POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione Elettromagnetica del Fissatore Interno Dinamico a Sbloccaggio Wireless (Wireless Dynamic Plate)



Relatore:

Prof. Alberto Audenino

Co-relatore:

Prof. Cristina Bignardi

Candidato:

Loris Zilio

Matricola:

s265226

Anno Accademico 2020/2021

Ai miei Nonni,

Bruno e Maria, Gino e Adriana

e a Jack

<u>Sommario</u>

SOMMARIO	1
ABSTRACT	3
Stato dell'arte	4
1. INTRODUZIONE	5
1.1 Biomeccanica di Placche e Viti	9
2. PROGETTAZIONE ELETTROMAGNETICA	11
2.1 Aspetti Teorici del circuito Trasmettitore-Ricevitore	11
2.2.1 Composizione fisica delle Bobine	20
2.2 Design Computazionale di Bobine Rettangolari Trasmettitore-Ricevitore	23
2.2.1 Design input	30
2.2.2 Calcolo Analitico Vs Numerico	31
2.2.3 Elaborazione dei risultati Matlab	36
2.2.4 Dati di Input FEMM	46
2.2.5 Elaborazione Risultati FEMM	47
2.3 Risultati Design Computazionale	51
3. PROVE SPERIMENTALI	52
3.1 Componenti sperimentali utilizzati	52
3.2 Prova sperimentale di bobine Rettangolari Trasmettitore-Ricevitore	60
3.2.1 Bobine a Contatto	60
Riepilogo fasi bobine a contatto	71
3.3 Bobine a diverse distanze	73
3.3.1 Bobine a 1 Centimetro di distanza	73

	Riepilogo delle grandezze di bobine a 1 Cm di distanza	77
	3.3.2 Bobine a 2 Centimetri di distanza	77
	Riepilogo delle grandezze di bobine a 2 Cm di distanza	82
	3.3.3 Bobine a 3 Centimetri di distanza	82
3.	4 Risultati Prove Sperimentali	84
4	. CONCLUSIONI	85
B	IBLIOGRAFIA	89
S	ITOGRAFIA	91

ABSTRACT

Lo scopo della tesi è la progettazione elettromeccanica del dispositivo medico chiamato Wireless Dynamic Plate, innovativo per quanto concerne il trattamento di casi complessi di fratture di ossa lunghe come Tibia e Femore, che rappresentano il 28,5% delle fratture totali e solo negli USA sono stati registrati 300.000 casi in un anno. Il principale obiettivo è quindi quello di assicurare un supporto stabile durante la fase di guarigione dell'osso e permettere al paziente di camminare il prima possibile. L'effetto della dinamizzazione sulla guarigione dell'osso fa sì che in una prima fase sia stimolata la proliferazione del callo osseo, mentre nella seconda sia accelerata la risposta di rimodellamento e di ipertrofia delle cellule ossee normali in fase avanzata di guarigione. Il blocco che impedisce lo scorrimento reciproco delle due componenti (Guida e Placca) può essere disattivato con un semplice intervento ambulatoriale, evitandone così uno chirurgico intermedio fra l'istallazione e la rimozione del fissatore interno in modo da consentire una guarigione in tempi ridotti.



Figura 0.1 Wireless Dynamic Plate

Il progetto Wireless Dynamic Plate è stato avviato a partire dal 22 dicembre 2017 in una collaborazione con il Politecnico di Torino e Intrauma S.p.A., azienda presso cui svolsi il tirocinio curricolare con sede a Rivoli (TO) che inventa, produce e commercializza dispositivi medici per la traumatologia ortopedica. Una delle principali attività di interesse dell'azienda è la ricerca e lo sviluppo di tecnologie innovative e avanzate proprio come l'oggetto di studio in questione. Intrauma non solo è un'eccellenza italiana, ma anche una solida realtà nel mercato internazionale, e fra tutto può anche vantare del sistema O'nil concepito e brevettato nel 2006 da Nilli Del Medico, Fondatore dell'azienda. Questa tecnologia, a prima vista può ricordare a livello morfologico una placca tradizionale, ma osservandola più nel dettaglio si può notare che il fissaggio della placca sull'osso è garantito dalla solidarizzazione tra viti di tipo autobloccanti. Tecnologia sfruttata anche nel W.D. Plate, in questo modo ci si avvale infatti di un ottimo accoppiamento tra la testa della vite ed il foro conico della bussola O'nil, cosa che permette di avere meno problemi da parte del medico chirurgo nel momento in cui si prevede la rimozione del dispositivo medico.

Stato dell'arte

Le fratture degli arti inferiori sono generalmente la conseguenza di traumi ad alta energia, lo scopo principale di un dispositivo medico è quello di garantire un sostegno stabile all'osso in fase di guarigione per permettere la deambulazione del paziente il prima possibile. Il successo dell'impianto dipende da numerose variabili, tra cui la qualità dell'osso, la tipologia di frattura e la riduzione intraoperatoria della frattura. Ruolo importante, però, è assunto dalla selezione dell'impianto, in quanto la sintesi della frattura deve garantire un buon compromesso tra la rigidezza del sistema di fissazione e la condivisione del carico tra l'impianto e l'osso fratturato. Quest'ultima può essere ottenuta grazie all'utilizzo di impianti dinamici che, grazie allo scorrimento relativo tra un supporto anatomico ed una guida di scorrimento, garantiscono una compressione dinamica della rima di frattura ed un graduale trasferimento del carico dall'impianto all'osso, favorendo in tal modo l'importante processo di maturazione del callo osseo, fattore indispensabile per anticipare i tempi di degenza e arrivare senza complicanze ad una guarigione completa della frattura stessa. Vincolo per il trasferimento del carico all'osso è, però, l'avvenuto avvio del consolidamento della frattura, il quale è strettamente correlato all'iniziale stabilizzazione della stessa, che deve perdurare per le prime fasi di guarigione. Questa necessità accresce quindi l'interesse nei confronti di sistemi dinamici che si comportano come elementi di fissazione rigida nelle prime fasi di guarigione e successivamente permettono la mobilità dell'impianto per il successivo trasferimento del carico all'osso.

L'analisi dello stato dell'arte e l'analisi di mercato hanno permesso l'identificazione di diverse soluzioni di dinamizzazione già presenti sul mercato o esplorate in letteratura. In particolare, a partire dagli anni 2000 sono stati immessi sul mercato sistemi di fissazione interna con vite-placca a stabilità angolare, che generando un ponte tra la zona a monte e a valle della frattura, si comportano come fissatori esterni. Possedendo una flessibilità propria, questi impianti possono garantire dei micromovimenti sia nella zona distale che assiale della placca, sebbene essi possano al contempo generare degli sforzi di taglio a livello della rima di frattura, non benevoli in quanto responsabili dell'allungamento temporale del processo di guarigione. Sono state perciò investigate differenti strategie di dinamizzazione dell'impianto che prevedano l'utilizzo di una placca a stabilità angolare inizialmente rigida, ma con la possibilità di essere resa dinamica, grazie allo sblocco di uno dei suoi gradi di libertà, generalmente quello assiale. Tale dinamizzazione avviene di solito in maniera manuale mediante un ulteriore intervento chirurgico e può spesso comportare delle complicanze al paziente. Nel sistema oggetto dello studio la dinamizzazione avviene invece in modalità assolutamente non invasiva, sfruttando le potenzialità del sistema di blocco/sblocco elettromeccanico installato all'interno dell'impianto e attivabile in modalità wireless agendo durante una seduta ambulatoriale.

1. INTRODUZIONE

Il progetto W.D. Plate si pone come principale obiettivo il trattamento di gravi fratture su pazienti politraumatizzati, con una o più lesioni, eventualmente con potenziale compromissione delle funzioni vitali o con importanti ritardi nella consolidazione ossea. Diviene così possibile la gestione di un percorso di guarigione delle fratture attraverso un'innovativa modalità di dinamizzazione del dispositivo medico.

Tale sistema consente infatti di impiantare il fissatore interno, inizialmente in modalità statica, per poi prevedere un successivo sbloccaggio in modalità non invasiva, garantito da un sistema wireless, riutilizzabile in caso di bisogno su altri dispositivi. In questo modo si può rendere reciprocamente scorrevoli le due componenti del supporto (Placca e Guida) senza alcun intervento chirurgico e assicurando pertanto una precoce guarigione. Nell'immagine 1.1 si può osservare che il corpo principale contiene sia l'alloggiamento per l'azionamento del sistema di dinamizzazione della placca, che viene fissata all'osso mediante viti a stabilità angolare, sia il sistema di blocco/sblocco.



Figura 1.1 Design del Wireless Dynamic Plate. Dettaglio delle parti principali e dei componenti elettrici interni.

Le placche dinamizzabili disponibili al giorno d'oggi in commercio si basano o su un accoppiamento flessibile tra viti e placca, oppure sfruttano lo scorrimento di viti in fori/asole, o come nel nostro caso utilizzano una guida mobile per lo scorrimento. Purtroppo, tale dinamizzazione avviene ancora in maniera manuale mediante un apposito intervento chirurgico che potrebbe anche implicare complicanze al paziente. Il progetto W.D. Plate si è posto come obiettivo la creazione di una placca sbloccabile in modo controllato e non invasivo, sfruttando alcuni sistemi elettromeccanici attivabili in modalità wireless.

Sarà dunque possibile trattare anche i casi più complessi, con notevoli problemi agli arti inferiori, evitando un intervento chirurgico intermedio apposta per lo sbloccaggio. Ne gioverebbe così anche il sistema sanitario dal momento che ci sarebbero vantaggiose ripercussioni economiche, in quanto il sistema di attuazione potrebbe essere sfruttato anche per altre applicazioni complementari.

La sintesi della frattura deve garantire un buon compromesso fra la rigidezza del sistema di fissazione e la condivisione del carico tra l'impianto e l'osso fratturato. Quest'ultima può essere ottenuta grazie all'utilizzo di impianti che garantiscono una compressione dinamica della frattura ed un graduale trasferimento del carico dall'impianto all'osso, favorendo in tal modo il processo di maturazione del callo osseo, fattore indispensabile per arrivare senza complicanze ad una guarigione completa.

Per il W.D. Plate, in primis è stata elaborata un'analisi preliminare di mercato e dello stato dell'arte, al fine di stabilire le caratteristiche geometriche e dei materiali, dopodiché il progetto è stato suddiviso in due filoni paralleli di progettazione. La prima di natura strutturale-meccanica, mentre la seconda di natura elettromagnetica al fine di sviluppare l'attuazione wireless. C'è stata una fase di design computazionale, che attraverso il Software Matlab e FEMM, ha permesso di avere un riferimento sulle bobine da utilizzare e provare sperimentalmente sul fissatore dinamico, in realtà poi alcune grandezze ricavate sperimentalmente sono state utili per il design computazionale e viceversa.



Figura 1.2 Disegno del fissatore dinamico con indicate le principali quote.

La guida (a coda di rondine) è anch'essa fissata all'osso e permette al corpo principale di scorrere in una predeterminata corsa limitata; in questa fase è stato essenziale lo studio della performance meccanica del dispositivo, Per quanto riguarda invece lo studio del meccanismo di sblocco, osservabile in figura 1.3, è stata realizzata la modellazione attraverso il Software Multibody.



Figura 1.3 Particolare del meccanismo di sblocco del perno con Multibody

Si nota come venga mantenuta la solidità iniziale fra la Placca e la Guida, ovvero tramite un pin cilindrico (in azzurro) che blocca lo scorrimento assiale, sul quale può invece scorrere un cuneo inclinato, il quale accompagna la discesa del pin verso l'interno della placca, spinto da una molla calibrata. La progettazione wireless è stata sviluppata in stretta connessione con la progettazione della componente strutturale e del meccanismo di sblocco, perché in termini di potenza trasmessa e di prestazioni del motore risultano strettamente legati alle resistenze del meccanismo di sblocco.



Figura 1.4 Dettaglio del meccanismo di blocco/sblocco in configurazione bloccata e sbloccata.



Figura 1.5 Particolare del meccanismo di sblocco del Pin con Solidworks

Grazie al modello numerico Multibody, che ha portato all'ottimizzazione sia della forza esercitata dalla molla sia dell'inclinazione del piano inclinato, è stato possibile minimizzare la totalità delle forze in gioco riducendo così al minimo la potenza da trasmettere, in modalità wireless, al dispositivo. In particolare, il sistema di attuazione è costituito da un micromotore a corrente continua, integrato da un meccanismo di riduzione che garantisce una coppia sufficiente alla movimentazione del piano inclinato. L'alimentazione wireless del motore è ottenuta mediante l'accoppiamento induttivo tra due bobine appositamente studiate per il progetto, le quali sono rispettivamente poste all'interno di un circuito di trasmissione e ricevitore. Nel primo viene fatta scorrere una corrente elettrica che genera un campo magnetico indotto di intensità proporzionale alla corrente. Questo permette l'attuazione dall'esterno del sistema verso il fissatore dinamico, mediante l'apposizione della bobina del circuito induttore in corrispondenza della bobina del circuito indotto. Ciò facendo consente di evitare la presenza di una batteria all'interno della placca, come inizialmente previsto dal progetto, con notevoli ricadute positive sia dal punto di vista della sicurezza del paziente, aumentata per l'assenza di materiali/sostanze potenzialmente pericolose, sia dal punto di vista economico. Infatti, il sistema di attuazione è progettato in modo che la sua funzione rimanga inalterata anche dopo essere già stato utilizzato, la presenza di una batteria da ricaricare o sostituire renderebbe invece inutilizzabile in tempi rapidi l'intero sistema. Al contrario una volta disassemblato dal fissatore, può essere rapidamente riassemblato in una nuova scocca di contenimento.



Figura 1.6 Dettaglio dei carichi applicati: (punto A) vincolo ad incastro (6 DOF); (punto B–C) momento flettente opposto applicato ai due nodi principali dei giunti cinematici rigidi (RBE2).

