

## Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali A.a. 2021/2022 Sessione di Laurea Novembre/Dicembre 2022

# Studio e realizzazione di induttori a base tessile per l'alimentazione energetica di dispositivi wearable.

Relatori:

Ada Ferri

Correlatori:

Alessandro Sanginario

Giuseppe Ballesio

Paolo Motto Ros

Candidato:

Luca Accollo

## Abstract

Gli smart textiles rappresentano un'importante innovazione tecnologica in grado di congiungere due ambiti apparentemente distinti come quello tessile e quello elettronico. Grazie alla loro capacità di poter captare, immagazzinare ed elaborare dati, hanno attirato grande attenzione durante l'ultimo decennio. Nonostante non ci siano dubbi sulle funzionalità e potenzialità dei tessuti intelligenti, alcune limitazioni si riscontrano nella modalità con la quale poter fornire loro l'apporto energetico necessario per un corretto funzionamento. I requisiti da soddisfare inoltre non sono solo di carattere energetico ma anche il comfort di indosso è di fondamentale importanza, essendo buona parte di essi impiegata in campo sportivo e militare oltre che in ambito medicale per il monitoraggio di parametri fisiologici o biometrici.

Nel seguente elaborato è stata descritta l'esperienza del candidato il quale, basandosi sulla letteratura ad oggi disponibile, ha scelto di riprodurre differenti modelli di spirali a base tessile con l'obiettivo di ottenere dei potenziali ricevitori per un sistema WPT che possa alimentare dispositivi indossabili. Per la realizzazione dei campioni sono state impiegate le tecniche del taglio laser e della ricamatura. Le spirali ottenute sono state successivamente sottoposte ad una caratterizzazione delle proprietà elettriche. Particolare attenzione è stata riservata all'osservazione della dipendenza dei risultati dalla tecnica produttiva e dai parametri geometrici delle spirali. E' stato quindi possibile confrontare i risultati ottenuti con quelli disponibili in letteratura.

Infine, i campioni sono stati testati in un set up con cui si è cercato di riprodurre un sistema WPT per testare l'effettivo funzionamento delle spirali a base tessile, riscontrando alcune problematiche con il circuito del sistema di trasmissione. Per concludere sono state fatte le dovute considerazioni in base agli esiti ottenuti e alcune riflessioni rispetto alle possibili vie per poter ottimizzare questa innovativa tecnologia ancora in fase di sviluppo.

## Indice

Introduzione	
1. Ricarica Wireless	
1.1 Tipologie di ricariche wirele	is
1.2 Induzione elettromagnetica e	principio di funzionamento 4
1.2.1 Fattore k	
1.2.2 Fattore Q	
2. Processi produttivi delle spir	ali 12
2.1. Geometria delle spirali	
2.2. Spirali RX: progettazione e r	ealizzazione15
2.2.1. Spirali laser cut	
2.2.2. Spirali ricamate	
3. Caratterizzazione delle prop	ietà elettriche 27
3.1 Misurazione dell'impedenza	
3.2 Misurazione di R, L e X	
4. Test con sistema WPT	
4.1. Sistema TX	
4.2. Set up di supporto	
4.3. Discussione dei risultati	
Conclusioni	
Bibliografia	
Sitografia	

V

## Introduzione

Il costante progresso tecnologico, spinto dal desiderio dell'uomo di ampliare la propria conoscenza per soddisfare bisogni sempre più esigenti, conduce quotidianamente a nuovi studi ed a conseguenti scoperte. A partire dalla metà dello scorso secolo, un'importante azione di ricerca scientifica è stata avviata nei confronti dello sviluppo degli *smart textiles*, tessuti in grado di svolgere funzioni più complesse anziché avere esclusivamente un valore estetico. Infatti, la loro peculiarità è la capacità di interagire con l'ambiente esterno salvando, elaborando e condividendo dati. Affinché le funzioni citate possano essere svolte, uno dei requisiti fondamentali nella realizzazione dei dispositivi indossabili è l'impiego di fibre o filati elettricamente conduttivi così da rendere possibile il trasporto di informazioni sottoforma di corrente elettrica.

A seconda della funzione che sono in grado di svolgere gli smart textiles possono quindi essere classificati in passivi, attivi o proattivi [1]. Nel primo caso si fa riferimento alla prima generazione di tessuti intelligenti, in grado di rilevare variazioni di determinati parametri o stimoli provenienti dall'esterno. Per quanto riguarda gli attivi e i proattivi, essi presentano strutture più articolate e sono in grado di formulare una risposta a tali stimoli; nella seconda tipologia i tessuti sono in grado di adattarsi alle nuove condizioni che si manifestano modificando alcune loro proprietà di carattere strutturale o funzionale.

Nel corso degli anni l'attenzione è stata focalizzata prevalentemente sul carattere funzionale di questa nuova tecnologia indossabile. Tuttavia, una delle questioni più frequenti che emerge relativa ai tessuti smart riguarda il loro sostentamento energetico. Ad oggi, buona parte dei prodotti disponibili sul mercato che sfrutta i tessuti intelligenti viene alimentata con metodi tradizionali come le batterie al litio o collegamenti fisici via cavo tra fonte e dispositivo. Sistemi di alimentazione di questo genere, seppur efficienti, risultano essere limitanti in termine di applicazioni. Quando i dispositivi tessili vengono impiegati in ambiti come quello sportivo, in cui uno dei requisiti fondamentali è il comfort dell'atleta, le caratteristiche necessarie di cui deve essere dotata l'alimentazione sono obbligatoriamente leggerezza e flessibilità.

Numerosi studi sono stati condotti in quest' ultimo decennio per trovare una soluzione adeguata che consenta contemporaneamente un corretto funzionamento del dispositivo e un'alimentazione elettrica leggera ed integrata. I fattori determinanti che hanno spinto ad una ricerca di alternative a quelle tradizionali sono principalmente i requisiti da rispettare legati alle applicazioni nelle quali verranno adoperati i dispositivi. Come dimostrano i documenti e i report presenti in letteratura, una possibile via per affrontare le limitazioni dei classici metodi di ricarica è quella di cercare di miniaturizzare il più possibile le fonti energetiche.

Sono state quindi testate alcune tecniche di energy harvesting attraverso celle solari [2], generatori termoelettrici [3] o nanogeneratori [4].

Purtroppo, per via della loro natura intermittente e la loro rigidezza, seppur avente minor incidenza sul comfort dell'indossatore rispetto alle normali batterie, anche in questo caso sono state riscontrate alcune limitazioni nel loro impiego con i tessuti smart.

Ad oggi, quello che affermano i risultati ottenuti dalle ricerche è che una delle tecniche più promettenti che soddisfa i requisiti richiesti e consente di alimentare correttamente i tessuti smart è la ricarica wireless tramite i sistemi Wireless Power Transfer (WPT). Tale soluzione consente il trasferimento di energia al dispositivo senza l'impiego di alcun collegamento fisico tra fonte e utilizzatore, sfruttando unicamente l'azione di un campo elettromagnetico. Il passaggio di energia avviene da una spirale di trasmissione, tipicamente realizzata in materiale metallico, verso una spirale di ricezione che in questo particolare caso sarà di natura tessile per potersi integrare al meglio all'interno del tessuto ospitante.

Come riportato nel documento di Sun et al. [6], al momento esistono tre diverse tipologie di spirali a base tessile che possono essere impiegate in un sistema di ricarica wireless. Esse si differenziano per la tecnica con la quale vengono prodotte: taglio laser di un tessuto conduttivo, ricamatura direttamente sul tessuto ospitante sfruttando un filo conduttivo, oppure stampaggio del profilo utilizzando inchiostri conduttivi. Nei risultati riportati all'interno del medesimo articolo [6] è stato evidenziato come l'ultima delle tre tecniche produttive elencate sia quella più delicata da un punto di vista dell'utilizzo. Infatti, trattandosi di spirali realizzate con pigmenti stampati, quando il tessuto ospitante è soggetto a deformazioni si possono innescare delle rotture sul profilo della spirale incapace di deformarsi in maniera concorde col substrato. Questo fenomeno può avvenire in diversi punti della spirale interrompendone la continuità e incrementando quindi il suo valore di resistenza elettrica.

Pertanto, il lavoro di tesi è stato incentrato principalmente sulla realizzazione di spirali conduttive a base tessile sfruttando la tecnica del taglio laser e del ricamo. Nel corso dei capitoli saranno descritte le operazioni legate alla produzione dei campioni svolte presso le aziende *Ballesio F.lli s.r.l.* e *Ovac*. Saranno inoltre presentati i risultati ottenuti dalla caratterizzazione delle proprietà elettriche dei campioni e gli esiti dei test svolti presso il Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni (DET) del Politecnico di Torino.

