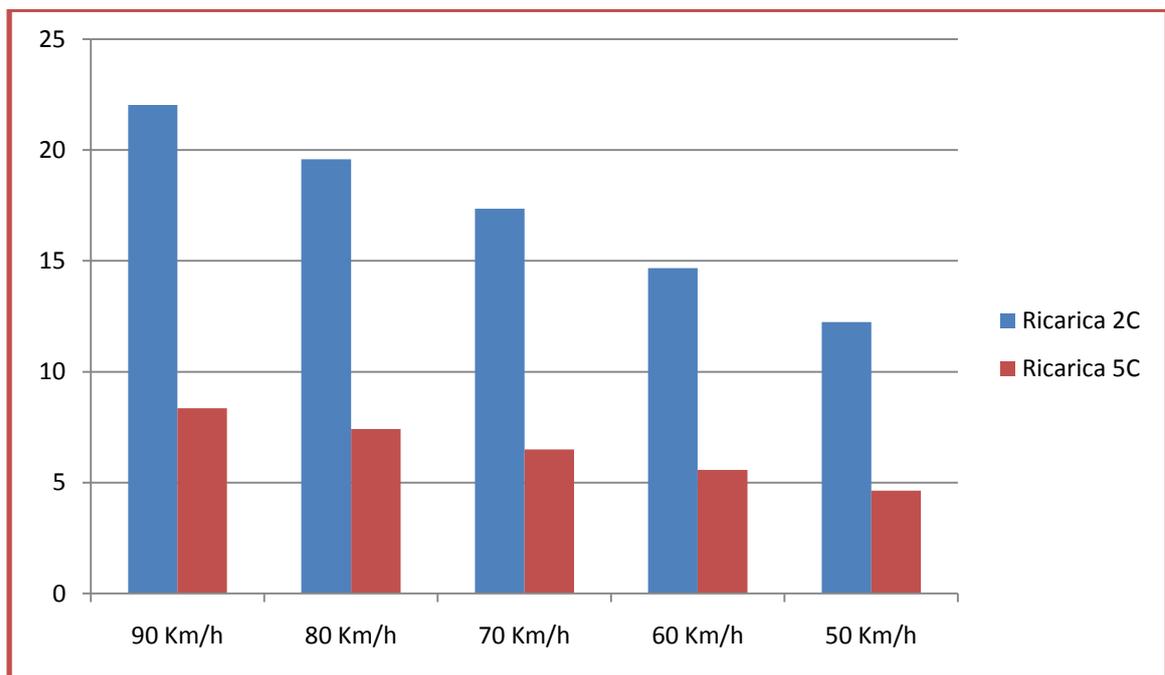
**Figura 40:** Rendimento del sistema a  $85kHz$  con ricarica  $5C$  con e senza rifasamento.

Il rendimento potrà sembrare alto, ma questo è solo quello del trasferimento wireless mentre poi bisognerà considerare anche quello dell'alimentatore, delle linee elettriche che collegano le varie bobine, del raddrizzatore e della batteria, per arrivare a un rendimento totale di circa  $75\%$ .

Nella progettazione si è considerato prima la ricarica  $2C$  e poi  $5C$  e sono stati valutati i tempi per ricaricare la capacità della batteria. Nella ricarica  $2C$  servirebbero troppi chilometri per effettuare la ricarica quindi per limitare le dimensioni del sistema sarebbe

più convenite realizzare la 5C e limitando agli automobilisti la velocità di percorrenza, visto che l'energia trasferita dipende da essa.

A seconda della tipologia di strada dove verrà installato il sistema di ricarica si potrà imporre una determinata velocità, per esempio nel caso di una strada extraurbana si potrebbe imporre una velocità massima di 50Km/h mentre nel caso di una corsia autostradale bisognerà imporre una velocità ragionevole da valutare poi in fase di progetto, ma che potrebbe essere 80Km/h.

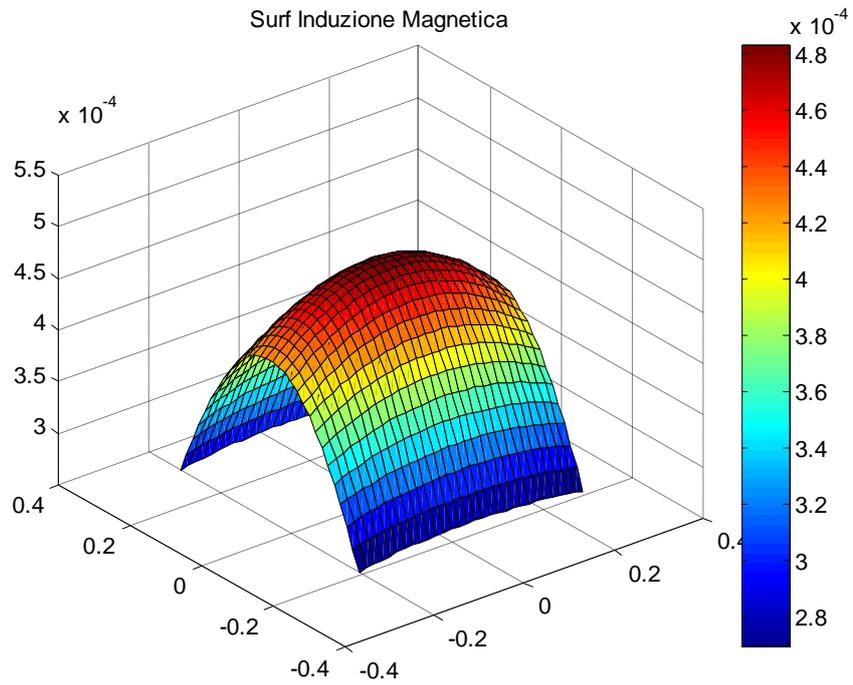


**Figura 41:** Chilometri necessari per ricaricare la batteria a due diverse potenze in funzione della velocità del veicolo.