Intrauma ha provveduto alla realizzazione delle componenti metalliche del Fissatore, oltre alle viti e alle bussole O'nil preassemblate, necessarie per l'interfaccia con l'osso e W.D. Plate. I materiali utilizzati, partendo da semilavorati, sono stati l'acciaio AISI 316 LVM (Rif. Norma ISO 5832-1) e il Titanio legato con l'Alluminio e il Vanadio (Rif. Norma ISO 5832-3). I vari componenti sono stati realizzati con l'utilizzo dei macchinari CNC presenti nelle officine dei partner, che sono certificati e garantiscono la rispondenza ai Requisiti generali di Sicurezza e Prestazione, in ottica di possibile ottenimento della Marcatura CE e immissione in commercio del fissatore interno dinamico in accordo alla Normativa Vigente in Europa (Regolamento Dispositivi Medici 2017/745).

1.1 Biomeccanica di Placche e Viti

La funzione e il design delle placche e delle viti di un dispositivo medico impiantabile dipendono dal requisito di stabilità della frattura considerata. Il sistema placca-viti è posizionato sopra la frattura, così da condividere con l'osso il carico portante del paziente. Si comporta in modo tale da neutralizzare gli effetti di taglio, rotazionali e delle forze assiali sul luogo di frattura. Questa tecnica è utilizzata per il trattamento di varie fratture degli arti.

La stabilità è un concetto cruciale per la pratica chirurgica delle fratture. Salendo su una scala a maggior stabilità troviamo: i tutori, i gessi, dispositivi endomidollari, fissatori esterni e placca a compressione. La stabilità determina la quantità di deformazione sul luogo della frattura, e la deformazione determina il tipo di guarigione che occorre all'osso:



Figura 1.1.1 A) La stabilità assoluta crea un ambiente a bassa sollecitazione favorevole alla guarigione ossea primaria. B) Guarigione ossea primaria C) Le condizioni di elevata deformazione creano una situazione in cui l'allungamento del gap può portare alla rottura delle cellule e alla cessazione della guarigione.

La guarigione ossea primaria avviene quando abbiamo un allungamento che si mantiene al di sotto del 2%; la secondaria tra il 2% e il 10% e non può risanarsi se supera il 10%. L'allungamento è definito come la differenza relativa in rapporto al gap di frattura:

Fracture Gap Strain =
$$\frac{\Delta L}{L}$$

La guarigione ossea primaria si verifica in condizioni di stabilità assoluta sul sito di frattura, occorre quindi che la movimentazione sia ridotta al minimo e che la deformazione sia inferiore al 2%. Una placca di compressione o neutralizzazione garantisce una fissazione rigida e riduce al minimo la deformazione, così che la lunghezza del gap di frattura possa scendere fino zero. Se però siamo in una situazione di gap molto elevato e il ΔL persiste, allora i metodi di fissazione richiederanno che le piastre siano posizionate sul lato in tensione della frattura in modo che sia assicurata la compressione della frattura e si eviti un movimento eccessivo del gap.

La guarigione ossea secondaria si verifica quando la deformazione è mantenuta tra il 2% e il 10% ed è caratterizzata dalla formazione del callo osseo. La vera e propria strada che

porta alla guarigione inizia con la formazione di un ematoma, seguito poi da un'infiammazione e dalla formazione del tessuto fibroso tramite cellule staminali mesenchimali che si vanno a differenziare per formare nuova cartilagine che sarà infine responsabile dell'ossificazione. Ognuna di queste fasi riduce il movimento in corrispondenza del gap di frattura, e quindi la deformazione del gap, creando perciò un ambiente favorevole alla formazione ossea. Questa differenziazione dei tessuti si traduce in siti che diventano progressivamente meno labili fino alla formazione del materiale più rigido: l'osso corticale. La stabilità relativa e la guarigione ossea secondaria sono lo scopo della recente ricerca di nuove tecniche di fissazione biologica, come il W.D. Plate.

2. PROGETTAZIONE ELETTROMAGNETICA

2.1 Aspetti Teorici del circuito Trasmettitore-Ricevitore

L'utilizzo dei campi elettromagnetici come fonte di energia elettrica risale alla fine dell'Ottocento, ma solo di recente la trasmissione di energia senza fili si è imposta come la tecnologia abilitante per lo sviluppo di sistemi energeticamente autonomi, ossia sistemi privi di batterie o senza necessità di collegamento diretto alla rete elettrica. I vantaggi associati all'autonomia energetica sono evidenti in tutte quelle applicazioni in cui il dispositivo in questione non è facilmente accessibile. Inoltre, non si riscontrano effetti negativi su oggetti o esseri viventi nel suo campo d'azione, applicazione ideale per il nostro caso di studio dato che il dispositivo viene impiantato all'interno del paziente e quindi di difficile collegamento. Al fine di azionare il sistema blocco/sblocco, ci si avvale di due bobine, una esterna e una interna, che chiameremo rispettivamente Trasmettitore e Ricevitore. La loro funzione è quella di trasferire la potenza necessaria per alimentare il motorino elettrico all'interno della placca dinamizzabile.

L'esempio più comune dell'uso di questa tecnologia è la ricarica delle batterie di smartphone, smartwatch e veicoli elettrici. Proprio questo è stato il punto di partenza teorico per lo studio di progetto del trasferimento di energia sottoforma di potenza elettromagnetica.



Figura 2.1.1 Schema di Ricarica Wireless di un Veicolo Elettrico

La categoria che bene evidenzia i vantaggi di un'alimentazione wireless è chiaramente quella dei dispositivi impiantabili della Bioingegneria. Ad oggi l'alimentazione di molti dispositivi viene garantita per mezzo di batterie impiantate, ad esempio nel caso del pacemaker, dove la periodicità degli interventi di manutenzione/sostituzione è di circa cinque anni, oppure per mezzo di connessione fisica a sorgente esterna. In quest'ultimo caso la situazione è ancora più pericolosa per problemi di infezioni ed enormi limitazioni motorie del paziente. Da questi semplici esempi si comprende quanto sia importante concentrare gli sforzi della ricerca su dispositivi che trasmettono energia wireless visti i notevoli vantaggi in termini di qualità della vita che questa tecnologia porterebbe.

Il fattore chiave nella trasmissione wireless è l'efficienza: questa risulta percentualmente migliore quando i due corpi vibrano alla stessa frequenza. Alla base di ciò, si sviluppa il concetto della legge della mutua-induzione e della risonanza. Ci sono due tipi di accoppiamento induttivo: risonante e standard.

Il primo offre una maggiore efficienza a distanze relativamente lunghe, dato che si riducono le perdite di energia consente una potenza più elevata da una bobina all'altra. Qui si sfrutta la propagazione delle onde elettromagnetiche mediante l'utilizzo di un'antenna (Far-field Communication).

Il secondo generalmente è praticabile ad una distanza di comunicazione relativamente breve, in quanto la maggior parte del flusso magnetico decade velocemente e si disperde in flussi dispersi.

Il principio è quello dell'accoppiamento mediante induzione magnetica tra due risonatori (Near-field Communication).



Figura 2.1.2 Esempio di un Link induttivo per la trasmissione di energia senza fili

Quando un campo magnetico variabile nel tempo investe un conduttore elettrico, per esempio una bobina, viene indotta una forza elettromotrice (f.e.m), proporzionale alla rapidità con cui il flusso attraversa il conduttore. Il livello di accoppiamento indotto fra conduttori è rappresentato allora dalla loro mutua induttanza. In questo caso i due risonatori, Trasmettitore e Ricevitore, possono essere schematizzati come un circuito RLC.

La tensione in ingresso al trasmettitore, variabile nel tempo, può essere rappresentata dall'espressione:

$$v_1(t) = N_1 \frac{d\phi_1(t)}{di_1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1(t)$$
(1)

Dove:

- N_1 : Numero di spire del trasmettitore;
- ϕ_1 : Flusso magnetico generato dal trasmettitore;
- *i*₁: Corrente circolante nel circuito trasmettitore;
- R_1 : Resistenza che incontra la corrente nel circolare nel circuito trasmettitore;

Esprimendo l'Autoinduttanza come:

$$L_1 = N_1 \frac{d\phi_1(t)}{di_1}$$

Quindi possiamo riscrivere la (1):

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1(t)$$

La tensione di circuito aperto del ricevitore variabile nel tempo analogamente sarà:

$$v_{oc}(t) = N_2 \frac{d\phi_{12}(t)}{di_1} \frac{di_1}{dt}$$
(2)

Dove:

- *N*₂: Numero di spire del ricevitore;
- ϕ_{12} : Flusso magnetico concatenato;

Esprimendo la Mutua Induttanza come:

$$M = N_2 \frac{d\phi_{12}(t)}{di_1}$$

Quindi possiamo riscrivere la (2):

$$v_{oc}(t) = M \frac{di_1}{dt}$$

Inserendo nel circuito una generica resistenza equivalente, R_L :



Figura 2.1.3

Allora circolerà anche nel ricevitore una corrente i_2 variabile nel tempo, quindi potremmo scrivere:

$$\begin{cases} v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1(t) - M \frac{di_2}{dt} \\ M \frac{di_1}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2(t) + R_L i_2(t) \end{cases}$$

Dove R_2 rappresenta la resistenza nel circuito del ricevitore.



Figura 2.1.4

Andando a trasformare queste equazioni in fasori:

$$\begin{cases} \hat{V}_1 = j\omega L_1 \hat{I}_1 + R_1 \hat{I}_1 - j\omega M \hat{I}_2 \\ j\omega M \hat{I}_1 = j\omega L_2 \hat{I}_2 + R_2 \hat{I}_2 + R_L \hat{I}_2 \end{cases}$$

Prima di tutto si identifica come Tensione di Open-Circuit:

 $\hat{V}_{OC} = j\omega M \hat{I}_1$



Figura 2.1.5 Circuito Equivalente Ricevitore

 R_L si può ricavare approssimando $v_{r,1}$ e $i_{r,1}$ con la loro prima armonica:

$$R_L = \frac{v_{r,1h}}{i_{r,1h}}$$

Dalla seconda equazione della parentesi graffa si ricava:

$$\hat{I}_2 = \hat{I}_1 \left(\frac{j\omega M}{j\omega L_2 + R_2 + R_L} \right)$$

E andando a sostituire nella prima:

$$\frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = j\omega L_1 + R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_2 + R_2 + R_L}$$

Si ottiene l'impedenza totale del circuito:

$$\hat{Z}_T = \frac{\hat{v}_1}{\hat{l}_1} \tag{3}$$

Ma essendo:

$$\hat{Z}_1 = j\omega L_1 + R_1$$

е

$$\hat{Z}_R = \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_2 + R_2 + R_L} \tag{4}$$

Si può quindi riscrivere la (3) come:

$$\hat{Z}_T = \hat{Z}_1 + \hat{Z}_R$$

Dove \hat{Z}_R viene chiamata l'Impedenza Riflessa del circuito.

Si nota, osservando la figura 2.1.6, che il denominatore della \hat{Z}_R è esattamente la \hat{Z}_2 , ovvero:

$$\hat{Z}_2 = j\omega L_2 + R_2 + R_L$$

Omettendo l'accento circonflesso, in termini di potenze avremo quindi:

$$S_{1} = V_{1}I_{1} = Z_{T}I_{1}^{2}$$
$$S_{2} = V_{0C}I_{2} = Z_{R}I_{1}^{2}$$

L'obiettivo principale di inserire un condensatore nel circuito è la massimizzazione della capacità di trasferire potenza, ci aspettiamo una relazione prossima al Teorema del massimo trasferimento di energia, per esempio considerando il circuito del ricevitore:



Figura 2.1.6 Circuito del ricevitore con condensatore in serie all'induttanza

Andando a ricavare l'impedenza $\widehat{Z_L}$ della parte del circuito riquadrata in verde:

$$\widehat{Z_L} = \frac{R_L \frac{1}{j\omega C_2}}{R_L + \frac{1}{j\omega C_2}}$$

Ci aspettiamo di poter applicare il massimo trasferimento di potenza

$$Im(\widehat{Z_L}) = Im(\widehat{Z_S}) = -\frac{1}{\omega C_2} = \omega L_2$$

Di conseguenza posso ricavare:

$$\frac{1}{\omega C_2} + \omega L_2 = 0$$

E quindi:

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}$$

Nel caso del circuito del trasmettitore, il condensatore deve compensare l'auto induttanza L_1 , andando a ricavare la parte immaginaria dell'impedenza riflessa, $\widehat{Z_R}$:

$$\widehat{Z_R} = \frac{{\omega_0}^2 M^2}{\widehat{Z_2}}$$

Dove:

$$\widehat{Z_2} = j\omega_0 L_2 + \frac{R_L}{1 + j\omega_0 R_L C_2}$$

Allora:

$$\widehat{Z_R} = \frac{\omega_0^2 M^2}{j\omega_0 L_2 + \frac{R_L}{1 + j\omega_0 R_L C_2}}$$
(5)

Andando a richiamare l'equazione appena trovata per il ricevitore di C_2 e sostituendo in (5), otteniamo:

$$\widehat{Z_R} = \frac{{\omega_0}^2 M^2}{j\omega_0 L_2 + \frac{R_L}{1 + j\omega_0 R_L \frac{1}{{\omega_0}^2 L_2}}}$$

facendo vari passaggi algebrici:

$$\widehat{Z_R} = \frac{{\omega_0}^2 M^2 + j\omega_0 R_L \frac{M^2}{L_2}}{j\omega_0 L_2}$$

Omettendo il pedice, la parte immaginaria di $\widehat{Z_R}$ sarà:

$$Im(\widehat{Z_R}) = -\omega \frac{M^2}{L_2}$$

Prendendo in considerazione la parte di circuito di trasmissione:



Figura 2.1.7 Circuito del trasmettitore con condensatore in serie all'induttanza

$$C_{1} = \frac{1}{\omega_{0}^{2} \left(L_{1} - \frac{M^{2}}{L_{2}} \right)}$$

La parte immaginaria del trasmettitore risulta essere:

$$Im\left[\left(\frac{1}{j\omega_0 C_1}\right) / / (j\omega_0 L_1 + \widehat{Z_R})\right] = 0$$

E quindi:

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1}$$

Si ricava allora il seguente circuito:



Figura 2.1.8 Circuito RLC

In questo modo, inserendo un condensatore in serie per ogni circuito, si ottimizza lo scambio di energia. Si è inizialmente messa in secondo piano l'altra possibile configurazione con i condensatori in parallelo, scartandola semplicemente perché avrebbe richiesto calcoli leggermente più complessi. Dopodiché, sulla base di questi concetti teorici, si può iniziare a progettare a livello pratico le bobine, caratterizzando i valori di mutua induttanza e di auto induzione.