## **Capitolo 1**

## **Ricarica Wireless**

Lo sviluppo di dispositivi elettronici indossabili ha portato ad un'evoluzione delle modalità di interazione tra l'uomo e l'ambiente che lo circonda. Tuttavia, trattandosi di dispositivi mobili, la fonte energetica di alimentazione di tali dispositivi è tutt'oggi oggetto di discussione. Essendo gli smart textiles un'espressione concreta del progresso tecnologico raggiunto dall'essere umano, altrettanto all'avanguardia deve necessariamente essere il trasferimento di energia al dispositivo per massimizzarne l'efficienza.

Nel presente capitolo verrà illustrato il principio di funzionamento della ricarica wireless, tecnica che come dimostrato dagli studi soddisfa i requisiti richiesti e sulla quale una buona parte degli studiosi si sta concentrando per ottimizzarne il funzionamento. Verranno descritte le differenti tipologie ad oggi disponibili e il fenomeno fisico che ne sta alla base, facendo riferimento a quelle maggiormente impiegate come gli accoppiamenti induttivi e risonanti.

#### 1.1 Tipologie di ricariche wireless

Sono state messe a punto svariate tecniche relative al trasferimento wireless di energia. Esse vengono classificate in sistemi di ricarica basati su accoppiamenti non radiativi e in sistemi di ricarica radiativi. Appartengono alla prima categoria le seguenti tipologie: accoppiamento induttivo, accoppiamento magnetico risonante e accoppiamento capacitivo.

Il trasferimento diretto di potenza attraverso la tecnica del beamforming e il trasferimento non diretto di potenza, entrambi basati sulle radio frequenze, costituiscono invece il secondo insieme delle tipologie di ricariche wireless attualmente in uso.



Figura 1.1. Categorie delle tecnologie di ricarica wireless [6].

Tutti i sistemi di ricarica wireless presenti nello schema di Fig. 1.1 operano trasferendo energia da un emettitore ad un ricevitore. Il suo compito, in sintesi, è quello di convertire l'energia fornita dall'emettitore in corrente elettrica, facendo sì che il dispositivo elettronico venga alimentato. Nel caso in cui i dispositivi da alimentare siano dei tessuti smart, le tecniche utilizzate sono quelle basate sull'accoppiamento induttivo o, in alcuni casi, sull'accoppiamento risonante di spirali conduttive. La spirale di ricezione, dovendo essere integrata nel dispositivo stesso, è necessariamente realizzata con materiale di natura tessile, il quale deve esibire un'adeguata conduttività.

#### 1.2 Induzione elettromagnetica e principio di funzionamento

La modalità di ricarica che sfrutta un accoppiamento induttivo e quella che sfrutta un accoppiamento risonante presentano molteplici analogie, essendo la risonanza elettromagnetica un particolare caso di induzione elettromagnetica. In entrambe le tipologie gli accoppiamenti a cui si fa riferimento sono quelli composti tipicamente da spire, spirali o bobine in cui una svolge il ruolo di trasmettitore e l'altra di ricevitore.

La differenza tra un sistema WPT induttivo e uno risonante riguarda la distanza alla quale è possibile ricaricare i dispositivi elettronici. Nel caso in cui l'accoppiamento sfrutta l'induzione elettromagnetica la spirale di ricezione non deve trovarsi a più di un paio di millimetri – tipicamente nell'ordine dei 10 mm circa - dalla spirale di trasmissione. I dispositivi devono quindi stare pressoché a contatto con l'emettitore wireless e possono essere utilizzati durante la fase ricarica a patto che le due spirali rimangano in una posizione reciproca corretta, fattore di primaria importanza nella ricarica wireless. Per sopperire a queste limitazioni, molte aziende tra cui ad esempio Samsung hanno lavorato sul fenomeno della risonanza magnetica [I]. Un sistema di ricarica WPT risonante consente non solo di alimentare più dispositivi contemporaneamente ma anche di farlo ad una distanza maggiore rispetto al caso induttivo.

Proseguendo, un processo di ricarica wireless induttivo o risonante è riassumibile in alcuni passaggi chiave. Anzitutto la spirale di trasmissione invia dei segnali periodici nell'ambiente circostante che hanno lo scopo di captare la presenza di uno o più dispositivi compatibili, dotati quindi di una spirale di ricezione. L'area di interesse del segnale è variabile in funzione della tipologia del sistema di ricarica wireless. Rilevata la presenza di una spirale di ricezione ha inizio l'induzione elettromagnetica, fenomeno scoperto e tramutato in legge dal fisico inglese Michael Faraday.

Per comprendere al meglio il funzionamento della ricarica wireless è opportuno dedicare un breve approfondimento ad una delle più importanti scoperte della fisica. Gli esperimenti ideati e realizzati da Faraday hanno dimostrato la possibilità di generare una corrente, chiamata corrente indotta, all'interno di un circuito in cui non è presente alcun generatore elettrico. Ciò che produce questo effetto è la presenza di un campo magnetico variabile nel tempo, all'interno del quale è immerso il circuito. È più corretto affermare che il campo magnetico variabile si comporta come una sorgente di forza elettromotrice (f.e.m.) che viene indotta nel circuito privo di alimentazione energetica. In base alla legge di Ohm per un circuito chiuso:

$$V = R \cdot i \tag{1.1}$$

la presenza della forza elettromotrice  $\mathscr{E}_i$  dà luogo ad una corrente indotta, come espresso dalla legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica:

$$\mathscr{E}_{i} = \oint E_{i} \cdot ds = -\frac{d\Phi(B)}{dt}$$
(1.2)

Faraday riuscì a racchiudere all'interno di un'unica formula i risultati dei suoi esperimenti.

La forma con cui è stata riportata nell'Eq. (1.2) sfrutta la definizione secondo cui la forza elettromotrice è data dall'integrale del campo elettrico E lungo una linea chiusa, per poi eguagliarla alla variazione temporale del flusso magnetico. La presenza del segno meno nella (1.2) è dovuta alla legge di Lenz: l'effetto della forza elettromotrice indotta è sempre tale da opporsi alla causa che ha generato il fenomeno.

Se R è la resistenza del circuito, in esso circola la corrente:

$$i = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi(B)}{dt}$$
(1.3)

In un sistema di ricarica wireless le interazioni elettromagnetiche tra le componenti conduttive sono le stesse verificatesi tra i circuiti e i magneti impiegati da Faraday nei suoi esperimenti.

Segue la descrizione di un generico processo di ricarica wireless basato su un accoppiamento induttivo di due spire conduttive raffigurato in Fig. 1.2. Potendo considerare una spira come una spirale costituita da un unico avvolgimento, il principio di funzionamento che verrà illustrato sarà il medesimo per un sistema WPT costituito da un accoppiamento di spirali conduttive.



Figura 1.2 - Rappresentazione schematica di un sistema WPT costituito da due spire [II].

La spira trasmittente è percorsa da una corrente generata da una fonte energetica alla quale è connessa in maniera diretta e fisica.

Come dimostrato circa due secoli fa, in primis dal fisico danese Hans Christian Ørsted e successivamente dai fisici francesi Jean-Baptiste Biot e Félix Savart, un tratto di circuito percorso da corrente, in questo caso rappresentato dalla spira TX, è in grado di generare un campo magnetico.

La condizione necessaria affinché si verifichi il fenomeno dell'induzione elettromagnetica è che il campo magnetico generato dal circuito trasmettitore sia di natura variabile. Purché accada ciò, il campo magnetico dev'essere generato da una corrente alternata e non costante nel tempo. Di conseguenza, la corrente che scorre all'interno della spira TX può provenire direttamente da una qualsiasi fonte energetica che opera come un generatore di tensione di tipo AC, come nel caso dello schema di Fig. 1.2, oppure, se il generatore di tensione è di tipo DC, è necessario l'intervento di un dispositivo chiamato *inverter* in grado di trasformare la corrente continua in alternata. In aggiunta, se un campo magnetico è di natura variabile anche il flusso del medesimo campo concatenato ad una certa superficie presenterà la stessa caratteristica. Applicando quanto appena descritto al caso specifico dell'accoppiamento di spire conduttive, ogni qualvolta il flusso del campo magnetico concatenato alla spira di ricezione varia nel tempo si registra nella stessa spira una forza elettromotrice indotta data dall'opposto della derivata del flusso nel tempo.

Percependo la differenza di potenziale  $V = \mathscr{E}_i$ , gli elettroni contenuti nella spirale di ricezione vengono attivati passando da uno stato di quiete ad uno stato di moto.

Il flusso di elettroni generatosi altro non è che una corrente AC che se convertita in DC da un raddrizzatore permette di alimentare i dispositivi elettronici.

Nel caso in cui il sistema di ricarica WPT sfrutti il fenomeno di risonanza magnetica è necessario che le spirali che formano l'accoppiamento abbiano la stessa frequenza di risonanza; in tal modo sarà possibile per la spira di ricezione raccogliere e convertire l'energia del campo magnetico.