Ora vediamo la distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 5C con rifasamento, nella bobina ricevente, a seconda della posizione dell'auto rispetto all'asse della bobina sorgente:

Posizione 1

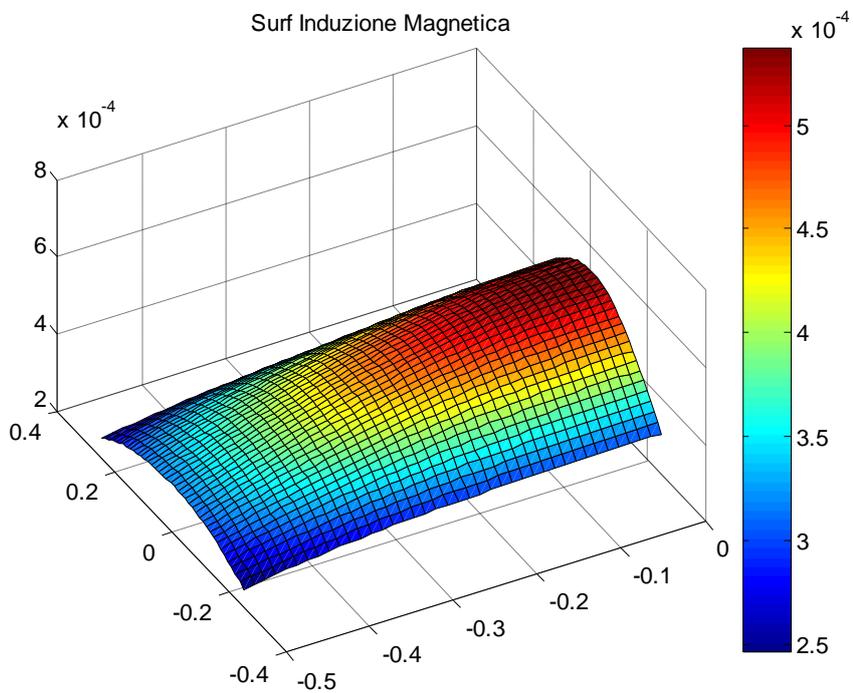
l



(a)

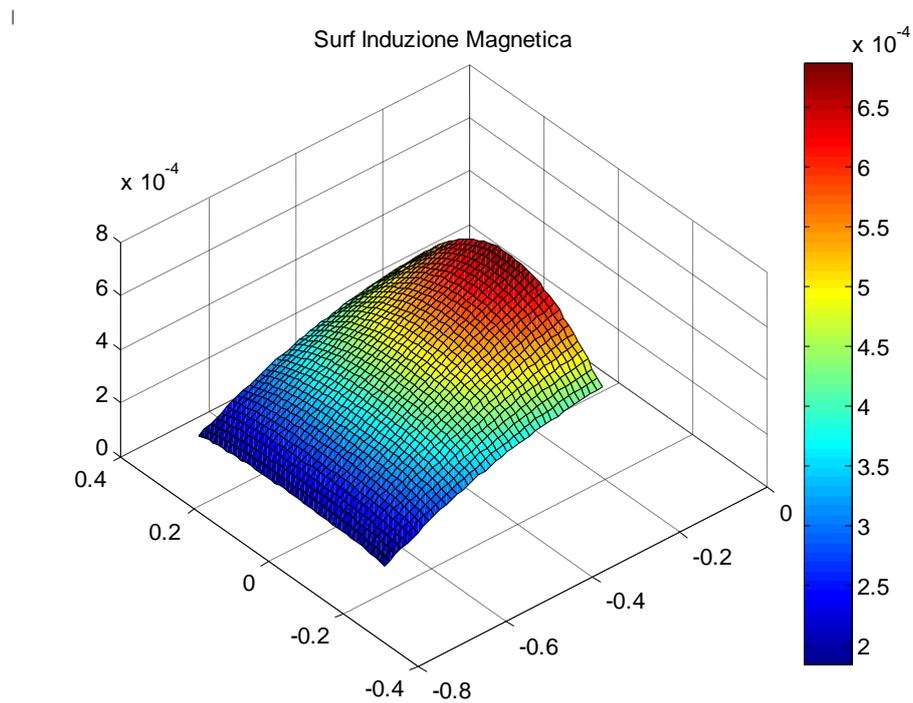
Posizione 2

l



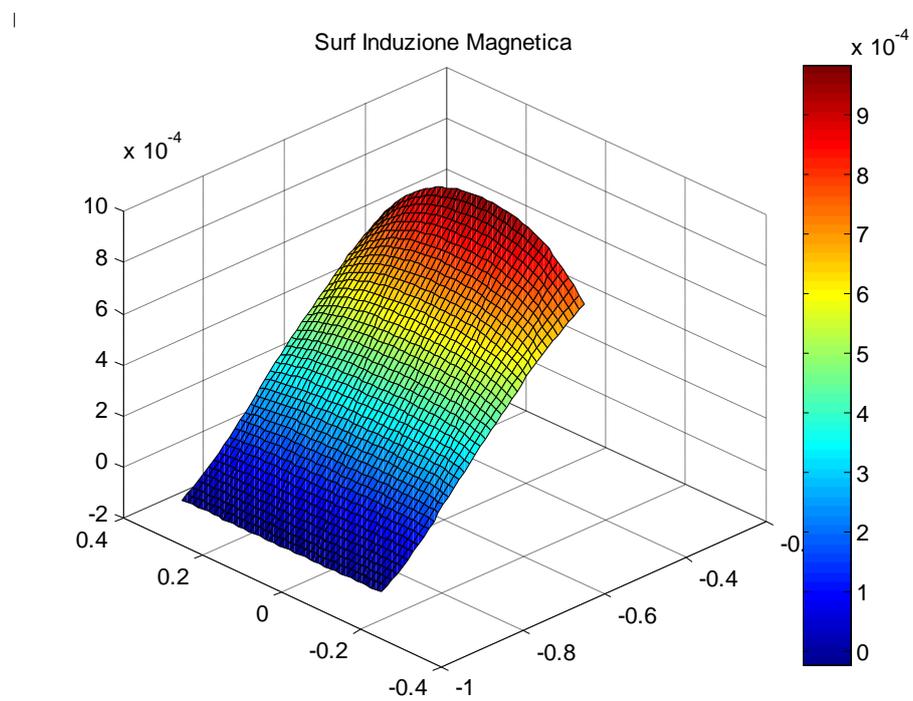
(b)

Posizione 3



(c)

Posizione 4



(d)

**Figura 42:** Distribuzione dell'induzione magnetica al variare della posizione reciproca tra bobina ricevente e sorgente.

#### *CAPITOLO 4. RISULTATI NISSAN LEAF*

Si vede che l'induzione magnetica varia a seconda della posizione reciproca tra bobina ricevente e sorgente, infatti nella posizione 4, in un lato della bobina ricevente l'induzione magnetica  $B$  è nulla e aumenta avvicinandosi verso l'asse della sorgente.

# Capitolo 5

## Risultati *Tesla S*

Vediamo ora, cosa cambia se invece di ricaricare la batteria della *Nissan Leaf* considerata nei capitoli precedenti, si ricarichi la *Tesla S*, un'autovettura con batterie diverse.