2.2.1 Composizione fisica delle Bobine

Per questo tipo di applicazioni si utilizza il cosiddetto filo Litz che ha origine dal tedesco Litzendraht e sta per filo attorcigliato/intrecciato.



Figura 2.2.1.1 Composizione Filo Litz

Sostanzialmente consiste in una serie di trefoli isolati elettricamente l'uno dall'altro, come si può vedere dalla figura 4.1, normalmente questi trefoli sono a loro volta attorcigliati su sé stessi.

Questo tipo di cavo è utilizzato per ridurre le perdite causate dall'effetto pelle nei conduttori. Per frequenze basse questo effetto è trascurabile, ma essendo ad alte frequenze ne dovremo tenere conto.



Figura 2.2.1.2 Profondità di Pelle

Dove con delta, δ , si intende la profondità della pelle.

L'effetto pelle accresce la resistenza intrinseca di un conduttore ed è inversamente proporzionale alla sezione del conduttore e direttamente proporzionale alla frequenza. Questo fenomeno è responsabile di una perdita di efficienza in quanto fa scorrere la maggior parte della corrente nella zona superficiale del conduttore, senza penetrarlo in profondità, di conseguenza lo scambio di energia è ridotto. Come si può notare dalla figura 4.3 Il filo, che generalmente è in rame, è accuratamente posizionato in modo da creare una serie di avvolgimenti



Figura 2.2.1.3 Composizione bobina

su uno scudo di ferrite così da convogliare il flusso del campo magnetico lungo una direzione desiderata, perpendicolare al piano su cui poggia, nel nostro caso verso la bobina ricevente, di conseguenza si eviteranno il più possibile le perdite per flussi dispersi.

A medium frequency power material for use in power and general purpose transformers at frequencies of 0.2 - 0.5 MHz.

SYMBOL	CONDITIONS	VALUE	UNIT
щ	25 °C; ≤10 kHz; 0.25 mT	2000 ±20%	
μ _a	100 °C; 25 kHz; 200 mT	≃ 4000	
В	25 °C; 10 kHz; 1200 A/m	∝ 44 0	mT
	100 °C; 10 kHz; 1200 A/m	<i>∝</i> 370	
Pv	100 °C; 100 kHz; 100 mT	≤80	kW/m ³
	100 °C; 400 kHz; 50 mT	≤150	
ρ	DC; 25 °C	≃2	Ωm
Tc		≥200	°C
density		≃ 4750	kg/m ³

Tabella 2.2.1.4 Ferroxcube

La permeabilità magnetica nel vuoto, μ_0 , è una costante fondamentale della fisica connessa all'intensità del campo magnetico, essa assume il valore:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \ \frac{H}{m}$$

La permeabilità relativa, μ_r , è un numero adimensionale, privo di unità di misura, tipico di ogni materiale.

Come si può notare dalla Tabella 4.1, estratta dal catalogo Ferroxcube, per la ferrite siamo su valori di circa 2000, per misure fatte a 25°C, con frequenza minore di 10 KHz e intensità del campo magnetico a 0.25 mT. Questi elevati valori di confermano quanto discusso prima sulla capacità della ferrite di orientare verso una certa direzione il campo magnetico e favorire un'efficienza maggiore del trasferimento di potenza, al contrario per il rame, materiale utilizzato per i fili, è un ottimo conduttore, ed ha valori di permeabilità relativa che si aggirano sull'unità.

Attraverso il prodotto fra la permeabilità magnetica nel vuoto e relativa, si può definire la permeabilità magnetica di un materiale, μ :

$$\mu = \mu_0 * \mu_r$$

essa esprime l'attitudine di un materiale a magnetizzarsi soggetto ad un campo magnetico esterno.

2.2 Design Computazionale di Bobine Rettangolari Trasmettitore-Ricevitore

Nella progettazione di bobine per il trasferimento wireless di energia, il problema principale è che non sono fornite delle linee guida, ma la letteratura scientifica fornisce solamente alcuni standards pratici di implementazione della struttura magnetica.

Il processo per caratterizzare le bobine può quindi essere riassunto nel seguente flowchart, cioè come una serie di tentativi che ci permettono di arrivare al valore congruo di spire per entrambi i circuiti:



Figura 2.2.1

In questa fase primordiale di studio, non essendo certi di una geometria che potesse a priori garantire risultati migliori, si è scelto di partire scegliendo quella circolare poiché, rispetto a quella rettangolare, risulta la via più rapida nella progettazione elettromagnetica.

Sono stati utilizzati i seguenti Software per estrarre i primi valori numerici di Auto Induttanza e Mutua Induzione:

- Matlab: una volta definiti i parametri geometri e le proprietà dei materiali, è stato possibile implementare un codice per il quale il Software simulasse alcune formule analitiche complesse, così da permetterci di calcolare rapidamente i parametri magnetici delle bobine in maniera automatica.
- FEMM (Finite Element Method Magnetics): è un pacchetto di elementi finiti per la risoluzione di problemi planari e assialsimmetrici 2D per problemi magnetici ed elettrostatici a bassa frequenza.

Il pacchetto è composto da un'interfaccia intuitiva e interattiva che comprende pre e postelaborazione grafica, un generatore di mesh e vari risolutori. In FEMM, si modella una fetta del problema assialsimmetrico. Per convenzione, si intende che l'asse è verticale (r = 0) e il dominio del problema è limitato alla regione in cui $r \ge 0$.



Figura 2.2.2 Esempio di bobina circolare animata in aria

Nel nostro caso abbiamo un sistema interconnesso del tipo:





Per farci un'idea di prima approssimazione del matching tra la struttura magnetica e l'elettronica per il trasferimento di potenza andiamo a calcolare i valori di mutua induttanza e di auto induzione, partendo dal Software Matlab che realizza un'approssimazione della formulazione teorica del problema circolare, tramite i seguenti parametri:



Figura 2.2.4 Approssimazione Bobine Circolari

1. Mutua Induttanza:

$$M = \frac{1}{2}\mu_0 N_1 N_2 \sqrt{(a+b)^2 + d^2} [(2-m)K - 2E]$$

Dove:

• μ_0 rappresenta la permeabilità magnetica nel vuoto e assume il valore:

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \ \frac{H}{m}$$

• K e E sono due parametri ellittici che dipendono dalla seguente *m*:

$$m = \frac{4ab}{(a+b)^2 + d^2}$$

Che sotto la condizione:

Si semplifica come:

$$M = N_1^2 N_2^2 \frac{\mu_0 a^2 b^2}{2d^3}$$

2. Auto induzione:

$$L_1 = \mu_0 N_1^2 a \left(\ln \frac{16a}{D} - 2 \right)$$

Dove D è il raggio equivalente di tutti gli avvolgimenti:

$$D = 2\sqrt{\frac{N_1S}{\pi}}$$

Mentre per quanto concerne il problema di bobine rettangolari, come si può notare, la formulazione è più complessa. Matlab andrà a parametrizzare secondo quanto segue:



1. Mutua induttanza:

$$\begin{split} M &= \frac{\mu_0}{4\pi} N_1 N_2 \\ &\times \left[\left[d\ln\left(\frac{d + \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2}}{d + \sqrt{h^2 + d^2 + q^2}} \right) \\ &+ h\ln\left(\frac{g + \sqrt{h^2 + d^2 + q^2}}{g + \sqrt{h^2 + q^2 + q^2}} \right) \\ &+ h\ln\left(\frac{g + \sqrt{h^2 + q^2 + q^2}}{g + \sqrt{h^2 + q^2 + q^2}} \right) \\ &+ c\ln\left(\frac{(-c) + \sqrt{h^2 + q^2 + q^2}}{(-c) + \sqrt{h^2 + q^2 + q^2}} \right) \\ &+ cn\left(\frac{(-c) + \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2}}{(-m) + \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2}} \right) \\ &+ mn\left(\frac{(-m) + \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2}}{(-m) + \sqrt{h^2 + q^2 + q^2}} \right) \\ &+ \sqrt{h^2 + q^2 + d^2} - \sqrt{h^2 + q^2 + q^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + q^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + q^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + e^2 + q^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + e^2 + q^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + e^2 + q^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + d^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2 + t^2} \\ &+ \sqrt{h^2 + (-t)^2 + m^2} - \sqrt{h^2 + (-t)^2$$

2. Auto induzione:

$$L_{i} = \frac{\mu_{0}}{\pi} N_{i}^{2} \left[a_{i} \ln \frac{2a_{i}b_{i}}{r_{i} \left(a_{i} + \sqrt{a_{i}^{2} + b_{i}^{2}} \right)} + b_{i} \ln \frac{2a_{i}b_{i}}{r_{i} \left(b_{i} + \sqrt{a_{i}^{2} + b_{i}^{2}} \right)} - 2 \left(a_{i} + b_{i} - \sqrt{a_{i}^{2} + b_{i}^{2}} \right) + \frac{a_{i} + b_{i}}{4} \right]$$

FEMM:

$$M = \int_{\Omega_2} \frac{\vec{A_1} \cdot \vec{J_2}}{I_1 I_2} \, \mathrm{d}\Omega \tag{1}$$

$$L_{1} = \int_{\Omega_{1}} \frac{\overrightarrow{A_{1}} \overrightarrow{J_{1}}}{I_{1}^{2}} d\Omega \quad per \ I_{2} = 0$$
$$L_{2} = \int_{\Omega_{2}} \frac{\overrightarrow{A_{2}} \overrightarrow{J_{2}}}{I_{2}^{2}} d\Omega \quad per \ I_{1} = 0$$

Dove:

- A_1 è l'area orientata relativa alla prima bobina;
- J_2 è la densità di corrente della seconda bobina;
- $I_1 e I_2$ sono rispettivamente la corrente nella prima e nella seconda bobina;
- $d\Omega_1$ è l'integrale preso sul volume della prima bobina;
- $d\Omega_2$ è l'integrale preso sul volume della seconda bobina;

Possiamo riordinare in una forma un po' più semplice notando che:

$$N_2 \cdot I_2 = J_2 \cdot A_2$$

Sostituendo J_2 nella (1) si ottiene:

$$M = \frac{N_2}{I_1 A_2} \left(\int_{J_{2+}} A_1 \ d\Omega_2 - \int_{J_{2-}} A_1 \ d\Omega_2 \right)$$

Eventualmente FEMM ha anche la possibile sezione *Magnetic Field Energy*. Questa ha la possibilità di calcolare l'energia immagazzinata nel campo magnetico nella regione specificata. Questo integrale può essere quindi utilizzato come metodo alternativo per ottenere l'induttanza per problemi lineari.

Indicando E come l'energia immagazzinata nel campo magnetico, si ottiene l'induttanza risolvendo la formula:

$$E = \frac{LI^2}{2}$$

Grazie a FEMM possiamo però calcolare facilmente gli integrali sopra proposti attraverso apposite funzioni, dando una certa geometria della bobina, tenendo conto delle dimensioni dell'alloggiamento. Come si può vedere in figura 2.2.5:



Figura 2.2.5

si vorrebbe risolvere per il campo della bobina in uno spazio illimitato, non influenzato da un confine computazionale vicino. Tuttavia, il metodo degli elementi finiti richiede sempre che i problemi vengano risolti su un dominio limitato, per questo vediamo il sistema circondato dal semicerchio

2.2.1 Design input

Dal momento che per una successione logica di progettazione, quella strutturale è stata antecedente a quella elettromagnetica, si sono notati subito alcuni vincoli spaziali molto restringenti dell'alloggiamento del circuito di ricezione, in quanto lo spazio risulta di dimensione rettangolare e di estensione di 3x1 centimetri.

Avendo così poco margine di variabilità all'interno della placca, si è pensato di modificare la parte di trasmissione, essendo questa esterna, non risulta avere alcun problema di alloggiamento specifico, al contrario, non si ha alcun vincolo spaziale. Così, per favorire una migliore trasmissione a distanze maggiori, si è provato a sovradimensionare in questa fase di progettazione computazionale la parte di trasmissione. Per questo motivo, nelle immagini a seguire, si vedrà una differenza dimensionale così elevata fra le due bobine di ricezione e di trasmissione, potendole identificare subito a colpo d'occhio.

Il problema risulta davvero particolare, infatti, per quanto riguarda altre applicazioni, per esempio il trasferimento di potenza wireless per la ricarica di autoveicoli, si nota la presenza di bobine senza vincoli spaziali così elevati, con un mezzo di trasmissione che è l'aria. Nel nostro caso, invece, pensando di impiantare la placca a ridosso di una frattura tibiale, si deve considerare l'attraversamento di tessuto umano comprendente la cute e i muscoli e, a seconda dell'orientamento, anche l'osso stesso. Inoltre, la bobina di ricezione di potenza sarà chiusa all'interno della placca, che è in acciaio inossidabile. Per motivi di biocompatibilità i materiali costituenti i circuiti, rame e ferrite, ma non solo, non possono stare ovviamente a contatto diretto con i tessuti, ma questo genera un ulteriore problema: il segnale risulta schermato.