I sistemi di ricarica wireless possono anche essere schematizzati come dei circuiti RLC. Di seguito in Fig 1.3 è riportato uno schema in cui è raffigurato un generico sistema WPT in cui sono visibili i componenti che costituiscono il circuito risonante: trasmettitore (TX) e ricevitore (RX).



Figura 1.3 - Schematizzazione di un sistema di ricarica WPT [9].

Le due spirali TX e RX sono rappresentate dagli induttori indicati con  $L_{TX}$  e  $L_{RX}$  ai quali sono collegati in serie le rispettive resistenze equivalenti rappresentate da  $R_{eTX}$  e  $R_{eRX}$ , e le loro capacità parassite  $C_{pTX}$  e  $C_{pRX}$ . I condensatori a serbatoio risonante  $C_{rTX}$  e  $C_{rRTX}$  sono invece disposti in parallelo con le spirali TX e RX. Sono gli elementi del circuito che hanno il compito di sintonizzare le spirali TX e RX e far sì che i due circuiti, di trasmissione e di ricezione, risuonino alla stessa frequenza operativa. Il carico, nonché il dispositivo alla quale fornire energia elettrica, è rappresentato da  $R_{Load}$  e viene alimentato da una corrente continua raddrizzata proveniente dal circuito di ricezione.

La presenza delle resistenze equivalenti  $R_{eTX}$  e  $R_{eRX}$ , collegate in serie agli induttori  $L_{TX}$  e  $L_{RX}$  provoca la dissipazione di una frazione di potenza che si verifica durante lo scorrimento di correnti alternate all'interno delle spirali TX e RX. Il risultato finale è una conseguente riduzione dell'efficienza totale del sistema.

Oltre a ciò, in figura è possibile osservare la presenza di due dispositivi fondamentali che consentono la conversione della corrente da continua ad alternata e viceversa. Alla parte sinistra del circuito, rappresentante la spirale di trasmissione TX, è collegato un inverter che ha la funzione di convertire la corrente da DC ad AC, in grado quindi di generare un campo magnetico alternato.

Nel caso in cui la tecnologia di WPT sia a induzione viene utilizzato un inverter a mezzo ponte o a ponte intero, mentre nella tecnologia a risonanza magnetica la corrente viene indotta attraverso un amplificatore di potenza.

Per alimentare in modo corretto i dispositivi è necessaria la corrente continua, ed è per questo che nella parte destra del circuito di ricezione è presente un driver. Tale dispositivo è il duale dell'inverter il cui scopo è raddrizzare la corrente convertendola da alternata a continua.

Come mostrato nello schema di Fig. 1.3 le spirali formanti l'accoppiamento induttivo svolgono il ruolo di induttori. La loro induttanza rappresenta uno dei parametri fondamentali di cui è necessario tenere conto per "accordare" correttamente il sistema WPT.

Tipicamente il valore di induttanza viene calcolato sperimentalmente anche se non è l'unica via possibile. Infatti, l'ingegnere elettrico statunitense Harold Alden Wheeler fu in grado di ricavare una formula con cui poter calcolare analiticamente l'induttanza di una spirale conduttiva in maniera approssimativa.

La formula generale fa riferimento ad una spirale realizzata con materiali altamente conduttivi come il rame e presenta la forma seguente [6]:

$$L = \frac{r^2 \cdot n^2}{(8r + 11w)}$$
(1.4)

dove  $r = ((D_i/25.4) + w)/2$  è il raggio al centro degli avvolgimenti,  $w = ((d_w/25.4)+(s/25.4))*n$  è la larghezza degli avvolgimenti, n è il numero di avvolgimenti, d<sub>w</sub> è il diametro del filo conduttivo con cui è stata realizzata la spirale (mm), s è lo spazio presente fra due avvolgimenti adiacenti (mm) e  $D_i$  è il raggio interno della spirale (mm).

Nel caso dei sistemi WPT per tessuti smart, trattandosi di spirali realizzate con materiale tessile, è stato necessario apportare alcune opportune modifiche alla formula originale.

Sono riportati due esempi di formule di Wheeler derivate nel lavoro di Li et al. [9], adattate a due spirali serigrafate con inchiostri conduttivi aventi geometria circolare la prima, e quadrata la seconda. Seppur riferite alla tipologia di spirale più delicata in termini di utilizzo, le seguenti formule approssimano più realisticamente il valore di induttanza.

$$L_{circular} = \frac{\mu_0 N^2 d_{avg}}{2} \left( ln \left( \frac{2.46}{\Delta} \right) + 0.2\Delta^2 \right)$$
(1.5a)

$$L_{square} = \frac{1.27\mu_0 N^2 d_{avg}}{2} \left( ln\left(\frac{2.07}{\Delta}\right) + 0.18\Delta + 0.13\Delta^2 \right)$$
(1.5b)

dove  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica nel vuoto, N il numero degli avvolgimenti della spirale,  $d_{avg} = (d_{ext} + d_{inner})/2$  è il diametro medio della spirale, e  $\Delta = (d_{ext} - d_{inner})/(d_{ext} + d_{inner})$  il rapporto di riempimento.

Lo studio intrapreso da Wheeler ha consentito di sviluppare una via analitica alternativa a quella puramente pratica che permette calcolare approssimativamente il valore di induttanza applicando una formula matematica, noti i parametri geometrici della spirale.

L'induttanza delle spirali è solamente uno dei numerosi parametri da cui dipende un sistema WPT. L'efficienza con cui l'energia viene trasmessa dalla spirale TX a quella RX può risentire dell'influenza di vari fattori tra cui la frequenza di risonanza, il rapporto tra le dimensioni delle spirali, l'impedenza dell'avvolgimento, i componenti AC e DC, le correnti parassite della spirale e l'effetto pelle<sup>1</sup>.

Quelli che influiscono maggiormente sull'efficienza del sistema sono però il fattore di accoppiamento k, riportato anche nel diagramma schematizzato in Fig. 1.3, e il fattore di qualità Q. Verranno entrambi discussi nel seguente paragrafo.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> effetto pelle: tendenza di una corrente elettrica alternata a distribuirsi in modo non uniforme all'interno del conduttore, presentando un valore di densità maggiore sulla superficie ed inferiore all'interno.

#### 1.2.1 Fattore k

Il coefficiente di accoppiamento k è un indice relativo alla posizione reciproca delle spirali formanti l'accoppiamento e può assumere valori compresi tra 0 e 1. Il grafico riportato in Fig. 1.4 mostra la dipendenza di k dal grado di allineamento delle due spirali e dalla loro distanza. Per k=1 si ha il massimo accoppiamento che si ottiene quando tutte le linee di flusso magnetico dell'avvolgimento primario si concatenano con quello secondario. Tale risultato è raggiungibile quando le spirali formanti l'accoppiamento presentano la stessa geometria e gli stessi parametri dimensionali. Pertanto, è opportuno tenere conto di questo durante la produzione dei campioni RX. Maggiore è il valore di k e maggiore è l'efficienza del sistema WPT.



*Figura 1.4 -* Il fattore di accoppiamento k in funzione della distanza tra le due spirali e del grado di dislocamento [10].

Come per i valori di induttanza, anche in questo caso è possibile calcolare approssimativamente il valore di k in maniera analitica [9]:

$$k \approx \frac{d_{extTX}^2 d_{extRX}^2}{\sqrt{d_{extTX} d_{extRX}} \left(\sqrt{D^2 + max(d_{extTX}, d_{extRX})^2}\right)^3}$$
(1.6)

dove D è il valore della distanza tra i centri delle due spirali TX e RX e  $d_{extTX}$  e  $d_{extTX}$  sono i diametri esterni delle rispettive spirali.

#### 1.2.2 Fattore Q

A differenza di ciò che si studia negl'induttori ideali dove si ha una conservazione totale dell'energia prodotta dal campo magnetico, nel caso reale si possono verificare delle perdite e una frazione di energia può essere dissipata.

Le cause possono essere l'effetto pelle che si manifesta all'interno della spirale o le correnti parassite dovute alla variabilità del campo magnetico. Per tenere conto di tutti i fenomeni dissipativi è stato istituito un coefficiente di qualità indicato con Q e calcolabile mediante la seguente formula [9]:

$$Q = \frac{\omega L - \omega (R_e^2 + \omega^2 L^2) C_p}{R_e} \approx \frac{\omega L}{R_e}$$
(1.7)

dove  $\omega$  è la frequenza operativa, L l'induttanza della spirale e R<sub>e</sub> è il valore della resistenza equivalente che tiene conto della resistenza DC, dell'effetto pelle, e dell'effetto di prossimità<sup>2</sup>.

Così come vale con il fattore k, più grande è il valore di Q maggiore sarà l'efficienza del sistema WPT.