**Figura 43:** Tesla S.

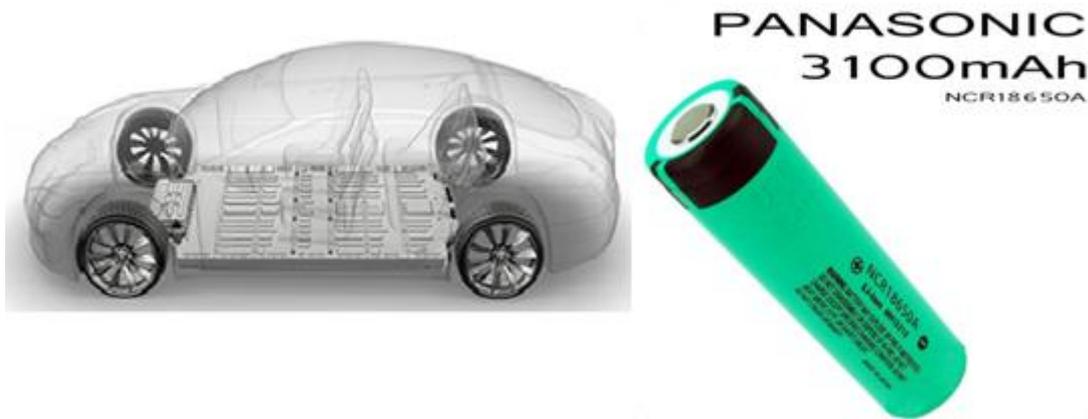
### 5.1 Batterie al Litio

Le batterie al litio utilizzate nella *Tesla S* sono fabbricate dalla Panasonic e hanno una capacità maggiore rispetto a quelle della *Nissan Leaf*.

Caratteristiche della batteria:

- Tipo: ioni di litio
- Numero di celle: 99 e ognuna formata da 69 batterie per un totale di 6831 batterie
- Configurazione celle: 11 celle in serie per 9 vie in parallelo
- Tensione nominale cella: 3,78 V
- Tensione nominale batteria: 374,2 V
- Energia: 60 o 85 kWh
- Massima tensione di carica della cella: 4,2 V
- Minima tensione di scarica della cella: 2,5 V

Per quest'auto è possibile scegliere tra due tipologie di batterie, una da 60 kWh e una da 85 kWh. Nello studio si considera la seconda, la quale ha una capacità di 213,9 Ah.



**Figura 44:** Posizionamento delle batterie sull'auto.

## 5.2 Risultati Analitici a 85 kHz

Le ipotesi sono le stesse fatte per il capitolo 3. Si effettuerà lo studio solo alla frequenza di 85 kHz perché, come detto nei capitoli precedenti, sarà quella imposta dalla normativa in futuro, nelle quattro posizioni di calcolo descritte nel paragrafo 4.1 e per una ricarica parziale uguale a quella studiata nel caso precedente, che corrisponde a 12kWh cioè il 14% della capacità della batteria.

### 5.2.1 Ricarica 2C ( 420 A)

A questa frequenza la corrente massima che supporta un singolo filo Litz è di 0,457 A quindi nel nostro caso, avendo 420 A:

$$N_{fili} = \frac{420}{0,457} = 919; d_{tot} = 2\sqrt{A/\pi} = 13,77 \text{ mm} \quad (5.1)$$

si potrà avere al massimo 32 spire nella bobina sorgente e 14 nella ricevente.

## CAPITOLO 5. RISULTATI TESLA S

Servendoci 919 fili per formare il trefolo si avrà una resistenza totale:

$$R_x = R_{filo} \cdot l_{spira\ media} \cdot N_{spire} \quad (5.2)$$

$$R_{bobina\ sorgente} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{sorgente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0140 \Omega \quad (5.3)$$

$$R_{bobina\ ricevente} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ricevente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0026 \Omega \quad (5.4)$$

### Posizione 1

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							6429	6,56
80							5714	5,82
70	1838,4+	277,51-	850800+	850800	168000	19,75	5000	5,10
60	j15930	j21,38	j4381400				4285	4,37
50							3571	3,64

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							6429	6,56
80							5714	5,82
70	5,56e-16+	j21,38	168470-	168470	168000	99,72	5000	5,10
60	j7878,7		j3,13e-10				4285	4,37
50							3571	3,64

### Posizione 2

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							6429	6,56
80							5714	5,82
70	2034,9+	307,17-	1080400+	1080400	168000	15,55	5000	5,10
60	j19236	j23,67	j5860600				4285	4,37
50							3571	3,64

## CAPITOLO 5. RISULTATI TESLA S

### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							6429	6,56
80							5714	5,82
70	6,16e-16+	j23,67	168470-	168470	168000	99,72	5000	5,10
60	j7117,9		j3,13e-10				4285	4,37
50							3571	3,64

### Posizione 3

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							6429	6,56
80							5714	5,82
70	2855,2+	430,99-	2290100+	2290100	168000	7,34	5000	5,10
60	j31904	j33,209	j13656000				4285	4,37
50							3571	3,64

#### Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							6429	6,56
80							5714	5,82
70	8,64e-16+	j33,21	168480-	168480	168000	99,71	5000	5,10
60	j5073,2		j3,13e-10				4285	4,37
50							3571	3,64

### Posizione 4

#### Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							6429	6,56
80							5714	5,82
70	6091,4+	919,5-	11022000+	11022000	168000	1,52	5000	5,10
60	j76510	j70,85	j69919000				4285	4,37
50							3571	3,64

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							6429	6,56
80							5714	5,82
70	1,84e-15+	j70,85	168530-	168530	168000	99,68	5000	5,10
60	j2378,7		j3,14e-10				4285	4,37
50							3571	3,64

**5.2.2 Ricarica 5C (1050 A)**

A questa frequenza la corrente massima che supporto un singolo filo Litz è di 0,457 A quindi nel nostro caso, avendo 1050 A:

$$N_{fili} = \frac{1050}{0,457} = 2298 ; d_{tot} = 2 \cdot \sqrt{A/\pi} = 21,77 \text{ mm} \quad (5.5)$$

quindi si potrà avere al massimo 20 spire nella bobina sorgente e 9 nella ricevente.