Con i problemi sopracitati e definiti dalla natura del progetto, si è vincolati da altri aspetti meccanici, cioè dalla scelta del motore Maxon RE 06, che rappresenta il carico del circuito di ricezione, da alimentare con definite potenze, tensioni e correnti, altrimenti il risultato sarebbe quello di non funzionare o ancora peggio, se alimentato con potenze troppo elevate, quello di guasto. Situazione assolutamente da scongiurare data la pericolosità della locazione della placca, ciò potrebbe infatti significare un'operazione d'urgenza sul paziente.

In questo contesto, si è provato ad ottimizzare i gradi di libertà rimasti liberi di essere variati. Si è prima fatta una ricerca preliminare sulle bobine alloggiabili in commercio in modo da analizzare le loro caratteristiche geometriche e le proprietà elettromagnetiche, ma tenendo sempre presente la possibilità di realizzarle custom, ad hoc per il progetto.

2.2.2 Calcolo Analitico Vs Numerico

Come accennato in precedenza abbiamo utilizzato due tipi di approcci diversi, analitico con Matlab e numerico con FEMM, per andare a studiare e a definire le proprietà geometriche e fisiche delle bobine di ricezione e trasmissione.

Entrambi i Software hanno delle peculiarità che fanno sì che per alcuni scopi sia vantaggioso utilizzare uno piuttosto che l'altro. I codici di Matlab, infatti, permettono di variare molto più facilmente la geometria delle bobine da studiare:

```
%% Geometric parameters definition
```

```
% Coils dimensions - parameters transmitter
a1=0.15; % larghezza in center line [m 15 cm]
b1=0.8; % lunghezza in center line [m 8 cm]
phi_filo1=0.6*10^-3; %diametro filo
S1=(pi*(phi_filo1)^2)/4; % conductor section [m^2]
N1=10; % number of turns
```

Figura 2.2.2.1

Per esempio, in questa figura si nota come sia agevole andare a cambiare la definizione dei parametri geometrici variandone semplicemente il valore numerico. Per quanto riguarda invece i parametri geometrici della bobina di ricezione sono stati mantenuti costanti le dimensioni del rettangolo e variato per lo più il numero di spire:

% parameters receiver a2=0.01; %1 cm larghezza alloggiamento placca b2=0.03; %3 cm altezza phi_filo2=0.2*10^-3; %diametro filo [m] S2=(pi*(phi_filo2)^2)/4; % conductor section [m^2] N2=70; % number of turns

Figura 2.2.2.2

Al contrario l'interfaccia FEMM risulta alquanto macchinosa nel disegnare una, seppur semplice, geometria rettangolare.



Figura 2.2.2.3

Una grande mancanza è che FEMM non ha la possibilità di disegnare simmetrie rispetto ad assi, comodo nel momento in cui si mettono in relazione le due bobine, dato che variando reciprocamente la loro posizione nello spazio, varia anche il valore degli integrali di campo calcolati. Inoltre, non è nemmeno agevole calcolare la distanza reciproca fra i centri dei rettangoli, o semplicemente fra i due lati, cosa che va fatta separatamente, di conseguenza molto dispendioso a livello di tempo, più che di difficoltà.

Per questi motivi si è scelto di utilizzare Matlab per una prima valutazione degli ingombri e delle caratteristiche magnetiche di mutua induttanza e auto induzione e solo successivamente andare a metterli in input in FEMM, secondo questa logica:

- Definizione tipo di problema da risolvere, a seconda della geometria;
- Definizione delle proprietà, ossia i valori del numero di avvolgimenti nel circuito di trasmissione e di ricezione;
- Definizione della frequenza del sistema;
- Definizione del grado di precisione del risolutore in base alla grandezza della maglia della Mesh.

A differenza dei codici utilizzati in Matlab, che non ottengo alcun grafico specifico dell'andamento magnetico del problema, bensì meri numeri da interpretare, in FEMM una volta implementato il problema, si esegue una discretizzazione spaziale sottoforma
di triangolazione, dove in ogni nodo viene calcolato il valore specifico del campo magnetico e si possono apprezzare alcuni grafici che simulano l'andamento del campo magnetico nello spazio, come si può osservare nella seguente figura:



Figura 2.2.6

Dal post-processing si seleziona la sezione di interesse $(A_1 \ o \ A_2)$ delle rispettive bobine:



Figura 2.2.6

In figura 2.2.6, per esempio, è selezionata quella di trasmissione (A_1) , premurandosi di avere un valore nullo di corrente sul circuito di ricezione, viceversa nel caso si selezionasse l'area relativa alla ricezione (A_2) un valore nullo sul circuito di trasmissione. Da qui si definisce un blocco integrale in base al tipo di formulazione che si vuole utilizzare:



Figura 2.2.7

Oppure:

Block Integrals	×
Magnetic field energy	-
ОК	Cancel

Figura 2.2.8

A differenza di Matlab che In tal modo, FEMM, restituisce un valore preciso in output della grandezza selezionata che mi permette poi di calcolare agevolmente gli integrali di Auto Induttanze e Mutua induzione, che riporto qui per chiarezza:

$$M = \int_{\Omega_2} \overrightarrow{\frac{A_1 \cdot J_2}{I_1 I_2}} \, d\Omega$$
$$L_1 = \int_{\Omega_1} \overrightarrow{\frac{A_1 \cdot J_1}{I_1^2}} \, d\Omega \quad per \ I_2 = 0$$
$$L_2 = \int_{\Omega_2} \overrightarrow{\frac{A_2 \cdot J_2}{I_2^2}} \, d\Omega \quad per \ I_1 = 0$$

Successivamente sono stati messi a confronto i risultati ottenuti da entrambi i software, in moto da tentare di far combaciare i risultati dei due approcci di progettazione computazionale.

2.2.3 Elaborazione dei risultati Matlab

In questa sezione si procede alla definizione dei parametri di potenza di entrambi i circuiti e dei parametri geometrici delle bobine wireless, su cui c'è margine di variabilità, e all'analisi della loro influenza con i valori di output relativa ai due software utilizzati. Inizialmente, come già accennato, si parte da Matlab per sfruttare la rapidità di gestione dei seguenti parametri:

- Definizione dei parametri di potenza:
 - o Frequenza del sistema di Trasmissione, da cui si ricava la Pulsazione, ω ;
 - Tensione del sistema di Trasmissione, $V_{1,tx}$;

Si può osservare che la variabilità dei parametri di potenza è esclusiva del sistema di trasmissione, in quanto sul circuito di ricezione si ha una potenza predeterminata dal motore Maxon RE06, di conseguenza si è scelto di non variare tali parametri, ma tenerli fissi per i valori massimi di funzionamento pari a:

•
$$V_{Max} = 4,5 V;$$

• $P_{Max} = 0,3 W;$

- Definizione dei parametri geometrici delle bobine rettangolari:
 - \circ a_1 : Larghezza della bobina di trasmissione;
 - o b_1 : Lunghezza della bobina di trasmissione;
 - \circ N₁: Avvolgimenti della bobina del circuito di trasmissione;
 - \circ a_2 : Larghezza della bobina di ricezione;
 - \circ b_2 : Lunghezza della bobina di ricezione;
 - \circ N₂: Avvolgimenti della bobina del circuito di ricezione;
 - \circ *h*: Distanza tra le bobine;

Prendendo in considerazione le caratteristiche dei datasheets delle bobine in commercio, (TDK – Modello: WR221230-36M8-G in Trasmissione e TDK – Modello: WR301025-19M8-G in Ricezione) si è scelto così di iniziare le prove definendo i seguenti parametri di potenza e geometrici:

Frequenza	100	KHz
V1	4,5	V
al	1,2	Cm
b1	2,2	Cm
N1	36	Avvolgimenti
a2	1,0	Cm
b2	3,0	Cm
N2	19	Avvolgimenti

Tabella 2.2.3.1

L'obiettivo è quello di trovare dei valori di mutua induttanza e auto induzione che abbiano, in primis, senso a livello fisico. Durante le prove, infatti, variando determinati parametri, si è notato come Matlab restituisse in output dei numeri congrui per quanto riguarda il valore assoluto, ma di segno negativo. Tali valori sono stati subito scartati dal momento che non hanno alcun significato.

Distanza fra le bobine (h):

Uno dei parametri che influisce maggiormente in questo senso si è rivelata essere la distanza fra le bobine, h. L'obiettivo sarebbe quello di avere una trasmissione di potenza in un range di $8 \div 12$ Cm dal momento che il progetto imporrebbe di raggiungere la placca, installata internamente alla coscia del paziente.

h [Cm]	M [H]
12	-3,02E-07
11	-2,86E-07
10	-2,67E-07
9	-2,46E-07
8	-2,21E-07
7	-1,91E-07
6	-1,56E-07
5	-1,14E-07
4	-6,33E-08
3	3,32E-09
2	1,37E-07
1	8,59E-07
0,5	2,73E-06
0,1 (A contatto)	9,00E-06

Andando a variare questo parametro, si può osservare che, partendo da 12 Cm e andando a diminuire progressivamente la distanza fra le bobine di 1 Cm, la mutua induttanza va via via crescendo.

Quando si raggiunge la distanza di 3 Cm, si nota che il segno, da negativo, passa positivo (evidenziato in giallo), questo segna il passaggio di valori di mutua induttanza significativi a livello fisico. Inoltre, si vede che diminuendo ancora di più la distanza fra le bobine, il valore della mutua induttanza cresce. Questo ci permette di affermare che le due grandezze prese in considerazione sono legate fra loro da un rapporto inversamente proporzionale.

Nella seguente tabella si può apprezzare la differenza fra i valori di auto induzione restituiti da Matlab e quelli definiti dal costruttore TDK delle bobine:

Grandezza	L1 [µH]	L2 [µH]
Output Matlab	20,1	14,6
Datasheet TDK	27,9	12,8
Errore %	27,9%	14,06%

```
Tabella 2.2.3.3
```

Avvolgimenti Bobine

Gli avvolgimenti delle bobine hanno un impatto diretto sul codice e sulle formule utilizzate in Matlab.

```
%% coil parameters calculation
% self-inductances
% L1
l1_1=a1*log((2*a1*b1)/(r1*(a1+sqrt(a1^2+b1^2)))); %partial terms
l1_2=b1*log((2*a1*b1)/(r1*(b1+sqrt(a1^2+b1^2))));
l1_3=2*(a1+b1-sqrt(a1^2+b1^2))+0.25*(a1+b1);
l1_tot=(11_1+11_2-11_3);
L1=(mu0*N1^2/pi)*l1_tot
% L2
l2_1=a2*log((2*a2*b2)/(r2*(a2+sqrt(a2^2+b2^2)))); %partial terms
l2_2=b2*log((2*a2*b2)/(r2*(b2+sqrt(a2^2+b2^2))));
l2_3=2*(a2+b2-sqrt(a2^2+b2^2))+0.25*(a2+b2);
l2_tot=(12_1+12_2-12_3);
L2=(mu0*N2^2/pi)*l2_tot
```

Si nota come entrambe le auto induzioni abbiamo un termine moltiplicativo costante, ossia la permeabilità magnetica nel vuoto divisa per π :

$$\frac{\mu_0}{\pi} = \frac{4\pi * 10^{-7} \ \frac{H}{m}}{\pi} = \ 4 * 10^{-7} \ \frac{H}{m}$$

Ciò che può variare sono:

- N_1 : Numero di avvolgimenti sulla bobina di trasmissione;
- *N*₂: Numero di avvolgimenti sulla bobina di ricezione;
- $L_{1,tot}$: Parametro funzione delle dimensioni della bobina di trasmissione;
- $L_{2,tot}$: Parametro funzione delle dimensioni della bobina di ricezione.

Variando quindi il numero di avvolgimenti e mantenendo costante i restanti parametri:

Frequenza	100	KHz
V1,	4,5	V
al	1,2	Cm
b1	2,2	Cm
a2	1,0	Cm
b2	3,0	Cm
N2	19	Avvolgimenti
h	2	Cm

Si ottiene un grafico del tipo:



Nel seguente grafico si osserva che anche aumentando gli avvolgimenti della bobina di trasmissione, N_1 , l'Auto induzione del circuito di ricezione non varia ma rimane costante, infatti, L_2 risulta indipendente da N_1 . Mentre quella di trasmissione ha un andamento parabolico fino a 200 avvolgimenti, poi si nota che da quel valore in poi inizia a decrescere, fino a raggiungere valori negativi con 400 spire. Valori non di interesse fisico, quindi omessi anche dal grafico.

Frequenza	100	KHz
V1,	4,5	V
a1	1,2	Cm
b1	2,2	Cm
a2	1,0	Cm
b2	3,0	Cm
N1	36	Avvolgimenti
h	2	Cm

Andando ad analizzare ora cosa accade variando N_2 e mantenendo costanti:

Si ottiene il seguente grafico:



A differenza del grafico precedente di L_1 in funzione di N_1 , si osserva che per questo range di valori presi in considerazione, aumentando N_2 , si ha un andamento lineare monotono crescente.

La Mutua induttanza è funzione della variazione del numero di avvolgimenti N_1 ed N_2 , essendo:

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} m_{tot}$$

Dove m_{tot} è un parametro funzione delle caratteristiche geometriche di entrambe le bobine.



È rappresentato un confronto fra l'andamento della Mutua induttanza in funzione di N_1 (in Blu) e di N_2 (in Arancione), si osserva un andamento monotono crescente della Mutua induttanza per entrambe le bobine.

Mantenendo prima:

$$N_1 = cost = 36$$
 e aumentando il numero di spire N_2

e dopo facendo l'inverso, quindi:

 $N_2 = cost = 19$ e aumentando il numero di spire N_1

Senza variare la dimensione delle bobine, si notano valori di Mutua induttanza maggiori se questa è funzione di N_2 .

<u>Frequenza</u>

Nel caso in cui ci sia un trasferimento troppo elevato di energia, si potrebbe provocare l'insorgenza non desiderata di calore, che si diffonderebbe all'interno del tessuto umano, causando un danno biologico duraturo nel tempo.