Nei prossimi capitoli verrà presentato il lavoro svolto dal candidato concentratosi principalmente sulla produzione delle spirali conduttive a base tessile realizzate con la tecnica del taglio laser e del ricamo. Saranno messe in luce le maggiori difficoltà riscontrate e gli accorgimenti adottati per tentare di arrivare all'obiettivo finale nonché il funzionamento delle spirali. Dopodiché verranno illustrati i metodi di caratterizzazione impiegati per la valutazione delle proprietà elettriche dei campioni. Per concludere saranno descritti i test svolti in laboratorio. Tutte le misurazioni hanno avuto luogo presso il DET del Politecnico di Torino e sono state condotte per valutare le prestazioni delle spirali al variare dei parametri geometrici e della distanza dalla spirale di trasmissione. I risultati ottenuti saranno discussi in maniera critica per poi trarre le conclusioni finali sul lavoro svolto.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> effetto di prossimità: se nelle vicinanze di un conduttore percorso da corrente alternata è presente uno o più conduttori anch'essi percorsi da corrente, come nel caso di una spirale in cui gli avvolgimenti possono essere considerati come conduttori distinti per tratti limitati, la distribuzione della corrente all'interno del conduttore di riferimento sarà limitata a regioni più piccole.

## **Capitolo 2**

### Processi produttivi delle spirali

Come anticipato nel capitolo introduttivo, le tecniche impiegate per la realizzazione delle spirali conduttive a base tessile sono state il taglio laser, partendo da un tessuto conduttivo, e il ricamo impiegando un filo conduttivo. Prima di procedere con la descrizione dettagliata del lavoro svolto, nel seguente paragrafo saranno illustrate le motivazioni che hanno portato alla scelta di una geometria circolare. Le scelte dimensionali delle spirali RX sono state effettuate facendo riferimento sia ai dati di letteratura, sia ai valori di quella di trasmissione impiegata nelle prove finali che verranno descritte nel quarto capitolo. E' stato quindi tenuto conto del fattore Q e del fattore k descritti nel capitolo precedente.

#### 2.1. Geometria delle spirali

Volendo preservare la flessibilità degli indumenti, anche la geometria del profilo delle spirali assume un ruolo di primaria importanza. In letteratura sono presenti articoli che trattano di differenti spirali a base tessile impiegate per un trasferimento energetico e si differenziano non solo per la geometria ma anche per la modalità con cui operano nel sistema di ricarica.

Per citare un esempio, nel documento di Chang et al. [11] vengono descritti dei particolari sistemi di appendini e cassetti per la ricarica wireless di tessuti smart. In questo caso le spirali fungenti da ricevitori presentano una forma quadrata, geometria contraddistinta da un processo produttivo più semplice rispetto ad altre. Altri esempi di spirali che esibiscono geometrie poligonali sono già stati impiegati all'interno di sistemi WPT. Quello che però è emerso nel corso degli studi, è che la geometria circolare è la forma che presenta maggiori vantaggi sia in termini di flessibilità che, soprattutto, in termini di prestazioni.

Li et al. [9] hanno condotto un esperimento che ha mostrato l'influenza della geometria della spirale sul fattore di qualità Q. Sono state impiegate due spirali aventi gli stessi valori di d<sub>ext</sub> (138 mm), d<sub>inner</sub> (53 mm), e s (2 mm), realizzate anche in questo caso con la tecnica dello screen printing, processo produttivo più rapido rispetto al taglio laser o al ricamo. Il valore di resistenza superficiale  $R_{sheet}$ = 24 m $\Omega/\Box$  è stato fornito dal produttore. La relazione tra N e Q, riportata nel grafico di Fig. 2.1, mostra che entrambe le spirali analizzate presentano il massimo valore di Q per un numero di avvolgimenti N pari a 6. Nel caso della spirale quadrata il valore di  $Q_{max}$  è circa 35 mentre per la bobina circolare  $Q_{max}$  vale quasi 40.



**Figura 2.1.** Andamento del fattore di qualità Q di due spirali conduttive (una quadrata e una circolare) stampate con una pasta conduttiva avente resistenza superficiale pari a 24 m $\Omega$ / $\Box$ , in funzione del numero di avvolgimenti [9].

Un secondo fattore determinante nella scelta del design dei campioni, è stato prendere come modello di riferimento una spirale di trasmissione prodotta da TDK che presenta caratteristiche comuni con buona parte delle spirali TX presenti sul mercato tipicamente impiegate per la ricarica wireless dei dispositivi elettronici. Il codice costruttore che identifica la spirale è WT505090-10K2-A11-G. E' costituita da 10 avvolgimenti in ferrite flessibile isolati elettricamente e avvolti senza spazio libero tra uno e l'altro. Il diametro interno misura  $20.0 \pm 1.0$  mm mentre quello esterno  $43.0 \pm 1.0$  mm. Lo spessore dei filamenti a sezione circolare misura  $2.08 \div 2.51$  mm. In Fig. 2.2a si può osservare una rappresentazione grafica quotata della spirale affiancata da un'immagine reale (Fig. 2.2b). Di seguito è stata riportata la Tab. 2.1 contenente i dati relativi al datasheet del componente.





Figura 2.2a - Rappresentazione quotata della spirale TX [III].

Figura 2.2b - Immagine reale della spirale

#### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

CHARACTERISTICS SPECIFICATION TABLES						
WPC compliant	Input voltage	Inductance [100kHz,1Vrms]	DC resistance [25°C]	Ferrite type	Part No.	
	(V)	(µH)	(Ω)max.			
WPC A11	5 (A11)	6.3	0.06	Flexible	WT505090-10K2-A11-G	

Tabella 2.1 - Datasheet della spirale TX [III].

Tali motivazioni hanno spinto il candidato a scegliere una geometria circolare con la quale realizzare i differenti modelli di spirali conduttive, i cui processi produttivi verranno illustrati a partire dal paragrafo successivo.

#### 2.2. Spirali RX: progettazione e realizzazione

Terminata la fase di studio teorico della tecnologia, consistente nella ricerca e lettura di documenti disponibili in letteratura, è stato dato inizio alla fase pratica di realizzazione dei vari campioni di spirali a base tessile che ha avuto luogo presso l'azienda *Ballesio F.lli s.r.l.*, per la tipologia laser cut, e presso l'azienda *Ovac*, per quella ricamata. Insieme alla descrizione delle tecniche produttive verranno resi noti gli accorgimenti messi a punto per tentare di superare le problematiche presentatisi durante il corso della realizzazione dei modelli.

#### 2.2.1. Spirali laser cut

Il materiale impiegato per la produzione delle spirali laser cut è stato un tessuto di nome "ASTRO 180", di cui l'azienda *Ballesio F.lli s.r.l.* ne commissiona il processo di rivestimento con materiale elettricamente conduttivo. La maglina del tessuto base è di natura polimerica ed è costituita al 94% in peso da poliammide 6,6 ed il restante 6% da materiale polimerico elasticizzato. L'anima polimerica viene poi sottoposta ad un trattamento di placcatura con il quale viene depositato in maniera galvanica un sottile strato di argento, preservando la flessibilità complessiva del tessuto. In Tab. 2.2 sono riportati i dati della scheda tecnica fornita da *Ballesio F.lli s.r.l.* Di seguito (Fig. 2.4) è possibile osservare un'immagine che ritrae un campione del tessuto in questione.

"Articolo ASTRO 180"			
Tessuto Base (% in peso)	Maglina PA 94% EL 6%		
Descrizione	Maglina placcata in argento elasticizzata		
Placcatura	99% argento puro		
Temperatura di utilizzo	-30 ° C < T < +90 ° C		
Spessore	$0,55\ mm\pm10\%$		
Peso	$210 \text{ gr/mm}^2 \pm 10\%$		
Resistività superficiale ( $\Omega$ /sg)	ca. 2 Ω/ <u>sq</u>		

Tabella 2.2 - Scheda tecnica del tessuto conduttivo "ASTRO 180" fornita da Ballesio F.lli s.r.l.



Figura 2.4 - Campione di tessuto conduttivo "ASTRO 180".

Per disegnare i profili delle spirali è stato impiegato il software CAD Fusion 360 sviluppato da Autodesk, programma principalmente adibito alla realizzazione di modelli tridimensionali ma anche per progettare, come in questo caso, in 2D. Segue un'immagine che ritrae un profilo di spirale osservabile dalla visuale del software.



Figura 2.5 - Realizzazione profili delle spirali per il taglio laser con il software Fusion 360.

I file CAD sono stati importati sul software Inkscape per apportare alcune modifiche necessarie ai disegni, lavorando particolarmente sullo spessore dei bordi dei vari avvolgimenti.