Servendoci 2298 fili per formare il trefolo si avrà una resistenza totale:

$$R_x = R_{filo} \cdot l_{spira \text{ media}} \cdot N_{spire} \quad (5.6)$$

$$R_{bobina \text{ sorgente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{sorgente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,0035 \Omega \quad (5.7)$$

$$R_{bobina \text{ ricevente}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ricevente}} \cdot N_{fili}\right)} = 0,000674 \Omega \quad (5.8)$$

CAPITOLO 5. RISULTATI TESLA S

**Posizione 1**

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							2571	2,62
80							2285	2,34
70	2959,5+	1096,5-	6065300+	6065300	420000	6,92	2000	2,04
60	j55990	j50,37	j61245000				1714	1,74
50							1428	1,46

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							2571	2,62
80							2285	2,34
70	j8353,3	j50,37	420750	420750	420000	99,82	2000	2,04
60							1714	1,74
50							1428	1,46

**Posizione 2**

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							2571	2,62
80							2285	2,34
70	3273,1+	1212,7-	7512500+	7512500	420000	5,59	2000	2,04
60	j63607	j55,71	j76953000				1714	1,74
50							1428	1,46

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							2571	2,62
80							2285	2,34
70	j7553,1	j55,71	420750	420750	420000	99,82	2000	2,04
60							1714	1,74
50							1428	1,46

**Posizione 3**

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							2571	2,62
80							2285	2,34
70	4567,5+	1692,3-	15028000+	15028000	420000	2,79	2000	2,04
60	j93891	j77,74	j158540000				1714	1,74
50							1428	1,46

Con rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							2571	2,62
80							2285	2,34
70	j5412,7	j77,74	420760	420760	420000	99,82	2000	2,04
60							1714	1,74
50							1428	1,46

**Posizione 4**

Senza rifasamento

$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							2571	2,62
80							2285	2,34
70	9567,9+	3544,9-	67371000+	67371000	420000	0,62	2000	2,04
60	j205430	j162,84	j726690000				1714	1,74
50							1428	1,46

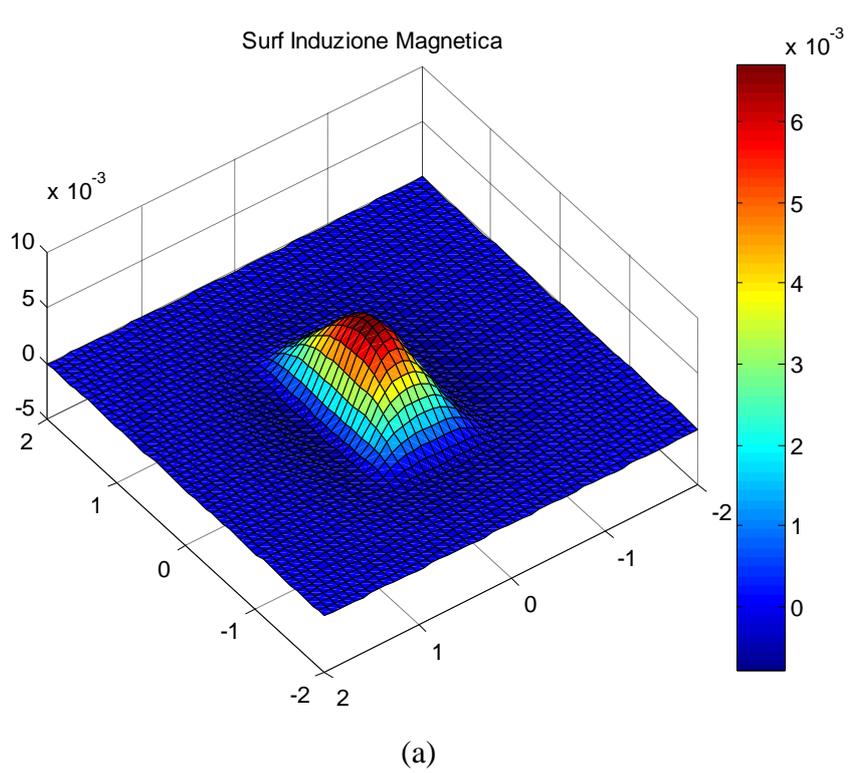
Con rifasamento

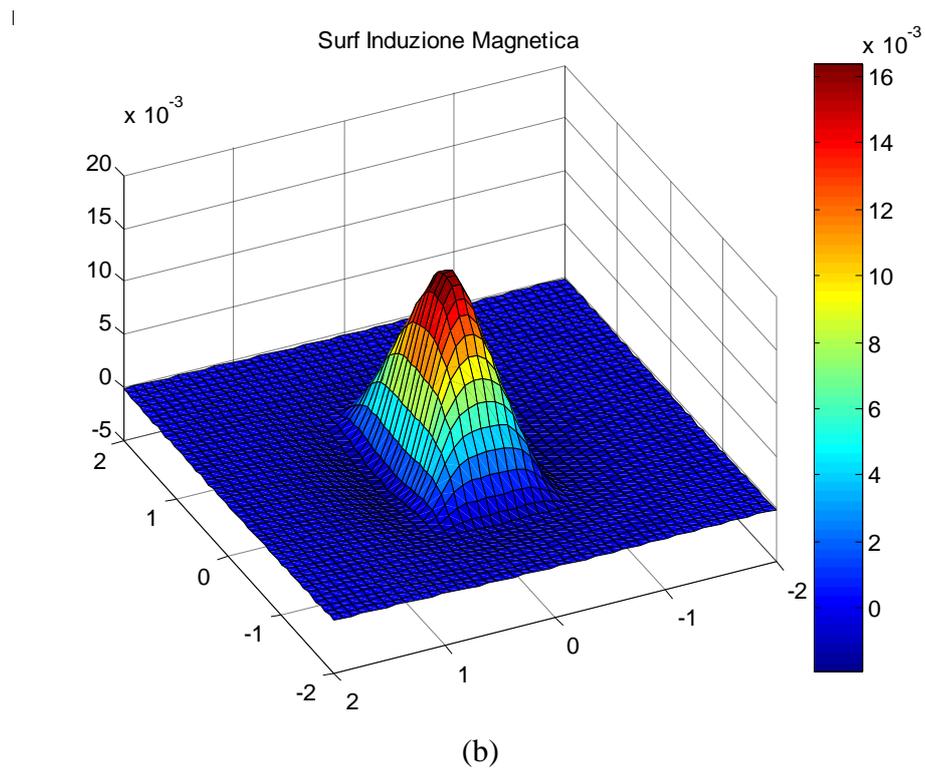
$V$ (km/h)	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$S_1$ (VA)	$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$\eta$ (%)	$N_{bobine}$	$Km$
90							2571	2,62
80							2285	2,34
70	j2584,3	j162,84	420840	420840	420000	99,80	2000	2,04
60							1714	1,74
50							1428	1,46