Tale fenomeno, però, rimane controllato se ci si trova in un campo di applicazione in un range di frequenza che varia da 10 - 100K Hertz, l'energia trasferita risulta infatti essere di poca rilevanza, per cui il calore può essere agevolmente gestito dall'organismo e dai suoi sistemi di termoregolazione.

Sul datasheet delle bobine utilizzate per le applicazioni sperimentali (Capitolo 3) si può notare come il costruttore indichi un buon funzionamento per 100KHz. Dunque, si è partiti da questo valore per la determinazione della Mutua induttanza e delle Autoinduzioni, esclusivamente in FEMM, questo fattore infatti non è determinante nella formulazione analitica in Matlab in quanto L_1 , L_2 ed M non dipendono dalla frequenza.

<u>Parametri geometrici</u>

Si nota che, sia le Auto induzioni sia la Mutua Induttanza, hanno un termine moltiplicativo che dipende dalla definizione dei parametri geometrici:

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} m_{tot}$$
$$L_1 = \frac{\mu_0 N_1^2}{\pi} l_{1tot}$$
$$L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2}{\pi} l_{2tot}$$

Dove:

- *m*_{tot}: Parametro geometrico di Mutua induttanza;
- l_{1tot} : Parametro geometrico di Auto induzione del circuito di trasmissione;
- *l*_{2*tot*}: Parametro geometrico di Auto induzione del circuito di ricezione;

In questo caso si è stati forzati a mantenere invariate le dimensioni della bobina di ricezione dal momento che si è limitati dall'alloggiamento della forma della placca che deve ospitare sia il circuito di ricezione che la bobina stessa. Si è scelta la sua massima

estensione, ossia un rettangolo 3x1 Cm di estensione. Per questo motivo l_{2tot} sarà un parametro geometrico che in realtà rimane fisso con un valore di:

$$l_{2tot} = 0,1014$$

Così l'unico parametro che varierà nella determinazione di L_2 è solamente il numero di avvolgimenti, N_2 .

Di conseguenza si sono variate le dimensioni di lunghezza e larghezza della bobina di trasmissione, pensando anche di sovradimensionarle in modo da valutare il trasferimento di energia. Nei seguenti grafici si può apprezzare la tendenza di Mutua induttanza e Auto induzione:



La Mutua induttanza decresce all'aumentare delle dimensioni della bobina, al contrario l'Auto induzione cresce, mantenendo costante la lunghezza della bobina a 2,2 Cm e variandone la larghezza. Aumentando la grandezza delle bobine, mantenendo fissa la lunghezza $b_1 = 5 cm$ si osserva lo stesso trend, semplicemente con valori più grandi di un ordine di grandezza



Anche invertendo le grandezze, mantenendo ora fissa la larghezza $a_1 = 5 cm$ si osservano gli stessi valori numerici e lo stesso trend.



Per quanto riguarda la Mutua Induttanza avremo un andamento crescente, con inizialmente valori più piccoli sulla lunghezza, ma con una pendenza molto più ripida



rispetto alla larghezza che risulta una curva schiacciata, come si osserva nei seguenti grafici:

Avendo analizzato sia i parametri geometrici sia i parametri di potenza ed avendo effettuato una prima scrematura su Matlab delle grandezze che potessero garantire margini di variabilità, si decide di passare con questi dati all'analisi agli elementi finiti magnetici su FEMM. Si è scelto di procedere in un secondo momento su tale software perché risulta molto più macchinosa l'elaborazione dei parametri, in quanto l'interfaccia ha alcuni limiti e disegnare le bobine e le loro reciproche distanze significa un alto dispendio di tempo.

<u>2.2.4 Dati di Input FEMM</u>

Per l'implementazione e la definizione del problema FEMM sono stati inseriti in input i seguenti dati:

Tipo di Problema	Assialsimmetrico
Frequenza	100 [KHz]
Min Angle	22

FEMM dà la possibilità di scegliere fra due problemi:

- Assialsimmetrico (simmetria radiale);
- Planare;

Avendo uno spazio limitato di alloggiamento nella placca ed avendo bobine di geometria rettangolare, la scelta più adatta sarebbe stato il problema planare, ma dal momento che l'altezza delle nostre bobine è davvero minima (0,52 mm) FEMM non restituisce in output valori congrui e soddisfacenti di Auto induzione nel caso planare. si è scelto così di approssimare il problema a bobine circolari, ma con dimensioni geometriche e di potenza di quelle rettangolari. Il *Min Angle* si riferisce alla dimensione specifica della triangolazione per risolvere il problema, di tipo smart, ovvero più fitta nella prossimità della bobina.

Si è disegnata quindi la seguente geometria che rappresenta la sezione delle bobine ad una distanza di 2 Cm con i relativi avvolgimenti delle spire:

- Spire Trasmettitore: $N_1 = 36$;
- Spire Ricevitore: $N_2 = 19$;



Figura 2.2.4

Successivamente, si è imposta in modo alterno una corrente di circuito, prima di ricezione e poi di trasmissione, a zero al fine di determinare le Auto induzioni e calcolare i seguenti integrali:

$$L_{1} = \frac{2E_{1}}{I_{1}^{2}} \ con I_{2} = 0$$
$$L_{2} = \frac{2E_{2}}{I_{2}^{2}} \ con I_{1} = 0$$

Dove *E* rappresenta l'energia immagazzinata dal circuito in [J] = [Ws]

In questa fase ci si è avvalso della possibilità di misurare in laboratorio, direttamente sul circuito, la Tensione e la Potenza del motore in modo sperimentale con una distanza fra le bobine di 2 Cm. Si è quindi considerato:

•
$$V_{mot} = 0,49 mV;$$

•
$$P_{mot} = 0,79 \ mW$$

Si è scelto un valore di potenza a regime in fase di bloccaggio, quindi nella situazione più sfavorevole per il motore. Infatti, il valore è maggiore in questa condizione, ed è proprio per questo che è stata effettuata questa scelta, in modo da stare dalla parte della ragione, eventualmente sovradimensionando a livello computazionale le Auto induttanze in questione.

2.2.5 Elaborazione Risultati FEMM

Una volta che sono stati impostati i dati in input su FEMM si procede all'analisi dei risultati in output andando a selezionare le varie sezioni di area in verde che rappresentato gli avvolgimenti delle bobine, in particolare nella seguente figura del circuito di Trasmissione si può notare l'andamento delle linee del campo magnetico uscente dalla bobina:



Figura 2.2.5.1 Trasmettitore attivo

Invece nella seguente figura, il circuito di Ricezione e l'andamento delle linee del campo magnetico uscente dalla bobina:



Figura 2.2.5.2 Ricevitore attivo

Si ottengono in output FEMM i seguenti valori di Energia di campo magnetico:

- $E_1 = 1,9 \cdot 10^7 J$ $E_2 = 9,71 \cdot 10^7 J$

Considerando:

$$R_{l,DC} = \frac{V_{mot}^2}{P_{mot}} = 3.1 \ m\Omega$$

Dove $R_{l,DC}$ è la resistenza del motore in corrente continua, si ricava poi quella in corrente alternata come:

$$R_{l,AC} = \frac{8}{\pi^2} R_{l,DC} = 2.5 \ m\Omega$$

Da cui si ricava:

$$V_1 = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} V_{mot} = 0,44 \ mV$$

Considerando:

$$I_1 = I_2 = I$$

Si ottiene:

$$I = \frac{P_{mot}}{V_1} = 0,15 \ mA$$

In sintesi, si ottengono in risultati come in tabella:

Grandezza	Valore	Unità di misura
V_{mot}	0,49	mV
P _{mot}	0,79	mW
R _{l,DC}	3,1	$m\Omega$
R _{l,AC}	2,5	$m\Omega$
V_1	0,44	mV
Ι	0,15	mA

Tabella 2.2.5.1

Grazie ai quali posso ricavare i valori di Auto induttanze, ricordando che $[H] = \left[\frac{Vs}{A}\right]$:

$$L_{1} = \frac{2E_{1}}{l} = 60,5 \ \mu H \ con \ I_{2} = 0$$
$$L_{2} = \frac{2E_{2}}{l} = 12,3 \ \mu H \ con \ I_{1} = 0$$

2.3 Risultati Design Computazionale

Uno dei gradi di libertà di progettazione, considerato durante i calcoli e i tentativi di ottimizzazione, è la tensione nominale del sistema che nel nostro caso è vincolato dalla scelta del motore effettuata precedentemente, durante la progettazione meccanica.

In generale, altri margini di libertà si trovano nella geometria e nella dimensione delle bobine, ma anche in questo caso si è fortemente limitati dall'alloggiamento e dalla forma della placca che deve ospitare l'intero circuito di ricezione. Per quanto riguarda l'analisi della Mutua induttanza non è stata riscontrata una vera e propria coincidenza dei risultati per quanto riguarda i due software, non avendo un riscontro del datasheet della componentistica elettrica è stato scelto di omettere i risultati dall'elaborazione dei risultati computazionali. Si è visto che attraverso Matlab si può effettuare un'analisi dei parametri geometrici e di potenza più approfondita e anche più rapida rispetto a FEMM, che però ha il vantaggio di poter osservare l'andamento del campo magnetico nello spazio.

Nella seguente tabella si può vedere un confronto fra le Auto induzioni e l'errore percentuale che si commette rispetto al datasheet delle bobine simulate sui due software:

Grandezza	L1 [µH]	L2 [µH]
Risultati Matlab	20,1	14,6
Risultati FEMM	60,5	12,3
Datasheet TDK	27,9	12,8
Errore % Matlab	27,9%	14,06%
Errore % FEMM	116,8%	3,9%

Tabella 2.3.1 Tabella riassuntiva risultati computazionali

Si osserva che Matlab ha errori meno variabili rispetto a FEMM, il quale risulta essere molto più preciso nel caso del circuito di Ricezione, dove si è inserito un valore di corrente misurato sperimentalmente, facendo poi l'ipotesi che la corrente rimanga costante nei due circuiti, si è notato un errore percentuale elevato rispetto al valore del datasheet.

3. PROVE SPERIMENTALI

3.1 Componenti sperimentali utilizzati

Per eseguire le prove sperimentali ci siamo serviti dei seguenti mezzi elettronici sul banco di prova:

- Breadboard Digilent;
- Oscilloscopio Rigol MSO5104;
- Batteria Duracell Alcaline Plus da 4,5 e 9V;
- Motore Maxon RE 06, ϕ 6 mm, 0.3 W;
- Sonda di corrente passiva, spina BNC e Pinza Amperometrica, 10.6 A, P6021A con 125 Turn;
- Kit filo ponticello, maschio-femmina, multicolore, 100 mm, connettore Dupont 0.1", 0.2 mm²;
- HP Agilent 33120A Function generator Signal Funzioni 15 MHz arbitrario;
- Bobine Wireless Circolari e Rettangolari;

La Breadboard Digilent è stata utilizzata per creare i prototipi di circuiti elettrici e consiste in una base in plastica con un certo numero di fori nei quali inserire i reofori. Per facilitare l'inserimento dei fili del motore nei fori del breadboard e quindi per accelerarne il cambio di polarità, è stato fuso lo stagno sui fili.

In primis è stata tolta la vecchia guaina dei cavi con la spelafili ed è stato lasciato un paio di centimetri di metallo senza materiale isolante. Una volta che il saldatore è andato in temperatura si avvicina la punta rovente sul cavo scoperto fissato sulla terza mano, come si può vedere in figura 3.0.2, in questo modo verrà ricoperto da un manto di materiale metallico.



Figura 3.1.1

***** Oscilloscopio Rigol MSO5104:



Figura 3.1.2

È un oscilloscopio digitale a segnale misto con larghezza di banda di 100 MHz, 4 canali analogici, che ci ha permesso di registrare in frame i transitori di corrente sia in blocco che in sblocco. Sul Datasheet dell'oscilloscopio si è osservato che per la scala verticale si ha il $\pm 3\%$ di precisione dello strumento, rispetto alla scala considerata nell'acquisizione.



* Motore Maxon RE 06, φ 6 mm, Spazzole in metalli preziosi, 0.3 Watt

Figura 3.1.3

È ciò che permette alla placca dinamizzabile di rendere solidale o meno il corpo principale e la guida, infatti muovendosi in una direzione, piuttosto che nell'altra, attiva o disattiva il sistema di bloccaggio.

DATI DEL MOTORE		
Tensione nominale	4,5	[V]
Velocità a vuoto	18600	[rpm]
Corrente a vuoto	14,2	[mA]
Velocità nominale	5400	[rpm]
Coppia nominale	0,318	[mNm]
Corrente nominale	0,158	[A]
Coppia di stallo	0,469	[mNm]
Corrente d'avviamento	0,217	А
Efficienza massima	56	%

Il motore ha le seguenti specifiche tecniche:

DATI CARATTERISTICI		
Resistenza ai terminali	20,8	[Ω]
Induttanza ai terminali	0,204	[mH]
Costante di coppia	2,16	[mNm/A]

I motori DC Maxon sono motori a corrente continua di alta qualità, dotati di potenti magneti permanenti. Il cuore del motore è il rotore senza ferro, una tecnologia per soluzioni potenti e compatti a bassa inerzia. Dalla seguente immagine si può osservare meglio lo spaccato del motore, così da apprezzarne ogni suo componente interno:



Figura 3.1.4

Il motore scelto ha le seguenti dimensioni:

RE 6 Ø6 mm, spazzole in metalli preziosi, 0.3 watt



Sonda di corrente passiva, spina BNC e Pinza Amperometrica, 10.6 A, P6021A con 125 Turn



Figura 3.1.6

La P6021A è una sonda di corrente che fornisce misurazioni accurate della corrente su un'ampia gamma di frequenze. La sonda consente misurazioni di corrente senza interrompere il circuito del conduttore che trasporta corrente. Le teste schermate della sonda non sono messe a terra se le sue slitte sono nella posizione aperta, eliminando così la messa a terra accidentale del circuito in prova, la terra viene data con la pinza più piccola collegata alla sonda.