Infatti, per riuscire a separare efficacemente gli avvolgimenti adiacenti, è stato necessario riempire lo spazio vuoto tra di essi con il colore nero dei bordi in maniera tale che la macchina percepisse quella determinata area come una zona in cui dover bruciare il tessuto. E' stato quindi fondamentale effettuare opportuni calcoli preliminari sulle dimensioni degli avvolgimenti cosicché, con l'aumento dello spessore dei contorni, si arrivasse ad ottenere dei profili con i valori geometrici prestabiliti. Per rendere più comprensibile l'importanza del software è stato riportato in Fig. 2.6 il profilo della medesima spirale di Fig. 2.5 dopo aver subito le modifiche su Inkscape.



Figura 2.6 - Aumento dello spessore dei contorni degli avvolgimenti con Inkscape.

I file sono stati quindi esportati in formato png sul software impiegato per la produzione delle spirali laser cut: Lightburn. Una volta effettuata la configurazione del macchinario, connesso tramite cavo usb al pc, il programma consente di dirigere il taglio laser personalizzando le impostazioni di taglio a seconda del disegno da realizzare.

Di seguito sono state riportate due immagini che ritraggono la schermata del software Lightburn durante un'operazione di taglio ed il macchinario utilizzato per l'incisione anch'esso in azione. Si tratta di un laser cutter di tipo cnc<sup>3</sup> modello Atomstack A5 Pro in cui la potenza del laser in uscita raggiunge i 5,5 W e la precisione dell'incisione del fascio è pari a 0,01 mm.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> macchine cnc: sono macchine utensili i cui movimenti vengono controllati da un dispositivo elettronico integrato nella macchina detto controllo numerico. I movimenti e le funzioni di queste macchine sono prestabiliti, ovvero vengono pre-impostati a tavolino attraverso dei software specifici.



Figura 2.7 - Schermata del software Lightburn durante la fase di taglio laser.



*Figura 2.8 -* Laser cutter Atomstack A5 Pro durante il taglio di una spirale conduttiva a base tessile.

Per raggiungere risultati qualitativamente accettabili con il taglio laser, sono state necessarie numerose prove effettuate in un arco di tempo durato all'incirca due mesi.

Dalle prime prove sperimentali sono emerse alcune complicazioni legate al tessuto conduttivo. Essendo caratterizzato da uno spessore ridotto, come testimonia la scheda tecnica di Tab. 2.2, la gestione delle spirali si è dimostrata difficile soprattutto nell'ottica degli spostamenti da effettuare come durante la caratterizzazione e i test. Per aumentare la rigidezza e facilitare la manovrabilità delle spirali, si è quindi deciso di applicare al tessuto conduttivo un tessuto di supporto in cotone di colore nero e neutro in termini di conduttività.

Quest'ultimo è stato applicato grazie all'azione di una pressa a caldo che ha permesso allo strato di colla, applicato precedentemente sul cotone, di sciogliersi ed aderire al tessuto conduttivo. Una volta applicato il supporto in cotone al tessuto conduttivo, sono proseguiti i test sperimentali con l'obiettivo di ottenere profili con la migliore definizione possibile senza che l'azione del laser arrecasse danni superficiali sul lato conduttivo.

Uno degli accorgimenti più importanti è stato quello di effettuare le azioni di taglio con il lato del tessuto in cotone rivolto verso la sorgente del laser. Disporre il tessuto in questo modo ha aiutato a preservare la parte conduttiva da eventuali bruciature. E' possibile osservare questo dettaglio in Fig. 2.8.

Durante le varie prove svolte, è stato appurato che i parametri principali da cui dipende fortemente la buona riuscita di un' operazione con il laser cutter sono la velocità di taglio, il cui valore si calcola in mm/min, e la potenza del fascio laser espressa in valore percentuale. Individuare una coppia di valori che consentisse di separare efficacemente i vari avvolgimenti senza bruciarne lo strato conduttivo è stata una delle azioni che ha richiesto più tempo e risorse.

In Fig. 2.9 sono raffigurati alcuni dei primi campioni tagliati i quali presentano evidenti imperfezioni. Analizzando i campioni da sinistra verso destra, nei primi due gli avvolgimenti appaiono ancora uniti l'un l'altro per via delle impostazioni sbagliate di taglio che non hanno permesso una loro separazione efficace. Nel terzo e nel quarto invece, gli avvolgimenti sono stati separati con successo ma sono presenti numerose scabrosità lungo il profilo ed una colorazione più scura sul lato conduttivo.



Figura 2.9 - Prime sperimentazioni per la realizzazione dei campioni laser cut.

Nei primi due casi, i problemi riscontrati sono legati ad una velocità di taglio troppo elevata e/o ad una potenza del fascio non sufficiente affinché l'azione del laser risultasse efficace per la conseguente separazione degli avvolgimenti.

Passando invece all'analisi degli ultimi due, la motivazione che ha portato ad avere una scarsa definizione del profilo è legata nuovamente ad una velocità di taglio troppo elevata affinché il fascio riuscisse a trapassare completamente lo spessore del materiale. La causa che ha prodotto nei campioni una bruciatura è legata invece alla scelta di un valore di potenza del fascio troppo elevata.

Dopo svariati tentativi, si è arrivati alla conclusione che il giusto compromesso di valori è stato individuato in una velocità di taglio pari a 500 mm/min e in un valore di potenza pari al 30%. Sono entrambi valori relativamente bassi ma questo ha permesso di ottenere profili con una definizione qualitativamente buona e che non presentassero alcuna bruciatura evidente al termine dell'operazione. Tra le altre impostazioni di taglio è stato selezionato il riempimento bidirezionale lungo la coordinata x ed è stato sufficiente un unico passaggio del laser sul tessuto.

In totale sono stati realizzati sei prototipi di spirali di cui cinque accomunati dallo stesso valore di diametro interno -20 mm – scelto facendo riferimento alla spirale di trasmissione. Questi campioni si differenziano nel numero di avvolgimenti che parte da un minimo di 4, passando per 6, 8 e 10 fino ad un massimo di 12. Il sesto campione, a differenza dei cinque appena descritti, presenta 4 avvolgimenti e lo stesso valore di diametro esterno della spirale di trasmissione (40 mm).

Tutte le spirali sono state prodotte con avvolgimenti di spessore pari a 1.5 mm, separati uno dall'altro da una distanza pari anch'essa a 1.5 mm. In principio sono state effettuate alcune prove impostando 1.0 mm come larghezza degli avvolgimenti, stesso valore impiegato da Sun et al. [6] per produrre le loro spirali. Ciò che è stato riscontrato è che questo valore risulta essere insufficiente per una lavorazione con il macchinario Atomstack A5 Pro 5 in quanto i risultati finali hanno mostrato una colorazione più scura, tendente al marrone, rispetto alle sfumature dorate del tessuto di partenza. Sfumature di questo tipo indicano la presenza di bruciature superficiali le quali interessano anche il lato conduttivo e che avrebbero potuto compromettere l'efficienza degl'induttori tessili. Per questo motivo è stato sufficiente, a parità di velocità di taglio e potenza del fascio laser, incrementare leggermente la larghezza degli avvolgimenti portandola ad un valore di 1.5 mm.

In Fig. 2.10 sono presenti i sei prototipi appena discussi.



**Figura 2.10** – Spirali ottenute con la tecnica del laser cut: a) Spirale RX 4 avv.  $d_{int}$ =20mm; b) Spirale RX 6 avv.  $d_{int}$  =20mm; c) Spirale RX 8 avv.  $d_{int}$  =20mm; d) Spirale RX 10 avv.  $d_{int}$  =20mm; e) Spirale RX 12 avv.  $d_{int}$  =20mm; f) Spirale RX 4 avv.  $d_{est}$ =40mm;

E' possibile notare dalle immagini che le spirali sono costituite da un numero di avvolgimenti superiore rispetto a quello previsto. Quello che può sembrare inizialmente un errore è in realtà stato fatto intenzionalmente in quanto, per via delle differenze in termini di tolleranze e la conseguente propagazione degli errori di entità differente tra il macchinario per il taglio laser e la stampante 3D con cui è stato realizzato il supporto per le spirali RX, è stato osservato che posizionando i campioni nello stampo questi terminavano prima che venisse raggiunto il numero di avvolgimenti prestabilito. Questa problematica si è presentata durante il posizionamento del primo campione. Il disegno, così come il taglio laser, prevedeva un modello costituito da 6 avvolgimenti ma durante il suo posizionamento nel supporto egli è stato in grado di compiere poco più di metà dell'ultimo giro. Per questo, alle spirali sono stati aggiunti alcuni avvolgimenti per avere un certo margine utile durante la fase di posizionamento nel supporto e riuscire ad ottenere i modelli dimensionalmente corretti per poter avviare la caratterizzazione.