**5.2.3 Risultati in forma grafica**

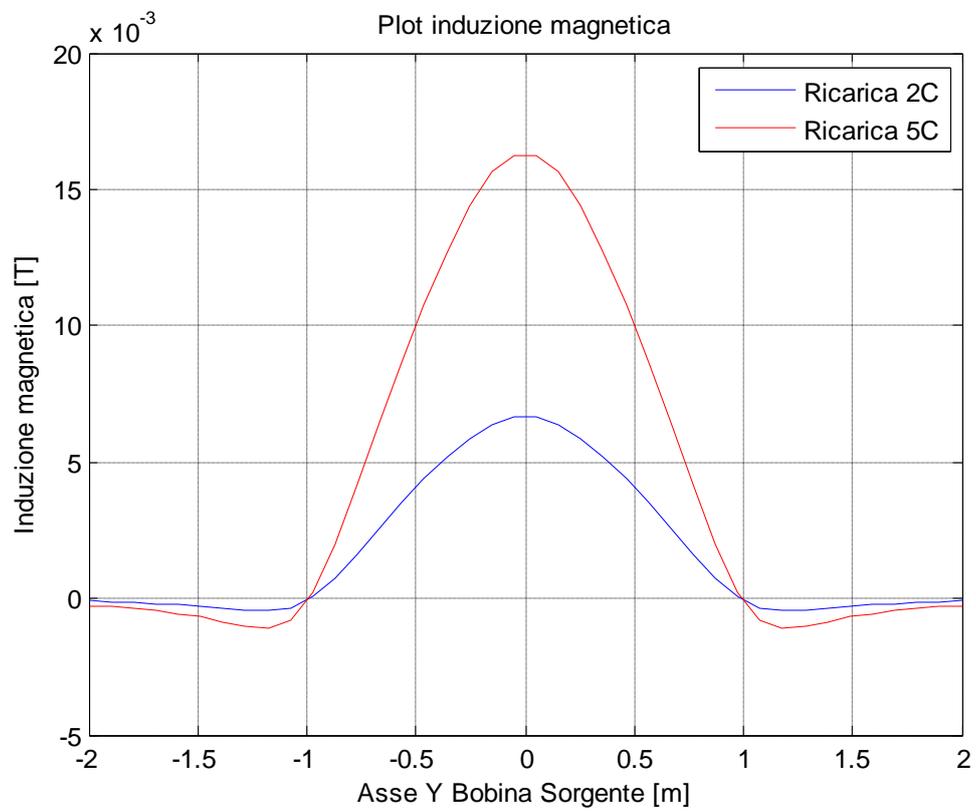
CAPITOLO 5. RISULTATI TESLA S

Ora si metter  a confronto la distribuzione di induzione magnetica nel caso di ricarica 2C e 5C senza rifasamento, nella posizione 1.





**Figura 45:** Distribuzione dell'induzione magnetica nel caso di ricarica 2C (a) e 5C (b) a 85 kHz.

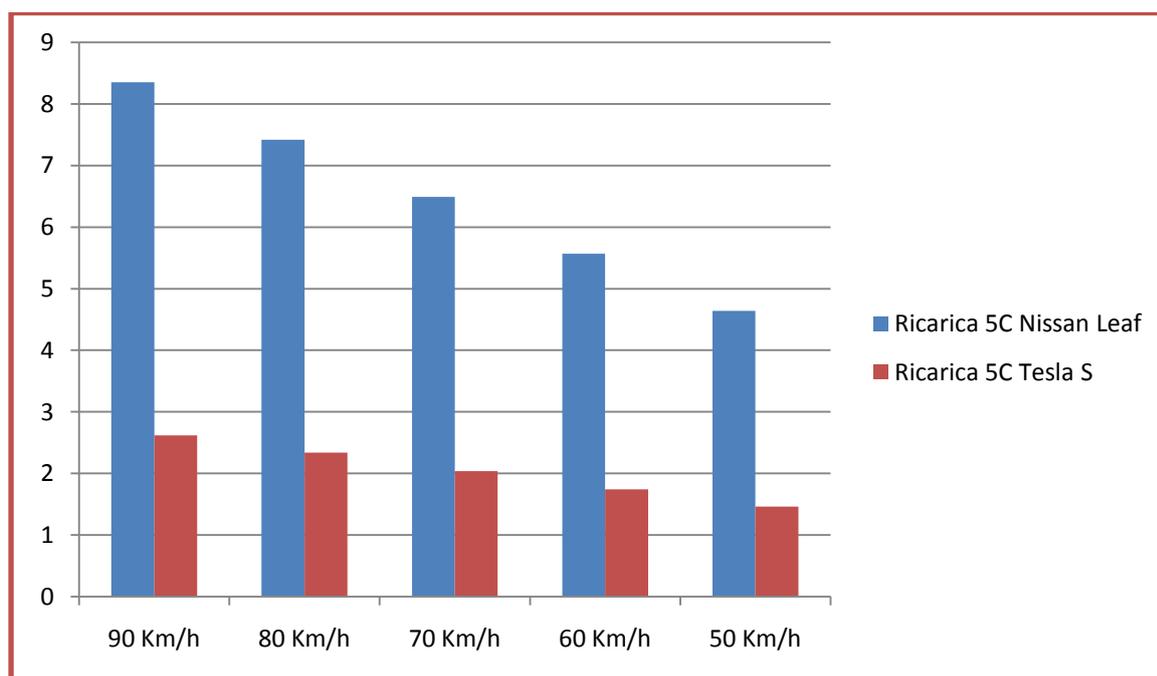


**Figura 46:** Plot induzione magnetica lungo l'asse Y della bobina sorgente a 85 kHz.

### 5.3 Analisi dei risultati

Come nel caso della *Nissan Leaf*, si nota che anche nel caso della ricarica della *Tesla S* i rendimenti sono bassi mentre, rifasando, diventano maggiori del 99%.

Grazie alla batteria con una capacità maggiore, possiamo dimensionare il sistema in modo da erogare una potenza maggiore al secondario, e questo ci permetterà di ridurre il numero di bobine necessario e quindi i chilometri necessari alla ricarica.



**Figura 47:** Confronto tra i chilometri necessari alla ricarica di 12 kWh della *Nissan Leaf* e *Tesla S*.

Come si vede nella figura precedente, se tutte le autovetture avessero le batterie della *Tesla S*, sarebbe possibile ridurre i chilometri necessari alla ricarica e quindi il sistema diventerebbe meno invasivo, economicamente vantaggioso e quindi più realizzabile.

Ovviamente avendo queste grandi potenze in gioco, bisognerà valutare molto attentamente il dimensionamento delle bobine e il calore che in esse si produrrà. Per quanto riguarda la bobina sorgente, il problema si potrebbe fronteggiare raffreddando la bobina a liquido mentre, non potendo fare questo alla sorgente, bisognerà studiare un'alternativa efficiente.

# Conclusioni

Nel primo capitolo, dopo aver spiegato la differenza tra la trasmissione di potenza wireless e quella tradizionale, si sono confrontate due diverse scuole di pensiero riguardo la modalità di risonanza in cui deve lavorare il sistema: lo *strong* e il *weak coupled regime*. Proseguendo sono stati analizzati alcuni sistemi ideati per la ricarica wireless dei veicoli elettrici e ibridi, enunciando le ipotesi per poi arrivare ai risultati dei test.