La comodità di utilizzare questo strumento sta nello sfruttare il fenomeno dell'induzione elettromagnetica. All'interno della sonda si trovano infatti alcune componenti magnetiche che chiudendosi, circondano il filo elettrico ad anello. È una condizione per la quale la misurazione non avviene né in serie né in parallelo e così si ha il grande vantaggio di non

dover interrompere il circuito. La corrente circolante induce una variazione di campo magnetico rilevato dalla pinza e in questo modo si ricava la grandezza desiderata.

***** HP Agilent 33120A Function generator Signal Funzioni 15 MHz arbitrario

Il generatore HP/Agilent 33120A utilizza la tecnica della sintesi digitale diretta per creare un segnale di uscita stabile e pulito, segnali sinusoidali a bassa distorsione. Inoltre, con una risoluzione di 12 bit e un campionamento di 40 MSa/s, permette di creare qualsiasi forma d'onda, utilizzato per tentare di pulire il segnale di rumore dell'oscilloscopio con una forma d'onda quadra.



Figura 3.1.7

I suoi capi sono stati collegati direttamente al circuito di trasmissione al posto della pila Duracell 4.5V e impostato con i seguenti parametri:

- Frequenza: 1 KHz;
- Tensione: 4.5 V
- ***** Bobine Wireless Circolari:
 - Würth Elektronik Modello: WE-WPCC Wireless Power Transfer Transmitter Coil



Figura 3.1.8

✤ Bobine Wireless Rettangolari:

• TDK – Modello: WR221230-36M8-G



Figura 3.1.9

Taglia

Dimensioni unità bobina	(L)22,0 mm x (L)12,0 mm
Spessore dell'unità bobina	0,87 mm massimo
caratteristiche elettriche	
Conforme a WPC	NO
Potenza di uscita	Piccola potenza (1W-3W)
Induttanza	27,9 μH a 100kHz

• TDK – Modello: WR301025-19M8-G:



Figura 3.1.10

Taglia

Dimensioni unità bobina	(L)30,0 mm × (L)10,0 mm
Spessore dell'unità bobina	0,52 mm massimo

caratteristiche elettriche

Conforme a WPC	NO
Potenza di uscita	Piccola potenza (1W-3W)
Induttanza	12,8 μ H a 100kHz

<u>3.2 Prova sperimentale di bobine Rettangolari</u> <u>Trasmettitore-Ricevitore</u>

3.2.1 Bobine a Contatto

L'obiettivo principale di tali prove è quello di misurare i valori temporali di tensione e corrente, nelle particolari situazioni:

- 1. Transitorio sulla fase iniziale di sbloccaggio;
- 2. Valori a regime durante entrambe le fasi;
- 3. Transitorio sulla fase finale di bloccaggio;

Prima di tutto si è riprodotto su Breadboard il seguente circuito di trasmissione e ricezione che finora avevamo studiato ed analizzato solo a livello teorico:



Figura 3.2.1 Circuito Trasmettitore-Ricevitore Teorico

Inizialmente si è collegata la pila Duracell da 4.5V direttamente al circuito di trasmissione comprendente la bobina WR221230-36M8-G

Si nota come tale bobina di trasmissione sia saldata direttamente su una scheda elettronica con il seguente componente integrato:



Figura 3.2.2

Dal momento che l'oscilloscopio misura la tensione, come primo approccio di analisi del transitorio, si è pensato di mettere una resistenza nota di 1 Ω in serie sul lato del circuito di ricezione e di agganciare direttamente ai capi di tale resistenza le pinze dell'oscilloscopio, come si può vedere dalla seguente figura:



Figura 3.2.3

A questo punto si sono poste a contatto entrambe le bobine e si è effettuata la prima misurazione di transitorio, sia in bloccaggio sia in sbloccaggio. Questo modo, però, non ha permesso una chiara lettura dei valori e della funzione d'onda, di fatto si è ottenuto un segnale di disturbo troppo elevato, allora si è optato per l'utilizzo della sonda di corrente

passiva P6021A. Sulla sua terminazione si trova un controllo che ti permette di selezionare la sensibilità della sonda. L'interruttore ha due posizioni, rispettivamente:

- A destra: $2 \frac{mA}{mV}$; A sinistra: $10 \frac{mA}{mV}$;

Quando il controllo è in posizione 2 $\frac{mA}{mV}$, l'oscilloscopio visualizza 1 mV per ogni 2 mA di corrente nel circuito in prova.

Quando il controllo è in posizione 10 $\frac{mA}{mV}$, l'oscilloscopio visualizza 1 mV per ogni 10 mA di corrente nel circuito in prova.

Per un'ottima installazione si è dovuto connettere alla sonda anche la terra, ed è stato fatto come in figura:



Figura 3.2.4

È possibile aumentare la sensibilità attuale della sonda aumentando il numero di volte che un conduttore lo attraversa. Ad esempio, se il conduttore passa attraverso la sonda due volte la corrente secondaria viene raddoppiata. Supponendo di impostare la sensibilità di terminazione su 2 $\frac{mA}{mV}$ e l'oscilloscopio con una scala verticale di 10 $\frac{mV}{divisione}$, normalmente, ciò comporterebbe l'equivalente di:

$$2 \frac{mA}{mV} * 10 \frac{mV}{divisione} = 20 \frac{mA}{divisione}$$

Tuttavia, se il conduttore è in loop attraverso la sonda due volte, la scala verticale viene divisa per due, risultando l'equivalente di 10 $\frac{mA}{divisione}$.

1. Transitorio sulla fase iniziale di sbloccaggio:

Eseguendo le misurazioni con due avvolgimenti attorno alla sonda, partendo da una configurazione bloccata, e quindi andando a misurare il transitorio temporale di sblocco, in una configurazione con le bobine rettangolari a contatto, si ottiene un grafico come in figura 3.2.8:



Figura 3.2.5 Transitorio sbloccaggio a contatto

Andando ad analizzare accuratamente l'immagine si riportano i valori di:

- Tensione massima: $V_{max} = 50,52 \pm 3\% mV$;
- Scala verticale (divisione): 20 mV;
- Scala orizzontale (divisione): 50 µs;
- Area: 9,794 μVs;

Da qui si può ricavare la corrente, nel nostro caso, avendo una scala verticale di $20 \frac{mV}{divisione}$ ed avendo impostato la sensibilità della sonda su $10 \frac{mA}{mV}$, eseguendo i calcoli si ottiene:

$$20 \ \frac{mV}{divisione} * 10 \ \frac{mA}{mV} = 200 \ \frac{mA}{divisione}$$

Avendo però avvolto il filo attorno alla sonda due volte al fine di avere una sensibilità migliore, dovrò dividere ancora per due, ottenendo quindi 100 $\frac{mA}{divisione}$.

Avendo il picco di tensione a:

$$V_{max} = 50,52 \pm 3\% \ mV$$

contiamo esattamente due divisioni e mezzo, di conseguenza si ottiene una corrente di picco sullo sbloccaggio, dopo circa 75 μs , di:

$$I_{max} = 252,60 \pm 3\% \ mA$$

Corrente di grandezza paragonabile, a meno dell'interferenza del disturbo del segnale, a quella indicata sul datasheet Maxon del motore elettrico.

Avendo acquisito i dati in una schermata che presenta rispettivamente un semiasse positivo e negativo entrambi di 80 mV, avremo una estensione totale di 160 mV su cui c'è un errore di misura intrinseco dello strumento del ±3%, eseguendo i conti si può affermare di avere un errore di ±4,8 mV.

Come si poteva prevedere, al momento dell'avviamento del motore non è presente nessun carico in quanto, lo stesso, non sta ruotando; di conseguenza, non avremo alcuna Forza Elettromotrice di ritorno, proprio per questo motivo la corrente assume valori crescenti in maniera rapida, per poi tornare dopo un certo tempo quella nominale di funzionamento a regime. Infatti, all'aumentare della velocità del motore, la Forza Elettromotrice di ritorno aumenta. Ciò si traduce nella graduale diminuzione della corrente fino a quando avviene il raggiungimento della stabilità della velocità nominale del motore.

2. Valori a regime durante entrambi le fasi:

Il segnale in figura 3.2.9 è fortemente disturbato dal disturbo a 50 Hz, che influenza tutte le reti elettriche, e dal momento che ha un'ampiezza paragonabile al segnale, lo si vede oscillare.

Si è cercato di diminuire il problema con il set interno dell'oscilloscopio e con avvolgimenti attorno alla sonda, ma non è stato sufficiente per eliminarlo totalmente in fase di visualizzazione.

Durante la fase di sbloccaggio avremo una situazione del tipo:



Figura 3.2.6 Valori Regime Bobine a Contatto

Nella fase di sbloccaggio la molla, che sta espandendo, non si oppone, ma aiuta il motore, di conseguenza consumerà meno corrente, riscontrabile difatti dalla figura 3.2.9, con una tensione media di sbloccaggio di:

$$V_{m.sb} = 0,78 \pm 3\% \, mV$$

Da qui si può ricavare la corrente, nel nostro caso, ottenendo quindi 10 $\frac{mA}{divisione}$

$$x = \frac{0.78 \ [mV \cdot divisione]}{1 \ [mV]} = 0.78 \ [divisione]$$

Di conseguenza si ottiene una corrente di media per i valori di regime del motore in sbloccaggio pari:

$$I_{m,sb} = 10 \left[\frac{mA}{divisione} \right] \cdot 0,78 \left[divisione \right] = 7,80 \pm 3\% mA$$



Figura 3.2.7 Valori Regime Bobine a Contatto

Grafico molto simile al precedente, ma con valori medi più grandi, come ci si aspettava, dal momento che in questo caso la forza della molla e l'inclinazione del cuneo generano una forza risultante che si oppone alla traslazione del motore. Questa immagine rappresenta il valore di tensione medio, esprimibile costante durante l'intera fase di bloccaggio. Il motore sta ruotando a velocità angolare nominale, il cuneo solidale al motore che si sta muovendo orizzontalmente con una certa velocità di traslazione entra in contatto con il cuneo solidale al pin, che invece è fermo.

Durante l'intera fase di bloccaggio il motore incontra, oltre che l'attrito fra i cunei, che è costante in entrambe le fasi, anche la forza della molla, che si sta impacchettando.

Durante la fase, che dura per intero 17 secondi, si nota una tensione media di bloccaggio pari a:

$$V_{m,b} = 1,43 \pm 3\% \, mV$$

Eseguendo una semplice proporzione per determinare precisamente in quale divisione ci troviamo:

$$V_m$$
: $x = 5 mV$: 1 divisione

Andando a sostituire il valore numerico di V_{med} ottengo:

$$x = \frac{1,43 \ [mV \cdot divisione]}{5 \ [mV]} = 0,29 \ [divisione]$$

Di conseguenza si ottiene una corrente di media per i valori di regime del motore in bloccaggio di:

$$I_{m,b} = 50 \left[\frac{mA}{divisione} \right] \cdot 0,29 \left[divisione \right] = 14,50 \pm 3\% mA$$

3. Transitorio sulla fase finale del bloccaggio:

Una volta che il motore ha completato l'intera corsa di sbloccaggio, si procede invece con l'analisi del transitorio per quanto concerne il bloccaggio.

Cambiando la polarità dei cavi del motore su breadboard, che consiste sostanzialmente nell'invertire il polo positivo con quello negativo, si ottiene l'inversione della velocità angolare e quindi l'inversione di moto da parte del motore, che permette di far traslare il cuneo rosso, in figura 3.2.11, sull'asse delle ascisse nella direzione del cuneo verde.



Figura 3.2.8 Sistema blocco/sblocco

Quando il cuneo rosso manda in completa compressione la molla del cuneo verde, significa che il processo di blocco si blocco si sta concludendo ed è proprio in questo momento che si è andati a misurare il transitorio temporale di tensione e corrente, sempre nella configurazione con le bobine rettangolari a contatto.

*.jpg

500us RIGOL STOP H 0.00s ÷ 1.80mV D 20m/ Format Storage 15mV 10mV Save Image 5mV 5mV -10mV Vmin1 Vmax1 Vbase1 Freq1 Period 1 Areal Vamp 1 15.89m -610 Bul 100mV 100mV

Si ottiene un grafico come in figura 3.2.12:

Figura 3.2.9 Transitorio bloccaggio



Figura 3.2.10 DC Motor Breaking

Mettendo in confronto il grafico sperimentale del transitorio ottenuto in laboratorio per mezzo dell'oscilloscopio, con il grafico teorico di ciò che accade in un generico motore DC quando sta rallentando per bloccarsi, cioè esattamente il fenomeno fisico del nostro caso, notiamo un andamento iniziale del grafico molto simile (picco inferiore a sinistra), ma al posto di appiattirsi in concomitanza con l'asse delle ascisse, si osserva una nuova impennata della curva (picco superiore a destra).

Questa differenza si spiega a livello pratico, calandosi nella fisica del problema, perché una volta che il motore raggiunge il completo bloccaggio del pin, non è libero di rallentare a vuoto dal momento che invece incontra la battuta di fine corsa del cuneo, che si traduce in una resistenza elevata vista dal motore elettrico, il quale tenta di vincerla richiedendo nuovamente corrente dal circuito. Andando ad analizzare accuratamente l'immagine si riportano i valori di:

- Tensione massima: $V_{max} = 16,89 \pm 3\% mV$;
- Tensione minima: $V_{min} = -12.21 \pm 3\% mV$;
- Scala verticale (divisione): 5 *mV*;
- Scala orizzontale (divisione): 500 µs;
- Area: 4,246 *µVs*;

Da qui si può ricavare la corrente, nel nostro caso, avendo una scala verticale di 5 $\frac{mV}{divisione}$ ed avendo impostato la sensibilità della sonda su 10 $\frac{mA}{mV}$, eseguendo i calcoli si ottiene:

$$5 \frac{mV}{divisione} * 10 \frac{mA}{mV} = 50 \frac{mA}{divisione}$$

Come prima, avendo avvolto il filo attorno alla sonda due volte al fine di avere una sensibilità migliore, dovrò dividere ancora per due, ottenendo quindi 25 $\frac{mA}{divisione}$.