#### 2.2.2. Spirali ricamate

Per la realizzazione dei campioni di spirali ricamate è stato impiegato un filo conduttivo di nome "HC 40", anch'esso messo a disposizione da *Ballesio F.lli s.r.l.* e prodotto dall'azienda tedesca *Shieldex*. Come nel caso del tessuto "Astro 180", il filo è costituito da un anima 100% poliammide e da un rivestimento in argento che lo rende conduttivo. In Tab. 2.3 sono riportati i dati relativi alla scheda tecnica del filo conduttivo

"HC 40" by <u>Shieldex</u>			
Materiale	Filo 100% in poliammide placcato in argento;		
Titolo	<ul> <li>117 x 2 dtex before plating;</li> <li>290 ± 6 dtex plated;</li> </ul>		
Resistenza elettrica	< 300 /m		
Resistenza allo strappo (carico di rottura medio <u>cN</u> )	ca. 1400 <u>cN</u>		
Allungamento a trazione medio in %	ca. 21%		
Certificazione	STANDARD 100 by OEKO-TEX Annex 4, product class 1;		

 Tabella 2.3
 - Scheda tecnica del filo conduttivo "HC 40" della Shieldex.

Durante la fase di ricamo, avvenuta presso l'azienda torinese *Ovac*, sono state testate differenti tecniche per riuscire a raggiungere risultati qualitativamente accettabili.

La prima prova è stata effettuata basandosi su un disegno di spirale avente  $d_{int} = 20$  mm (pari al diametro interno della spirale TX) e spessore degli avvolgimenti pari a 1.0 mm, separati l'uno dall'altro da 1.0 mm. La tecnica impiegata per il ricamo è stata quella del punto sega in cui il filo viene fatto passare nel tessuto di supporto alternando la direzione obliqua a quella verticale occupando lo spessore dell'avvolgimento. Ciascun punto è stato fatto passare ad 1 mm di distanza dalla posizione di quello precedente.

Utilizzando tali parametri però il campione ha mostrato alcune problematiche legate principalmente ad un eccessivo numero di punti passanti e ad un insufficiente spazio lasciato tra gli avvolgimenti (1.0 mm). Il ricamo infatti tende a deformare il tessuto di base riducendo l'area della spirale e conseguentemente lo spazio tra gli avvolgimenti limitrofi a tal punto da farli entrare in contatto in alcuni punti.

Come tessuto base è stato impiegato un tessuto 100% in cotone, caratterizzato da una buona stabilità dimensionale e quindi in grado attutire gli sforzi di tensione innescati durante il ricamo stesso.

Sono state testate altre tecniche con cui ricamare le spirali tra cui il punto lanciato e il punto zig zag. Con l'aiuto di un multimetro è stato misurato il valore di resistenza dei profili ricamati con le due tecniche per valutare quella che consente di ottenere risultati migliori in termini di conduttività. Dalle misurazioni è emerso che il campione realizzato con la tecnica del punto lanciato presenta valori di resistenza pari a circa la metà di quelli che si ottengono con la tecnica del punto zig zag. La ragione dell'ottenimento di tali risultati è riconducibile al percorso che compie la corrente che più è lungo e tortuoso e maggiore opposizione riscontra durante il suo passaggio. L'opposizione generata dal filo sarà quindi indicativamente quantificabile con i risultati di resistenza ottenuti dal multimetro.

Seppur riferiti a campioni con parametri geometrici differenti, è possibile osservare in Fig. 2.11 le differenze nei disegni relativi alle tre tecniche di ricamo.



Figura 2.11 – Tre tecniche di ricamo: a) punto sega; b) punto zig zag; c) punto lanciato.

La tecnica del punto lanciato consente anche di effettuare un ricamo multiplo sullo stesso tracciato del disegno iniziale, oltre che al ricamo semplice che si ottiene con un unico passaggio. E' possibile infatti ricamare una seconda volta sullo stesso percorso che ha compiuto il filo oppure ricamare due punti in avanti ed uno indietro, passando complessivamente tre volte sullo stesso percorso. Nel primo caso è possibile decidere se interrompere o meno il filo tra un passaggio e quello successivo mentre, con la seconda tipologia, il filo viene interrotto solo al termine dell'operazione.

Sono stati quindi realizzati altri due campioni sfruttando le due varianti del punto lanciato e dai risultati del multimetro è emerso che la tecnica del doppio ricamo (avanti e indietro) permette di dimezzare ulteriormente il valore della resistenza della spirale che arriva ad essere intorno ai 150  $\Omega$ .

Sono stati quindi prodotti quattro differenti profili di spirali caratterizzati da un diametro interno pari a 20 mm e numero di avvolgimenti pari a 16. I campioni sono ritratti in Fig. 2.12 mentre le loro caratteristiche dimensionali sono riportate in Tab. 2.4. Tali valori sono stati scelti facendo rifermento a quelli utilizzati in altri esperimenti [6] [12] in cui sono stati riscontrati buoni risultati. Per evitare che il ricamo tirasse e deformasse il tessuto di base come avvenuto per il primo campione, è stata impostata ad un valore pari a 2 mm la distanza tra un punto e quello successivo.



Figura 2.12 - Campioni ricamati con filo conduttivo HC 40.

Caratteristiche	Campione a)	Campione b)	Campione c)	Campione d)
Diametro interno [mm]	20	20	20	20
Diametro esterno [mm]	42	42	58	58
Numero di avvolgimenti	16	16	16	16
Spaziatura tra gli avvolgimenti [mm]	0.5	0.5	1.0	1.0
Numero di passaggi di ricamo	1	2	1	2

Tabella 2.4 – Caratteristiche dimensionali dei campioni ricamati.

A differenza dei campioni laser cut dove è stato fatto variare il numero di avvolgimenti, a distinguere le spirali ricamate sono i valori della spaziatura tra gli avvolgimenti e la tipologia di variante del punto lanciato.

La scelta di produrre questa gamma di campioni, sia nel caso della tipologia laser cut che per il ricamo, è stata fatta per valutare la relazione esistente tra caratteristiche dimensionali e caratteristiche elettriche. Aumentando il numero di avvolgimenti o la spaziatura tra di essi aumenta proporzionalmente l'area dell'induttore tessile su cui il campo magnetico generato dalla spirale TX può agire e, a sua volta, il percorso che deve percorrere la corrente indotta. E' stata quindi effettuata una caratterizzazione delle proprietà elettriche per studiare la correlazione tra dimensioni e prestazioni. La procedura verrà descritta dettagliatamente nel capitolo successivo. Verranno discussi i risultati ottenuti con per trarre le dovute considerazioni finali.

## **Capitolo 3**

## Caratterizzazione delle proprietà elettriche

Per analizzare l'esistenza di una possibile correlazione tra la geometria e le proprietà elettriche dei vari campioni è stata effettuata una caratterizzazione delle proprietà elettriche. La prima analisi a cui sono state sottoposte le spirali è stata fatta per misurare l'andamento dell'impedenza in funzione della frequenza. Lo spettro di frequenze impiegato per il test è stato quello compreso tra i 20 Hz e i 300 kHz.

Una seconda analisi è stata condotta per rilevare i dati di resistenza ed induttanza di ciascun campione ad un valore di frequenza fisso a 200 kHz, frequenza operativa tipicamente utilizzata per questo genere di test [6] [9].

### 3.1 Misurazione dell'impedenza

L'impedenza è una grandezza fisica che rappresenta l'opposizione di un circuito al passaggio di corrente di natura alternata o, più in generale, variabile [IV]. Come indicato dalla formula (3.1) è data dal rapporto tra tensione e corrente e viene espressa sottoforma di numero complesso: la parte reale tiene conto della dissipazione di energia elettrica del circuito e corrisponde alla resistenza elettrica R; la parte immaginaria indicata con la lettera X è detta reattanza ed è associata ai fenomeni di accumulo energetico dati dalla presenza di condensatori e/o induttori nel circuito (3.2).

#### Impedenza:

$$\frac{V}{I} = Z = R + jX \tag{3.1}$$

Reattanza:

$$X = X_L - X_C \tag{3.2}$$

Come si osserva nella formula (3.2) il valore di reattanza è dato dalla differenza tra la reattanza induttiva e reattanza capacitiva. Le formule (3.3) e (3.4) indicano come poter calcolare algebricamente questi valori.

*Reattanza induttiva:* 

Reattanza capacitiva:

$$X_L = \omega L \tag{3.3} \qquad X_C = \frac{1}{\omega C} \tag{3.4}$$

In alternativa l'impedenza può essere espressa in notazione esponenziale presentando quindi un modulo e una fase come riportati nella formula (3.5).

*Notazione esponenziale:* 

$$Z = |Z|e^{i\theta} \tag{3.5}$$

Modulo:

Fase:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \qquad (3.6) \qquad \theta = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \qquad (3.7)$$

Per effettuare le misurazioni è stato utilizzato un analizzatore LCR da banco BK Precision 891 di Fig. 3.1. Tale strumento ha permesso di calcolare l'andamento del modulo e della fase dell'impedenza dei vari campioni in funzione della frequenza. La Fig. 3.2 invece mostra due dei campioni tessili durante i test.