Nei capitoli seguenti, avendo enunciato le ipotesi e le assunzioni fatte nello studio, sono stati riportati i risultati della trasmissione wireless, per la ricarica parziale della batteria della *Nissan Leaf*, come il rendimento e la potenza al primario, avendo fissato la potenza all'arrivo. Lo scopo è stato di valutare se la trasmissione di potenza avesse un rendimento accettabile e quindi se il sistema fosse efficiente e quindi realizzabile. Anche se le norme impongono la frequenza di risonanza pari a  $85\text{ kHz}$ , si è valutato il comportamento del sistema alla frequenza di  $20$ ,  $85$  e  $140\text{ kHz}$ , in modo da vedere in che modo influisce la frequenza sul sistema. Quello che si nota è che all'aumentare della frequenza il rendimento cambia poco mentre si avrà un aumento notevole delle tensioni e una diminuzione delle correnti, circolanti nella bobina primaria, e quindi bisognerà porre molta attenzione al dimensionamento dei parametri in linea, come i condensatori.

Dallo studio analitico, si nota che i risultati, in caso di rifasamento sono molto incoraggianti, infatti si hanno rendimenti maggiori del  $99\%$ , anche se questo riguarda solo quello della trasmissione wireless, mentre se considerassimo anche le perdite nella batteria, nell'alimentatore e nei conduttori che collegano le bobine, alla fine si avrebbe un rendimento totale dell'  $75\%$  circa.

Oltre al rendimento, si è valutato quanti chilometri sarebbero necessari alla ricarica della batteria al variare della velocità dell'auto. Ovviamente quest'ultima dipenderà dal tipo di strada, infatti se l'auto si trovasse su una strada urbana o extraurbana si potrebbe imporre una velocità limite di  $50\text{ Km/h}$  in modo da limitare le dimensioni dell'impianto visto che, la velocità della ricarica è proporzionale alla velocità dell'auto.

Diversamente in autostrada la velocità limite dovrà essere maggiore come 70 o 80 Km/h e quindi si avrà bisogno di più bobine sorgenti e cioè più chilometri per la ricarica.

Un limite è imposto dalla batteria, che può essere ricaricata ad una tensione e corrente massima. Infatti, nel caso della *Nissan Leaf*, che ha una batteria con capacità di 66,2 Ah, potremmo ricaricarla al massimo a 400V - 330A. Nel caso si ricaricasse la *Tesla S* che ha una batteria con una capacità maggiore pari a 213,9 Ah, potremmo ricaricarla invece a 400V - 1050A e quindi, in questo modo, diminuirebbe notevolmente il tempo di ricarica e di conseguenza i chilometri necessari. Pensando al futuro, in cui sicuramente ci sarà uno sviluppo delle batterie, potremmo ricaricarle molto più velocemente, tenendo però conto dei limiti nella realizzazione delle bobine.

Essendo un sistema innovativo ancora in via di sviluppo, quello che è stato effettuato è uno studio analitico; a seguire servirà uno studio utilizzando un programma numerico agli elementi finiti per poi concludere il tutto realizzando un prototipo.

Quello che si può far notare è che, in futuro questo sistema sarà fondamentale per aumentare l'autonomia dei veicoli elettrici consentendo così una maggiore diffusione di quest'ultimi, che attualmente fanno fatica ad affermarsi, visto il loro costo elevato e la bassa autonomia.

# Ringraziamenti

Prima di tutto, un ringraziamento particolare va al Prof. Fabrizio Dughiero, che mi ha dato l'opportunità di lavorare su un argomento molto interessante, e che sarà fondamentale nel prossimo futuro.

Ringrazio anche l'Ing. Marco Bullo, l'Ing. Cristian Pozza e l'Ing. Manuele Bertoluzzo che mi hanno assistito nello studio del problema.

Una speciale menzione va alla mia famiglia, che mi ha assistito e motivato durante tutto il percorso di studi.



# Appendice A

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%% CALCOLO PARAMETRI TRASFERIMENTO WIRELESS CON RIFASAMENTO %%
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

mu=4*3.14*10^-7;
I1p=1;
I2p=1;
B12=0;
B1=0;
B2=0;

% frequenza di risonanza
f=85000;
w=2*pi*f;

% capacità della batteria in Wh
Batteria=12000;

% quota bobina ricevente
z=0.25;

% tensione e corrente ai capi della batteria
V2=400;
I2=125;

% velocità dell'auto in Km/h
Vauto=90;

% grandezza bobina su numero di spire
m=0.45/40;
n=0.2/25;

% coordinata per lo sfasamento tra bobina sorgente e ricevente
s=0.75;

% numero di fili litz costituenti il conduttore
Nfilil1=70;
Nfilil2=70;

dl1=0.001;
dS1=dl1*dl1;
dl2=0.001;
dS2=dl2*dl2;

% calcolo parametri della linea

for b=0.05:m:0.5
    a=2*b;

    for l=0.05:n:0.25
```

```

for x = s-1+(dl2/2) : dl2 : s+1-(dl2/2)

    for y = -1+(dl2/2) : dl2 : 1-(dl2/2)

        C(1,1)=a+x;
        C(2,1)=a-x;
        C(4,1)=-C(1,1);
        C(3,1)=-C(2,1);

        r(1,1)=sqrt((a+x)^2+(y+b)^2+z^2);
        r(2,1)=sqrt((a-x)^2+(y+b)^2+z^2);
        r(3,1)=sqrt((a-x)^2+(y-b)^2+z^2);
        r(4,1)=sqrt((a+x)^2+(y-b)^2+z^2);

        d(1,1)=y+b;
        d(3,1)=y-b;
        d(2,1)=d(1,1);
        d(4,1)=d(3,1);

        for i=1:1:4

            Bz12(i,1)=(mu*I1p)/(4*pi)*(((((-
            1)^i)*d(i,1))/(r(i,1)*(r(i,1)+(-
            1)^(i+1)*C(i,1))))-
            (C(i,1)/(r(i,1)*(r(i,1)+d(i,1)))));

            B12=B12+Bz12(i,1);

        end
    end
end
end
end

B12;
fil12=B12*dS2; % flusso concatenato bobina primaria su secondaria
M=fil12/I1p

for b=0.05:m:0.5
    a=2*b;

    for x = -a+(dl1/2) : dl1 : a-(dl1/2)

        for y = -b+(dl1/2) : dl1 : b-(dl1/2)

            C(1,1)=a+x;
            C(2,1)=a-x;
            C(4,1)=-C(1,1);
            C(3,1)=-C(2,1);

            r(1,1)=sqrt((a+x)^2+(y+b)^2);
            r(2,1)=sqrt((a-x)^2+(y+b)^2);
            r(3,1)=sqrt((a-x)^2+(y-b)^2);
            r(4,1)=sqrt((a+x)^2+(y-b)^2);

```

```

d(1,1)=y+b;
d(3,1)=y-b;
d(2,1)=d(1,1);
d(4,1)=d(3,1);

for i=1:1:4

    Bz1(i,1)=(mu*I1p)/(4*pi)*(((((-
    1)^i)*d(i,1))/(r(i,1)*(r(i,1)+
    (-1)^(i+1)*C(i,1))))-
    (C(i,1)/(r(i,1)*(r(i,1)+d(i,1)))));