Avendo il picco di tensione a:

$$V_{max} = 16,89 \pm 3\% \, mV$$

E:

$$V_{min} = -12.21 \pm 3\% \, mV$$

Eseguendo una semplice proporzione per determinare precisamente in quale divisione ci troviamo:
$$V_{max}$$
 : $x = 5 mV$: 1 divisione

Andando a sostituire il valore numerico di V_{max} ottengo:

$$x = \frac{16,89 \left[mV \cdot divisione\right]}{5 \left[mV\right]} = 3,378 \left[divisione\right]$$

di conseguenza si ottiene una corrente di picco superiore sul bloccaggio di:

$$I_{max} = 25 \left[\frac{mA}{divisione} \right] \cdot 3,378 \left[divisione \right] = 84,45 \pm 3\% mA$$

Eseguendo la stessa proporzione per determinare ora il picco inferiore:

$$V_{min}$$
 : $x = 5 mV$: 1 divisione

Andando a sostituire il valore numerico di V_{min} ottengo:

$$x = \frac{12,21 \ [mV \cdot divisione]}{5 \ [mV]} = 2,442 \ [divisione]$$

Di conseguenza si ottiene una corrente di picco inferiore sul bloccaggio di:

$$I_{max} = 25 \left[\frac{mA}{divisione} \right] \cdot 2,442 \left[divisione \right] = 61,05 \pm 3\% \, mA$$

Riepilogo fasi bobine a contatto

1. Transitorio sulla fase iniziale di sbloccaggio:

In questo caso si intende una situazione in cui il pin è bloccato, il quale funge da vincolo rigido fra guida e corpo principale della placca. Il motore è fermo e, nel momento in cui si alimenta il circuito, si ottiene un picco di tensione e corrente dovuto all'avviamento. Il frame proposto di figura 3.1.8 è rappresentativo dell'istante catturato.

2. Valori a regime durante la fase di sbloccaggio:

L'intero processo di sbloccaggio, ovvero fino a raggiungere il completo distacco fra i due cunei, dura 17 secondi.

In questo caso si intende una situazione in cui il motore si trova a battuta in fondo corsa, con la molla collegata al pin, totalmente impacchettata, la quale sta iniziando ad espandersi. Così facendo aiuta il cuneo collegato al motore a traslare nella stessa direzione in cui avviene il moto, per cui si registrano valori di potenze minori rispetto alla fase di bloccaggio, in cui la situazione è ribaltata.

3. Valori a regime durante la fase di bloccaggio:

In questo caso si intende una situazione in cui il motore è già avviato e sta ruotando con velocità angolare nominale di funzionamento ed incontra il secondo cuneo collegato con la molla, la quale inizia ad impacchettarsi. L'intero processo di bloccaggio, ovvero fino a quando si raggiunge la battuta di fondo corsa, dura anche in questo caso 17 secondi.

Come ci si aspettava, il valore di potenza in questo caso risulta maggiore in quanto la forza della molla si oppone alla direzione di traslazione del cuneo, collegato al motore.

4. Transitorio sulla fase finale di bloccaggio:

In questo caso si intende l'istante in cui il pin si blocca, Il motore è azionato e, nel momento in cui si alimenta il circuito, si ottiene un picco di tensione e corrente dovuto all'avviamento. Il frame proposto di figura 3.1.8 è rappresentativo dell'istante catturato.

Come si nota dalle seguenti tabelle, abbiamo una potenza maggiore, e di conseguenza un consumo maggiore durante la fase di bloccaggio rispetto alla fase di sbloccaggio precisamente di:

Consumo bloccaggio: $352,50 \pm 6\%$ mWs

Consumo sbloccaggio: 103,43 \pm 6% mWs

Dai dati sperimentali ottenuti, si può confermare che c'è stata una buona progettazione del sistema di blocco/sblocco.

In sintesi avremo:

A CONTATTO	Transitorio Sbloccaggio	Regime Sbloccaggio	Regime bloccaggio	Transitorio Bloccaggio
V [mV]	50,52 ± 4,80	0,78 ± 0,48	1,43 ± 1,20	16,89 ± 1,20
l [mA]	252,60 ± 7,58	7,80 ± 0,23	14,4 ± 0,43	84,45 ± 2,53
P [mW]	12,76 ± 0,77	6,08 ± 0,36	20,9 ± 1,25	1,43 ± 0,09
Consumo [mWs]	١	103,43 ± 6,21	352,50 ± 21,15	\

Tabella 3.2.1.1 Bobine a contatto

3.3 Bobine a diverse distanze

La medesima procedura è stata realizzata per l'acquisizione dei dati sperimentali a uno, due e tre centimetri di distanza fra le due bobine.

3.3.1 Bobine a 1 Centimetro di distanza

1. Transitorio sulla fase iniziale di sbloccaggio:

Eseguendo le misurazioni con due avvolgimenti attorno alla sonda, partendo da una configurazione bloccata, e quindi andando a misurare il transitorio temporale di sblocco, in una configurazione con le bobine rettangolari a un centimetro di distanza, si ottiene un grafico come in figura 3.3.1.1:

TOOT	10	100	8GSa/s	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~~~~/ <mark>_</mark>		
GOL	STOP H	Tuous	8Mpts	Measure	STOP/F		0.00s	
80mV -400	us -300u	s -200	us -1	00us	V	100us	200us	
60mV								
10mV								
					~			
20mV								
		10 M						
20mV								
40mV								
-60mV								
Freq1	Area1	Vmax1	Vmin1					
- Standar die die ook	4.495uv*s	50.15mv	-3.259mV					

Figura 3.3.1.1 Transitorio sbloccaggio

Andando ad analizzare accuratamente l'immagine si riportano i valori di:

• Tensione massima: $V_{max} = 30,15 \pm 3\% mV$;

- Scala verticale (divisione): 20 mV;
- Area: 4,495 μVs;

Da qui si può ricavare la corrente, contiamo esattamente una divisione e mezzo, di conseguenza, si ottiene una corrente di picco sullo sbloccaggio di:

$$I_{max} = 150,75 \pm 3\% \, mA$$

Come si poteva prevedere abbiamo valori di tensione e corrente minore, allontanando progressivamente le due bobine.

2. Valori a regime durante entrambi le fasi:

Durante la fase di sbloccaggio avremo una situazione del tipo:



Figura 3.2.1.2 Valori Regime Bobine a un centimetro di distanza

Durante la fase di sbloccaggio si nota una tensione media pari a:

$$V_{m,sb} = 0,28 \pm 3\% \, mV$$

Di conseguenza si ottiene una corrente di media per i valori di regime del motore in sbloccaggio di:



$$I_{m,b} = 10 \left[\frac{mA}{divisione} \right] \cdot 0,252 \left[divisione \right] = 2,52 \pm 3\% \, mA$$

Figura 3.3.1.2 Valori Regime Bobine ad un centimetro di distanza

Nella fase di bloccaggio si nota una tensione media di:

$$V_{m,b} = 0,38 \pm 3\% \, mV$$

Da qui si può ricavare la corrente media per i valori di regime del motore in bloccaggio pari:

$$I_{m,sb} = 25 \left[\frac{mA}{divisione} \right] \cdot 0,17 \left[divisione \right] = 4,25 \pm 3\% \, mA$$

3. Transitorio sulla fase finale del bloccaggio:

Una volta che il motore ha completato l'intera corsa di sbloccaggio e sta per completare la corsa di bloccaggio, nel momento che il cuneo sta andando a battuta, si procede ad acquisire il frame:



Figura 3.3.1.3 Transitorio bloccaggio 1 Cm

Andando ad analizzare accuratamente l'immagine si riportano i valori di:

- Tensione massima: $V_{max} = 10,58 \pm 3\% mV$;
- Tensione minima: $V_{min} = -7,34 \pm 3\% mV$;
- Scala verticale (divisione): 2 *mV*;
- Area: 2,249 *µVs*;

Da qui si può ricavare la corrente di picco superiore sul bloccaggio di:

$$I_{max} = 10 \left[\frac{mA}{divisione} \right] \cdot 5,290 \left[divisione \right] = 52,90 \pm 3\% \, mA$$

Riepilogo delle grandezze di bobine a 1 Cm di distanza

Come si nota dalle seguenti tabelle, abbiamo una potenza maggiore, e di conseguenza un consumo maggiore durante la fase di bloccaggio rispetto alla fase di sbloccaggio precisamente di:

Consumo bloccaggio: $33,92 \pm 6\%$ mWs

Consumo sbloccaggio: 14,81 \pm 6% mWs

Dai dati sperimentali ottenuti, si può confermare i valori van via via decrescendo allontanando le bobine, inoltre che c'è stata una buona progettazione del sistema di blocco/sblocco.

In sintesi avremo:

1 Cm	Transitorio Sbloccaggio	Regime Sbloccaggio	Regime Bloccaggio	Transitorio Bloccaggio
V [mV]	30,15 ± 4,80	0,28 ± 0,24	0,38 ± 0,12	10,58 ± 0,24
I [mA]	150,75 ± 4,52	2,52 ± 0,08	4,25 ± 0,13	52,90 ± 1,59
P [mW]	4,55 ± 0,27	0,71 ± 0,04	1,62 ± 0,10	0,56 ± 0,03
Consumo [mWs]	١	14,81 ± 0,89	33,92 ± 2,04	١

Tabella 3.3.1.1

3.3.2 Bobine a 2 Centimetri di distanza

1. Transitorio sulla fase iniziale di sbloccaggio:

Eseguendo le misurazioni con due avvolgimenti attorno alla sonda, partendo da una configurazione bloccata, e quindi andando a misurare il transitorio temporale di sblocco, in una configurazione con le bobine rettangolari a due centimetri di distanza, si ottiene un grafico come in figura 3.3.2.1:

	-		a la la company	000	In Samo	~~~~~	~~~~/		
R	lige	L STOP	H 100	us 8M	pts Measu	Ire STOP	P/RUN D	0.00s	
	80mV	-400us	-300us	-200us	-100us	Ť	100us	200us	30
	60mV								
	40mV								
D	20mV								
1	d.							++	1 1
	-20mV								
	-40mV								
	-60mV								
	Free 21.7	q1 Area 73MHz 4.26	1 Vm 8uv*s 69	nax1 Vmi .27mV -21.	n1 18mV				
	1		2 == 100	0.00V 3	≕ 100mV 0.00V	4 100m\ 0.0		2 3 4 5 6 7 1011 12131415	

Figura 3.3.2.1 Transitorio sbloccaggio 2 Cm

Andando ad analizzare accuratamente l'immagine si riportano i valori di:

- Tensione massima: $V_{max} = 25,53 \pm 3\% mV$;
- Scala verticale (divisione): 20 *mV*;
- Area: 4,268 *µVs*;

Da qui si può ricavare la corrente, si ottiene una corrente di picco sullo sbloccaggio di:

$$I_{max} = 127,65 \pm 3\% \, mA$$

Come si poteva prevedere abbiamo valori di tensione e corrente minore, allontanando progressivamente le due bobine.

2. Valori a regime durante entrambi le fasi:



Durante la fase di sbloccaggio avremo una situazione del tipo:

Figura 3.3.2.2 Valori Regime Bobine a 2 Cm

Nella fase di sbloccaggio si nota una tensione media di:

$$V_{m.sb} = 0.53 \pm 3\% \, mV$$

Da qui si può ricavare la corrente media per i valori di regime del motore in sbloccaggio pari:

$$I_{m,sb} = 1,25 \pm 3\% \, mA$$



Figura 3.2.2.2 Valori Regime Bobine a 2 Cm

Durante la fase di bloccaggio si nota una tensione media pari a:

$$V_{m,b} = 0,49 \pm 3\% \, mV$$

Di conseguenza si ottiene una corrente di media per i valori di regime del motore in bloccaggio di:

$$I_{m,b} = 1,62 \pm 3\% \, mA$$

3. Transitorio sulla fase finale del bloccaggio:

Una volta che il motore ha completato l'intera corsa di sbloccaggio e sta per completare la corsa di bloccaggio, nel momento che il cuneo sta andando a battuta, si procede ad acquisire il frame:



Figura 3.3.2.3 Transitorio bloccaggio a 2 Cm

Andando ad analizzare accuratamente l'immagine si riportano i valori di:

- Tensione massima: $V_{max} = 8,14 \pm 3\% mV$;
- Tensione minima: $V_{min} = -8,95 \pm 3\% mV$;
- Scala verticale (divisione): 2 *mV*;
- Area: 1,828 *µVs*;

Da qui si può ricavare la corrente di picco superiore sul bloccaggio di:

$$I_{max} = 10 \left[\frac{mA}{divisione} \right] \cdot 4,479 \left[divisione \right] = 44,79 \pm 3\% mA$$

Riepilogo delle grandezze di bobine a 2 Cm di distanza

Come si nota dalle seguenti tabelle, abbiamo una potenza maggiore, e di conseguenza un consumo maggiore durante la fase di bloccaggio rispetto alla fase di sbloccaggio precisamente di:

Consumo bloccaggio: $20,64 \pm 6\%$ mWs

Consumo sbloccaggio: 17,42 \pm 6% mWs

Dai dati sperimentali ottenuti, si può confermare i valori van decrescendo allontanando le bobine, inoltre che c'è stata una buona progettazione del sistema di blocco/sblocco.