Figura 3.1 - Misuratore LCR da banco BK Precision 891.



Figura 3.2 – Campioni durante le misurazioni dell'impedenza in funzione della frequenza.

Su ogni campione sono state effettuate due misurazioni sia per il modulo che per la fase. E' stata fatta una media dei dati ottenuti ed i risultati sono stati successivamente riportati in un grafico per poter osservare l'andamento dell'impedenza in funzione della frequenza. Nei grafici seguenti di Fig. 3.3 e Fig. 3.4 sono riportate le curve relative ai moduli delle impedenze dei campioni laser cut e quelli ricamati. Non è stata presa in considerazione la fase in quanto è il modulo che, essendo indice dell'opposizione del materiale al passaggio di corrente, consente di valutare e discutere le proprietà elettriche dei campioni testati.



Figura 3.3 - Grafico del modulo di impedenza dei campioni laser cut in funzione della frequenza.



**Figura 4.4** - Grafico del modulo di impedenza dei campioni ricamati in funzione della frequenza. A) Spirale spaziatura 0.5mm; ricamo singolo; B) Spirale spaziatura 0.5mm; doppio ricamo; C) Spirale spaziatura 1.0mm; ricamo singolo; D) Spirale spaziatura 1.0mm; doppio ricamo;

Ciò che emerge dai test è un risultato prevedibile legato alla lunghezza del percorso che la corrente deve compiere durante lo scorrimento all'interno dei campioni. Quello che si osserva nel caso delle spirali laser cut è che all'aumentare del numero degli avvolgimenti aumenta anche il modulo di impedenza rilevato dal misuratore LCR. Ricordando che l'impedenza è indice dell'opposizione generata dal circuito nei confronti del passaggio di corrente, è dunque possibile affermare che all'aumentare del numero di avvolgimenti aumenta conseguentemente l'ostruzione nei confronti della corrente stessa. Tale risultato è una conseguenza logica del fatto che più materiale la corrente dovrà attraversare e maggiore sarà la probabilità di incontrare ostacoli durante il suo passaggio.

Inoltre, un dettaglio che si nota dal grafico di Fig. 3.3 è il differente incremento di modulo mostrato dalle spirali all'aumentare il numero di avvolgimenti. Sebbene ogni campione sia soggetto ad un incremento del proprio numero di avvolgimenti pari a due, il modulo non aumenta in maniera proporzionale. La motivazione che sta alla base è nuovamente legata al percorso della corrente. Come testimoniano i disegni delle spirali, contenuti nel secondo capitolo relativo al processo produttivo delle spirali, ogni avvolgimento è costituito da un diametro superiore rispetto al precedente, aspetto fondamentale che identifica la figura geometrica della spirale. Proprio per questo motivo, l'aumentare del numero di avvolgimenti implica l'allungamento graduale del percorso che la corrente deve compiere ad ogni giro della spirale. Pertanto l'incremento nel modulo di impedenza che si registra sulle spirali laser cut non è costante così come invece lo è l'incremento del numero di avvolgimenti. Il modulo tende infatti a raddoppiare passando da un campione all'altro per le ragioni appena discusse, legate al percorso che compie la corrente.

Proseguendo con i risultati ottenuti dalle analisi condotte sulle spirali ricamate, è necessario ricordare che a differenziare i quattro campioni non è più il numero di avvolgimenti ma la spaziatura tra di essi e/o il numero di ricami effettuato sullo stesso tracciato. Osservando il grafico di Fig. 3.4, tra le quattro curve di impedenza si distingue particolarmente quella relativa alla spirale caratterizzata da una spaziatura tra gli avvolgimenti pari a 0.5 mm e ricamata con un doppio passaggio sul tracciato (B). Dalle misurazioni condotte con l'analizzatore LCR risulta che tale campione presenta un valore medio del modulo di impedenza intorno ai 41.5  $\Omega$  per tutto lo spettro di frequenze analizzate. La differenza che vi è rispetto al valore registrato analizzando il campione che presenta gli stessi parametri dimensionali ma che è stato ricamato in un unico passaggio è notevole. Quest'ultimo infatti è rappresentato da una curva il cui valore medio del modulo di impedenza si aggira intorno ai 470  $\Omega$  e, seguendo il ragionamento fatto durante le analisi dei risultati delle spirali laser cut sul percorso della corrente, ci si dovrebbe aspettare un modulo di impedenza superiore nel caso del campione ottenuto con il ricamo doppio.

Una delle ipotesi che è stata fatta è che tale ragionamento non può essere sempre applicato ai campioni ricamati in quanto l'ago della macchina da cucire segue esattamente lo stesso percorso sia all'andata che al ritorno e, di conseguenza, i fili costituenti il doppio strato entrano in contatto tra loro. Con questa configurazione il flusso di elettroni non è più costretto a seguire in maniera fedele il percorso del filo ma al contrario vengono offerte differenti strade al passaggio di corrente che percorre il primo o il secondo strato di filo conduttivo. Questa supposizione è valida nel caso in cui i due strati della spirale vengano ricamati in stretto contatto fra loro. Nonostante quanto appena descritto possa rappresentare una possibile ipotesi per giustificare un modulo di impedenza inferiore per i modelli di spirali ricamate due volte, essa viene smentita non solo dall'ordine di grandezza di differenza tra le impedenze dei due campioni aventi le stesse caratteristiche dimensionali, ma anche dal confronto con i valori ottenuti dagli altri due modelli caratterizzati da una spaziatura pari ad 1.0 mm. Osservando infatti l'andamento di quest'ultimi si nota come la spirale ottenuta col doppio ricamo presenti un andamento medio di impedenza superiore di quasi 800  $\Omega$  rispetto a quello ottenuto col ricamo semplice.

L'ipotesi alla quale si è giunti sul campione B di Fig. 3.4 è che la spirale presenta una distanza tra gli avvolgimenti insufficiente per poter essere ricamata con due passaggi. Il secondo strato di ricamo va inevitabilmente ad ingrandire lo spessore degli avvolgimenti che tendono quindi ad avvicinarsi e ad entrare in contatto fra loro. La corrente di conseguenza, anziché seguire la pista rappresentata dal doppio filo conduttivo, ha potuto "saltare" da un avvolgimento all'altro trovando vie alternative durante il percorso che hanno causato l'errore nella misurazione. Per comprendere meglio quanto appena detto è sufficiente tornare alla Fig. 2.12 del capitolo precedente in cui è rappresentata la spirale in questione ed è ben visibile l'elevata densità degli avvolgimenti causata da una insufficiente spaziatura tra di essi.

## 3.2 Misurazione di R, L e X

Per consentire una comparazione con i dati ottenute in altre ricerche [6] è stato necessario svolgere altre analisi con lo stesso misuratore LCR. Sono stati quindi calcolati i valori di resistenza elettrica R, di reattanza X e di induttanza L alla frequenza di 200 kHz. I risultati di tali misurazioni sono stati raccolti nelle seguenti tabelle Tab. 3.1 e Tab. 3.2.

Spirali laser cut					
Tipologia di campione	Resistenza, R	Reattanza, X	Induttanza, L		
RX 4 (dest = 40 mm, dint 3mm)	242.0 Ω	150.0 mΩ	120.0 nH		
RX 4	325.0 Ω	885.5 mΩ	706.0 nH		
RX 6	335.0 Ω	1.54 Ω	1.23 μH		
RX 8	565.0 Ω	4.37 Ω	3.48 μH		
RX 10	864.0 Ω	9.81 Ω	7.25 μH		
RX 12	1470.0 Ω	19.0 Ω	15.17 μΗ		

**Tabella 3.1** - Valori delle spirali laser cut di induttanza, resistenza e reattanza calcolati alla frequenza di 200 kHz.