    B1=B1+Bz1(i,1);

end
end
end
end

B1;
fil=B1*dS1;
L1=fil/I1p

for b=0.05:n:0.25
    a=b;

    for x = -a+(dl2/2) : dl2 : a-(dl2/2)

        for y = -b+(dl2/2) : dl2 : b-(dl2/2)

            C(1,1)=a+x;
            C(2,1)=a-x;
            C(4,1)=-C(1,1);
            C(3,1)=-C(2,1);

            r(1,1)=sqrt((a+x)^2+(y+b)^2);
            r(2,1)=sqrt((a-x)^2+(y+b)^2);
            r(3,1)=sqrt((a-x)^2+(y-b)^2);
            r(4,1)=sqrt((a+x)^2+(y-b)^2);

            d(1,1)=y+b;
            d(3,1)=y-b;
            d(2,1)=d(1,1);
            d(4,1)=d(3,1);

            for i=1:1:4

                Bz2(i,1)=(mu*I2p)/(4*pi)*(((((-
                1)^i)*d(i,1))/(r(i,1)*(r(i,1)+
                (-1)^(i+1)*C(i,1))))-
                (C(i,1)/(r(i,1)*(r(i,1)+d(i,1)))));

                B2=B2+Bz2(i,1);

            end
        end
    end
end
end

```

```

end
end

B2;
fi2=B2*dS2;
L2=fi2/I2p

% coefficiente di accoppiamento tra le due bobine
K=(M/(sqrt(L1*L2)))

% numero di spire bobina sorgente e ricevente
N1=(0.45/m);
N2=(0.2/n);

R1sing=(3.5)*N1*(0.10617);
R2sing=(1.5)*N2*(0.10617);

% resistenza bobina sorgente e ricevente
R1=1.06*1.02*(1/((1/R1sing)*Nfili1))
R2=1.06*1.02*(1/((1/R2sing)*Nfili2))
R=V2/I2;

% condensatori per rifasamento
C1=1/(w^2*L1);
C2=1/(w^2*L2);

% impedenza al primario e al secondario
Z1=R1+j*(w*L1-1/(w*C1))
Z2=(R2+R)+j*(w*L2-1/(w*C2))

% tensione e corrente della bobina sorgente
V1=((Z1*Z2+w^2*M^2)*(-I2))/(j*w*M)
I1=(V1*Z2)/(Z1*Z2+w^2*M^2)

% modulo della tensione e della corrente della bobina sorgente
V1modulo=abs(V1)
I1modulo=abs(I1)

% potenza apparente bobina sorgente
S1=V1*I1

% potenza attiva della bobina sorgente e ricevente
P1=abs(real(S1))
P2=V2*I2

% rendimento del trasferimento wireless
Rendimento=abs(((R/Z2)*((w^2*M^2)/(w^2*M^2+Z1*Z2))))*100)

% velocità dell'auto in m/s
V=Vauto/3.6;

% tempo in cui l'auto rimane sopra la bobina
t=1/V;

% energia trasmessa alla batteria in kWh
W=P2*(t/3600)

```

```
% numero di bobine necessarie per la ricarica  
N=Batteria/W
```

```
% chilometri necessari alla ricarica  
Km= (N*1.02) /1000
```



# Appendice B

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%% CALCOLO PARAMETRI TRASFERIMENTO WIRELESS SENZA RIFASAMENTO %%
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% trovo L1,L2,M utilizzinado il programma nell'Appendice A

% coefficiente di accoppiamento tra le due bobine
K=(M/(sqrt(L1*L2)))

% numero di spire bobina sorgente e ricevente
N1=(0.45/m);
N2=(0.2/n);

R1sing=(3.5)*N1*(0.10617);
R2sing=(1.5)*N2*(0.10617);

% resistenza bobina sorgente e ricevente
R1=1.06*1.02*(1/((1/R1sing)*Nfili1))
R2=1.06*1.02*(1/((1/R2sing)*Nfili2))
Rbatt=V2/I2;

% tensione e corrente della bobina sorgente
I1=(-(R2+Rbatt+j*w*L2)/(j*w*M))*I2
V1=(R1+j*w*L1)*I1+j*w*M*I2

% modulo della tensione e della corrente della bobina sorgente
V1mod=abs(V1)
I1mod=abs(I1)

% potenza apparente bobina sorgente
S1=V1*I1

% potenza attiva della bobina sorgente e ricevente
P1=real(S1)
P2=Rbatt*((abs(I2))^2)

% rendimento del trasferimento wireless
rendimento=(P2/P1)*100

% velocità dell'auto in m/s
V=Vauto/3.6;

% tempo in cui l'auto rimane nella bobina
t=1/V;

% energia trasmessa alla batteria in kWh
W=P2*(t/3600)

% numero di bobine necessarie alla ricarica
```

$N = \text{Batteria} / W$

% chilometri necessari per la ricarica

$Km = (N * 1.02) / 1000$

# Appendice C

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%% PROGRAMMA PER GRAFICO INDUZIONE MAGNETICA %%
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

mu=4*3.14*10^-7;

% frequenza di risonanza
f=85000;

% corrente circolante nella bobina sorgente sorgente nel caso 2C e 5C
I1=73;
I2=203;

% distanza tra le due bobine
z=0.25;

% spire bobina sorgente
a=linspace(0.1,1,35);
b=a/2;

% superficie di calcolo induzione magnetica
X=linspace(-2,2,40);
Y=linspace(-2,2,40);

B_pse1=zeros(numel(X),numel(Y));
B_pse2=zeros(numel(X),numel(Y));

for N=1:numel(a)

    for m=1:numel(X)

        for k=1:numel(Y)

            C(1)=a(N)+X(m);
            C(2)=a(N)-X(m);
            C(4)=-C(1);
            C(3)=-C(2);

            r(1)=sqrt((a(N)+X(m))^2+(Y(k)+b(N))^2+z^2);
            r(2)=sqrt((a(N)-X(m))^2+(Y(k)+b(N))^2+z^2);
            r(3)=sqrt((a(N)-X(m))^2+(Y(k)-b(N))^2+z^2);
            r(4)=sqrt((a(N)+X(m))^2+(Y(k)-b(N))^2+z^2);

            d(1)=Y(k)+b(N);
            d(3)=Y(k)-b(N);
            d(2)=d(1);
            d(4)=d(3);

            Bztot=0;
```

```

for i=1:1:4

    Bz(i)=(mu*I1)/(4*pi))*(((((-
    1)^(i))*d(i))/(r(i)*(r(i)+(-1)^(i+1)*C(i))))-
    (C(i)/(r(i)*(r(i)+d(i)))));