In sintesi avremo:

2 Cm	Transitorio Sbloccaggio	Regime Sbloccaggio	Regime bloccaggio	Transitorio Bloccaggio
V [mV]	25,53 ± 4,80	0,53 ± 0,24	0,49 ± 0,24	8,95 ± 0,48
I [mA]	127,65 ± 3,83	1,25 ± 0,04	1,62 ± 0,05	44,79 ± 1,34
P [mW]	3,26 ± 0,20	0,67 ± 0,04	0,79 ± 0,05	0,41 ± 0,02
Consumo [mWs]	١	17,42 ± 1,05	20,64 ± 1,24	١

Tabella 3.3.2.1

3.3.3 Bobine a 3 Centimetri di distanza

1. Transitorio sulla fase iniziale di sbloccaggio:

Eseguendo le misurazioni con due avvolgimenti attorno alla sonda, partendo da una configurazione bloccata, e quindi andando a misurare il transitorio temporale di sblocco, in una configurazione con le bobine rettangolari a tre centimetri di distanza, si ottiene un grafico come in figura 3.3.3.1:



Figura 3.3.3.1 Transitorio sbloccaggio a 3 Cm

Andando ad analizzare accuratamente l'immagine si riportano i valori di:

- Tensione massima: $V_{max} = 4,28 \pm 3\% mV$;
- Scala verticale (divisione): 5 *mV*;

Si calcola una corrente di picco pari a:

$$V_{max} = 21,40 \pm 3\% \ mA$$

In questo caso si è raggiunto il limite per il quale la potenza trasmessa di $0,09 \ mW$ non è sufficiente per azionare il motore.

In sintesi avremo:

3 Cm	Transitorio	o Sbl	occaggio
V [mV]	4,28	±	0,13
l [mA]	21,40	±	0,64
P [mW]	0,09	±	0,01
Consumo [mWs]		١	

3.4 Risultati Prove S	<u>perimentali</u>

A CONTATTO	Transitorio Sbloccaggio	Regime Sbloccaggio	Regime Bloccaggio	Transitorio Bloccaggio	
V [mV]	50,52 ± 4,80	0,78 ± 0,48	1,43 ± 1,20	16,89 ± 1,20	
l [mA]	252,60 ± 7,58	7,80 ± 0,23	14,4 ± 0,43	84,45 ± 2,53	
P [mW]	12,76 ± 0,77	6,08 ± 0,36	20,9 ± 1,25	1,43 ± 0,09	
Consumo [mWs]	١	103,43 ± 6,21	352,50 ± 21,15	١	
1 Cm	Transitorio Sbloccaggio	Regime Sbloccaggio	Regime Bloccaggio	Transitorio Bloccaggio	
V [mV]	30,15 ± 4,80	0,28 ± 0,24	0,38 ± 0,12	$10,58 \pm 0,24$	
I [mA]	$150,75 \pm 4,52$	$2,52 \pm 0,08$	4,25 ± 0,13	52,90 ± 1,59	
P [mW]	4,55 ± 0,27	0,71 ± 0,04	1,62 ± 0,10	0,56 ± 0,03	
Consumo [mWs]	١	14,81 ± 0,89	33,92 ± 2,04	١	
2 Cm	Transitorio Sbloccaggio	Regime Sbloccaggio	Regime Bloccaggio	Transitorio Bloccaggio	
2 Cm V [mV]	Transitorio Sbloccaggio 25,53 ± 4,80	Regime Sbloccaggio 0,53 ± 0,24	Regime Bloccaggio0,49±0,24	Transitorio Bloccaggio 8,95 ± 0,48	
2 Cm V [mV] I [mA]	Transitorio Sbloccaggio 25,53 ± 4,80 127,65 ± 3,83	Regime Sbloccaggio 0,53 ± 0,24 1,25 ± 0,04	Regime Bloccaggio 0,49 ± 0,24 1,62 ± 0,05	$\begin{array}{r} \text{Transitorio}\\ \textbf{Bloccaggio}\\ 8,95 \pm 0,48\\ 44,79 \pm 1,34 \end{array}$	
2 Cm V [mV] I [mA] P [mW]	Transitorio Sbloccaggio 25,53 ± 4,80 127,65 ± 3,83 3,26 ± 0,20	Regime Sbloccaggio 0,53 ± 0,24 1,25 ± 0,04 0,67 ± 0,04	Regime Bloccaggio 0,49 ± 0,24 1,62 ± 0,05 0,79 ± 0,05	$\begin{array}{r} \text{Transitorio} \\ \text{Bloccaggio} \\ \hline 8,95 \pm 0,48 \\ \hline 44,79 \pm 1,34 \\ \hline 0,41 \pm 0,02 \end{array}$	
2 Cm V [mV] I [mA] P [mW] Consumo [mWs]	Transitorio Sbloccaggio 25,53 ± 4,80 127,65 ± 3,83 3,26 ± 0,20 \	Regime Sbloccaggio $0,53 \pm 0,24$ $1,25 \pm 0,04$ $0,67 \pm 0,04$ $17,42 \pm 1,05$	Regime Bloccaggio 0,49 ± 0,24 1,62 ± 0,05 0,79 ± 0,05 20,64 ± 1,24	$\begin{array}{r} \text{Transitorio} \\ \text{Bloccaggio} \\ 8,95 \pm 0,48 \\ 44,79 \pm 1,34 \\ 0,41 \pm 0,02 \\ \\ \\ \end{array}$	
2 Cm V [mV] I [mA] P [mW] Consumo [mWs] 3 Cm	Transitorio Sbloccaggio 25,53 ± 4,80 127,65 ± 3,83 3,26 ± 0,20 \ Transitorio Sbloccaggio	Regime Sbloccaggio $0,53$ \pm $0,24$ $1,25$ \pm $0,04$ $0,67$ \pm $0,04$ $17,42$ \pm $1,05$	Regime Bloccaggio 0,49 ± 0,24 1,62 ± 0,05 0,79 ± 0,05 20,64 ± 1,24	$\begin{array}{r} \text{Transitorio} \\ \text{Bloccaggio} \\ \hline 8,95 \pm 0,48 \\ \hline 44,79 \pm 1,34 \\ \hline 0,41 \pm 0,02 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	
2 Cm V [mV] I [mA] P [mW] Consumo [mWs] 3 Cm V [mV]	Transitorio Sbloccaggio 25,53 ± 4,80 127,65 ± 3,83 3,26 ± 0,20 \ Transitorio Sbloccaggio 4,28 ± 0,13	Regime Sbloccaggio 0,53 ± 0,24 1,25 ± 0,04 0,67 ± 0,04 17,42 ± 1,05	Regime Bloccaggio 0,49 ± 0,24 1,62 ± 0,05 0,79 ± 0,05 20,64 ± 1,24	$\begin{array}{r} \text{Transitorio} \\ \text{Bloccaggio} \\ \hline 8,95 \pm 0,48 \\ \hline 44,79 \pm 1,34 \\ \hline 0,41 \pm 0,02 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	
2 Cm V [mV] I [mA] P [mW] Consumo [mWs] 3 Cm V [mV] I [mA]	$\begin{array}{rrr} {} {$ \mbox{Sbloccaggio} \\ \hline $ 25,53 & \pm 4,80 \\ \hline $ 127,65 & \pm 3,83 \\ \hline $ 3,26 & \pm 0,20 \\ & & \\ & & \\ \hline $ $ $ 127,65 & \pm 0,20 \\ \hline $ $ $ $ $ 127,65 & \pm 0,20 \\ \hline $ $ $ $ $ $ $ $ $ $ $ $ $ $ $ $ $ $$	Regime Sbloccaggio 0,53 ± 0,24 1,25 ± 0,04 0,67 ± 0,04 17,42 ± 1,05	Regime Bloccaggio 0,49 ± 0,24 1,62 ± 0,05 0,79 ± 0,05 20,64 ± 1,24	Transitorio Bloccaggio 8,95 ± 0,48 44,79 ± 1,34 0,41 ± 0,02 \	
2 Cm V [mV] I [mA] P [mW] Consumo [mWs] 3 Cm V [mV] I [mA] P [mW]	$\begin{tabular}{ c c c c } \hline Transitorio \\ \hline Sbloccaggio \\ \hline 25,53 & \pm 4,80 \\ \hline 127,65 & \pm 3,83 \\ \hline 3,26 & \pm 0,20 \\ \hline \\ $	Regime Sbloccaggio 0,53 ± 0,24 1,25 ± 0,04 0,67 ± 0,04 17,42 ± 1,05	Regime Bloccaggio 0,49 ± 0,24 1,62 ± 0,05 0,79 ± 0,05 20,64 ± 1,24	Transitorio Bloccaggio 8,95 ± 0,48 44,79 ± 1,34 0,41 ± 0,02 \	

Tabella 3.3.3.1 Riepilogo Risultati

Si possono osservare potenze via via decrescenti in ogni sezione, proprio perché allontanando le due bobine il trasferimento wireless di potenza decade velocemente. Mettendo in confronto i consumi alla distanza di 1 Cm e 2 Cm durante la fase a regime dello sbloccaggio, risulta essere maggiore quando siamo a 2 Cm di distanza. Ciò è dovuto al fatto che il tempo necessario per sbloccare interamente il pin è maggiore nel secondo caso, mentre le potenze non sono così diverse.

4. CONCLUSIONI

Dai seguenti istogrammi si può apprezzare la variazione delle singole grandezze per ogni fase, ricavate sperimentalmente per mezzo dell'oscilloscopio:



Figura 4.1 Confronto Fasi a diverse distanze

Innanzitutto, si nota una tendenza dei valori a decrescere in un rapporto inversamente proporzionale alla distanza, si parte da 0 Cm (a contatto in azzurro) fino a 3 Cm (in ocra). Inoltre, si osserva che nella condizione a regime, si hanno valori più grandi in bloccaggio, ossia si considera l'intero processo dall'attimo successivo all'azionamento del motore fino all'attimo antecedente al suo spegnimento. In una condizione in cui il cuneo giallo è solidale al motore e sta avanzando, trova la resistenza della forza della molla, F_{molla} , in direzione discorde con la velocità, v, del secondo cuneo in verde. Come da seguente figura:



Figura 4.2 Regime Bloccaggio

Al contrario, nel momento in cui si inverte il moto del motore, la direzione della velocità del cuneo verde e la forza della molla diventano concordi, di conseguenza il motore elettrico ha un carico inferiore da muovere; perciò, si misurano valori di tensione e corrente inferiori, in una situazione come in figura:



Figura 4.3 Regime Sbloccaggio

A 3 Cm si osserva che le grandezze sono pari a zero, questo perché la distanza è troppo elevata e la potenza trasferita via wireless non è sufficiente per effettuare l'azionamento del motore. Analogo discorso può essere fatto per quanto riguarda i consumi. Questi sono stati ricavati andando a misurare il tempo necessario per concludere la fase di blocco/sblocco.



Figura 4.4 Confronto dei Consumi [mWs]

In conclusione, si può affermare che l'analisi dei dati sperimentali rappresenta una conferma di ciò che si è analizzato sul software Multibody in uno studio a parametri concentrati del sistema blocco/sblocco.

Man mano che aumenta la distanza fra le due bobine, il trasferimento di potenza diminuisce e si osserva anche che la velocità angolare del motore rallenta, di conseguenza aumenta il tempo necessario per completare entrambe le corse di blocco e sblocco. Come da tabella:

Distanza	Tempo Fase
0 Cm	17 [s]
1 Cm	21 [s]
2 Cm	26 [s]
3 Cm	inf. [s]

Tabella 4.1 Durata delle fasi

Tale analisi può essere interpretata come un buon punto di partenza per un'ulteriore ricerca di nuove soluzioni in modo da ottenere potenze più elevate, così da spingersi ad una distanza maggiore di 3 Cm con la prospettiva di effettuare una sperimentazione con un mezzo di trasmissione diverso dal vuoto. Avendo infatti basse potenze, la frequenza del sistema sarà elevata. Si dovrà quindi analizzare il limite per il quale non si creino danni nei tessuti del paziente. A tal scopo potrebbe essere utile stampare un nuovo prototipo con un coperchio non totalmente in Acciaio AISI 316 LVM, ma con un differente materiale biocompatibile e non ferromagnetico, nella zona dell'alloggiamento della bobina, così da evitare che le correnti parassite si sviluppino e aumentarne l'efficienza di trasmissione. In questo modo si potranno eseguire nuove prove sperimentali con il coperchio chiuso, situazione più simile alla realtà.

BIBLIOGRAFIA

- *1.* Laverghetta S. Thomas, *Microwaves and Wireless Simplified*, 2nd ed.- (*The Artech House microwave library*)
- 2. Benedetto Sergio, Biglieri Ezio, *Principles of Digital Transmission with Wireless Applications* - Jack Keil Wolf
- 3. Tse, Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, 4th ed. Cambridge University Press
- 4. Cripps C. Steve, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, 2nd ed. (*The Artech House microwave library*)
- IUPAC, Compendio di Terminologia Chimica, 2° ed. (il "Libro D'oro). Compilato da AD McNaught e A. Wilkinson. Pubblicazioni scientifiche Bleckwell, Oxford (1997). Versione Online (2019-) creata da SJ Chalk. ISNB 0-96788550-9-8. https://doi.org/10.1351/goldbook.
- 6. Linea A. www.regione.piemonte.it/europa2020
- Biomechanics of Locked Plates and Screws Orthop Trauma, Volume 18, Numer 8, September 2004, Kenneth A. Egol, MD, Erik N. Kubiak, MD, Eric Fulkerson, MD, Frederick J. Kummer, PhD, and Kennet J. Kovul, MD
- 8. Laboratory of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles Basics Concept-Vincenzo Cirimele, RTDA, Department of Energy
- 9. Laboratory of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles Design *Vincenzo Cirimele, RTDA, Department of Energy*

- 10. Laboratory of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles Component and Materials, *Vincenzo Cirimele, RTDA, Department of Energy*
- 11. Laboratory of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles Preliminary Design, Analytical formulas, *Vincenzo Cirimele, RTDA, Department of Energy*
- 12. Clayton R. Paul, Inductance, Loop and Partial, IEEE; 1st ed., John Wiley & Sons
- 13. Trasmissione di Energia Senza Fili Stefano Maggi Fonte: Wikipedia.org

SITOGRAFIA

1. <u>https://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial</u>