    Bztot=Bztot+Bz(i);

end

Bzz(k,m)=Bztot;

end

end

B_psel=B_psel+Bzz;

end

for N=1:numel(a)

    for m=1:numel(X)

        for k=1:numel(Y)

            C(1)=a(N)+X(m);
            C(2)=a(N)-X(m);
            C(4)=-C(1);
            C(3)=-C(2);

            r(1)=sqrt((a(N)+X(m))^2+(Y(k)+b(N))^2+z^2);
            r(2)=sqrt((a(N)-X(m))^2+(Y(k)+b(N))^2+z^2);
            r(3)=sqrt((a(N)-X(m))^2+(Y(k)-b(N))^2+z^2);
            r(4)=sqrt((a(N)+X(m))^2+(Y(k)-b(N))^2+z^2);

            d(1)=Y(k)+b(N);
            d(3)=Y(k)-b(N);
            d(2)=d(1);
            d(4)=d(3);

            Bztot=0;

            for i=1:1:4

                Bz(i)=(mu*I1)/(4*pi))*(((((-
                1)^(i))*d(i))/(r(i)*(r(i)+(-1)^(i+1)*C(i))))-
                (C(i)/(r(i)*(r(i)+d(i)))));

                Bztot=Bztot+Bz(i);

            end

            Bzz(k,m)=Bztot;

        end

    end

end

```

```

        end
    end

    B_pse2=B_pse2+Bzz;

end

figure(1)
surf(X,Y,B_pse)
title('Surf Induzione Magnetica')

figure(2);
plot(Y,B_pse1(20,:), 'b')
hold on;grid on;
plot(Y,B_pse2(20,:), 'r')
title('Plot induzione magnetica')
legend('Ricarica 2C', 'Ricarica 5C')

```



# Bibliografia

- [1] S. L. Ho et al., *A Comparative Study Between Novel Witricity and Traditional Inductive Magnetic Coupling in Wireless Charging*, IEEE transactions on magnetic, Vol.47,NO.5,MAY 2011, 1522-1525.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [2] A.Kurs, *Power Transfer Through Strongly Coupled Resonances*, Massachusetts Institute of Technology,2007.
- [3] A.Kurs, A.Karalis, M.Soljagic et al., *Wireless Power transfer via Strongly Coupled Magnetic resonance*, in Science 317, 2007, 83-86.  
<http://www.sciencemag.org/>
- [4] J.O. Mur-Miranda et al., *Wireless Power Transfer using Weakly Coupled Magnetostatic Resonator*, in Energy Conversion Congress and Exposition IEEE, 2010, 4179-4186.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [5] Y. Hori, *Application of Electric Motor, Supercapacitor, and Wireless Power Transfer to Enhance Operation of Future Vehicles*, in International Symposium on Industrial Electronics IEEE, 2010, 3633-3635.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [6] A.O. Di Tommaso et al., *A Small Power Transmission Prototype for Electric Vehicle Wireless Battery Charge Applications*, in International Conference on Renewable Energy Research and Applications IEEE, 2012, 1-6.  
<http://www.ieeeexplore.org/>

- [7] C. Panchal et al., *Investigation of Flux Leakages and EMC Problems in Wireless Charging*, in Applied Power Electronics Conference and Exposition IEEE, 2013, 3073-3080.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [8] O.C. Onar et al., *A Novel Wireless Power Transfer for In-Motion EV/PHEV Charging Systems for EV and Other Mobile Applications*, in Conference on Environmental Electromagnetics IEEE, 2011, 301-304.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [9] Y.D. Ko et al., *Mathematical Modeling and Optimization of the automated Wireless Charging Electric Transportation System*, in International Conference on Automation Science and Engineering IEEE, 2012, 250-255.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [10] U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency & Renewable Energy, Nissan Leaf Advanced Vehicle Testing*, 2011.  
[http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/pdfs/fsev/battery\\_leaf\\_0356.pdf](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/pdfs/fsev/battery_leaf_0356.pdf)
- [11] Martin Misakian, *Equations for the Magnetic Field Produced by One or More Rectangular Loops of Wire in the Same Plane*, National Institute of Standards and Technology, 2000.  
<http://www.nist.gov/jres>
- [12] M.Bertoluzzo, G.Buia et al., *Preliminary investigation on Contactless Energy Transfer for electric vehicle battery recharging*, IEEE, 2012.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [13] M.Bertoluzzo, G.Buia et al., *Design of Contactless Battery Charger for electric vehicle*, IEEE, 2012.  
<http://www.ieeeexplore.org/>

- [14] M. Guarnieri, Gaetano Malesani, *Elementi di Elettrotecnica - Elettromagnetismo stazionario e quasi-stazionario*, 1999, Edizioni Progetto Padova.
- [15] P.Mazzoldi, M.Nigro, C.Voci, *Elementi di Fisica – Elettromagnetismo*, 2005, EdiSES edizioni.
- [16] Young Jae Jang & Young Dae Ko, *System Architecture and Mathematical Model of Public Transportation System Utilizing Wireless Charging Electric Vehicles*, IEEE, 2012, 1055-1060.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [17] Jin Huh et al., *High Performance Inductive Power Transfer System with Narrow rail Width for On-Line Electric Vehicles*, IEEE, 2010, 647-651.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [18] Boyune Song et al., *Design of a High Power Transfer Pickup for On-Line Electric Vehicle (OLEV)*, IEEE.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [19] Zhen Ning Low et al., *Design and Test of High-Power High-Efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System*, IEEE, 2009.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [20] Seungyoung Ahn and Joungho Kim, *Magnetic Field Design for High Efficient and Low EMF Wireless Power Transfer in On-Line Electric Vehicle*, IEEE, 2011.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [21] Ricardo Matias et al., *Modeling Inductive Coupling for Wireless Power Transfer to Integrated Circuits*, IEEE, 2013, 198-201.  
<http://www.ieeeexplore.org/>

- [22] Hongseok Kim et al., *Shielded Coil Structure Suppressing Leakage Magnetic Field from 100W-Class Wireless Power Transfer System with Higher Efficiency*, IEEE, 2012, 83-86.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [23] Hongchang Li et al., *Study on Efficiency Maximization Design Principles for Wireless Power Transfer System Using Magnetic Resonant Coupling*, IEEE, 2013, 888-892.  
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [24] Keywolf, Keywolf will relaunch April 2014.  
[http://www.keywolf.com/American\\_Wire\\_Gauge.php](http://www.keywolf.com/American_Wire_Gauge.php)
- [25] Elektrisola, Enemelled copper wire.  
<http://www.elektrisola.com/en/litz-wire.html>
- [26] Tesla, Model S & Supercharger  
<http://www.teslamotors.com/models>