Spirali ricamate					
Tipologia di campione	Resistenza, R	Reattanza, X	Induttanza, L		
Campione A) spaziatura 0.5 mm; ricamo singolo;	447.0 Ω	130 mΩ	63.0 nH		
Campione B) spaziatura 0.5 mm; doppio ricamo;	24.2 Ω	33.26 mΩ	26.5 nH		
Campione C) spaziatura 1.0 mm; ricamo singolo;	1762.0 Ω	7.25 Ω	5.80 μH		
Campione A) spaziatura 1.0 mm; doppio ricamo;	1036.0 Ω	9.0 Ω	7.16 μH		

**Tabella 3.2** - Valori delle spirali ricamate resistenza e induttanza calcolati alla frequenza di 200 kHz.

Una prima osservazione può essere fatta confrontando i valori di resistenza con i valori di reattanza ottenuti dalle misurazioni su entrambe le tipologie di campioni. Mediamente, le reattanze esibite dalle dieci spirali presentano un valore pari a circa l'1% del valore della resistenza elettrica. Facendo riferimento alla formula (3.6) per il calcolo del modulo dell'impedenza, in base ai dati raccolti è possibile affermare che in questo caso la reattanza può essere considerata trascurabile rispetto alla resistenza. Proseguendo con il ragionamento, per i campioni a base tessile realizzati in questo lavoro è valida quindi la seguente relazione:

$$Z \approx R \tag{3.8}$$

Pertanto, i grafici di Fig. 3.3 e 3.4, in cui sono rappresentati gli andamenti dei moduli di impedenza in funzione della frequenza, offrono la possibilità di effettuare un'analisi critica in termini di conduttività dei vari campioni in quanto ad un modulo di impedenza maggiore corrisponderà inevitabilmente una valore di resistenza più elevato come affermato dalla relazione (3.8). Infine, un valore di resistenza maggiore è sinonimo di una conduttività inferiore e sarà quindi possibile prevedere quali saranno, da un punto di vista puramente teorico, i campioni più performanti prendendo in considerazione unicamente le loro caratteristiche dimensionali.

Analizzando i dati di Tab. 3.1, l'andamento dei valori di resistenza conferma quanto riportato nella discussione dei risultati emersi dalle analisi di impedenza. All'aumentare del numero di avvolgimenti aumenta, in maniera non regolare, anche la resistenza del campione. Osservando invece i valori di Tab. 3.2 si nota nuovamente come la resistenza esibita dal campione B) sia notevolmente inferiore rispetto al campione A). L'ipotesi che la corrente non segua il percorso tracciato dal doppio filo conduttivo ma, per via del contatto tra gli avvolgimenti dovuto ad una spaziatura tra di essi insufficiente, riesca a balzare da un avvolgimento all'altro, riducendo la lunghezza del percorso che collega un polo del misuratore LCR al suo opposto, diventa una spiegazione possibile per i risultati emersi dai test.

Si possono quindi confrontare tali risultati con quelli registrati da Sun et al. [6]. I dati dell'articolo sono stati ricavati effettuando la stessa tipologia di misurazioni su un campione laser cut e uno ricamato. Il primo presenta un diametro interno pari a 20 mm, 14 avvolgimenti spessi 1 mm e separati l'uno dall'altro da 1 mm. La spirale ricamata invece è stata realizzata impiegando la stessa tipologia di filo con cui sono stati prodotti i campioni ed il profilo presenta un diametro interno di 20 mm, 16 avvolgimenti ricamati con un unico passaggio sul tracciato, separati da 1 mm. In Tab. 3.3 sono riportati i dati dei due campioni.

Type of coil	Embroidered coil	Laser cut coil	
Inner diameter (mm)	20	20	
Outer diameter (mm)	58	76	
Resistance/standard deviation ( $\Omega$ )	2348/11.5	40/1.5	
Inductance/standard deviation ( $\mu$ H)	8.4/0.5	15.4/1.6	

Tabella 3.3 - Dati di resistenza e induttanza dei campioni testati nell'articolo di Sun et al. [6].

La resistenza della spirale ricamata risulta essere superiore di 600  $\Omega$  rispetto a quello mostrato dal campione C) di Tab. 3.2, nonostante siano stati realizzati con la stessa tecnica di ricamo e presentino le stesse caratteristiche dimensionali. Una differenza tale può essere dovuta al percorso del filo conduttivo e alla distanza alla quale sono stati collocati i punti consecutivi di passaggio dell'ago della macchina da cucire. Nel presente lavoro la distanza lasciata tra un punto e il successivo è stata di 2 mm. Nel caso dell'articolo [6] la distanza potrebbe essere stata inferiore e di conseguenza il percorso del filo potrebbe essere costituito da un numero maggiore "up and down" sul tessuto fungente di substrato. A causa di questo particolare potrebbe essere stata impiegata una quantità di filo superiore per ottenere lo stesso profilo e ciò avrebbe portato ad ottenere un valore di resistenza maggiore.

Il confronto tra i risultati dei modelli laser cut risulta più complicato e approssimativo in quanto non è stato possibile produrre un campione che avesse le stesse caratteristiche dimensionali di quello prodotto da Sun et al. Come descritto nel paragrafo 2.2.1. sono state condotte alcune prove per cercare di realizzare spirali che avessero avvolgimenti spessi 1 mm separati da 1 mm ma purtroppo con scarsi risultati. I campioni infatti hanno riportato bruciature superficiali che causavano uno sgretolamento del tessuto costituente le spirali stesse. I parametri dimensionali impostati erano quindi impossibili da impartire al campione per poter ottenere un prodotto di qualità.

Nonostante ciò, confrontando ulteriormente i dati di Tab. 3.1 e Tab. 3.3, è possibile notare che neppure la spirale RX 4, costituita da un diametro interno pari e 3 mm, uno esterno pari a 40 mm e 4 avvolgimenti, presenta un valore di resistenza in grado di avvicinarsi a quello del campione laser cut di Sun et al. (40/5  $\Omega$ ). La possibile causa di tale divario, oltre alla differenza nelle caratteristiche dimensionali, è la tipologia di tessuto impiegato. Nell'articolo infatti viene impiegato un tessuto conduttivo Ripstop prodotto dall'azienda Kitronik il quale mostra una resistività superficiale pari a 1  $\Omega$ /sq rispetto a 2  $\Omega$ /sq del tessuto Astro 180.

Per quanto riguarda i valori di all'induttanza non si discostano eccessivamente da quello della spirale di trasmissione che misura circa 6.3  $\mu$ H. E' importante che i valori delle due spirali formanti l'accoppiamento induttivo siano simili in quanto è uno dei molteplici aspetti che migliorano l'efficienza del sistema WPT.

Terminata la fase di caratterizzazione si è cercato di riprodurre un sistema WPT per tentare di testare l'effettivo funzionamento delle spirali come ricevitori. Nel successivo capitolo verranno descritte le operazioni svolte e i risultati ottenuti.

## **Capitolo 4**

## Test con sistema WPT

Completata la caratterizzazione delle proprietà elettriche è stato messo a punto un vero e proprio sistema WPT per testare l'effettivo funzionamento dei campioni. Grazie al materiale e all'attrezzatura messi a disposizione dal DET è stato possibile riprodurre un set up le cui componenti verranno descritte nel corso del capitolo, prima di presentare i risultati ottenuti.

#### 4.1. Sistema TX

Il sistema di trasmissione è stato riprodotto su un modello assemblato dall'azienda *Master Soft s.r.l.* di Novara costituito da un circuito elettrico, il cui compito è quello di convertire il segnale di alimentazione da DC ad AC, collegato ad una spirale di trasmissione la cui descrizione è fornita in maniera dettagliata nel corso del paragrafo.

Come è possibile osservare dall'immagine di Fig. 4.1, il circuito è alimentato attraverso fili di colore rosso e nero rappresentanti rispettivamente il polo positivo e il polo negativo. Essi stabiliscono il collegamento tra il circuito e la fonte energetica.

Tra le componenti che compongono il circuito si distingue al centro la presenza di un circuito integrato avente forma cubica e colorazione nera. Si tratta di un multivibratore NE555 che può essere configurato in tre differenti modalità: se la configurazione è monostabile esso agisce come timer; se è astabile si comporta come un oscillatore mentre se è bistabile svolge il ruolo di flip-flop. Dato lo scopo del circuito, il multivibratore presenta con una configurazione astabile che permette di convertire il segnale continuo proveniente dalla fonte di energia in un'onda quadra.



- $R_1 = 100.0 \Omega;$ 
  - $R_2 = 1.5 \text{ k}\Omega;$
- $R_3 = 18.0 \text{ k}\Omega;$
- $C_1 = 2.2 \text{ nF};$
- $C_2 = 3.3 \text{ pF};$

Figura 4.1 - Circuito di trasmissione.

Oltre al circuito integrato si osserva la presenza di tre resistenze e due condensatori. Sono dei componenti ausiliari che collaborano con l'NE555 agendo sulla forma del segnale generato dal multivibratore stesso. In particolare i condensatori svolgono un ruolo di una certa importanza.

Il loro compito consiste nell'evitare che la corrente raggiunga un valore nullo o insufficiente per una corretta alimentazione nel momento in cui l'onda attraversa il tratto che comprende il picco di minimo: quando la curva si trova nel suo picco massimo i condensatori si caricano; quando invece raggiunge il suo minimo i condensatori si scaricano con una certa latenza rispetto all'andamento del segnale andando così a sopperire alla mancanza di energia che potrebbe verificarsi in quella frazione di tempo. I condensatori fungono come una riserva energetica temporanea garantendo una corretta alimentazione del carico.

Infine, l'ultimo componente del circuito è un transistor BC547 che agisce da interruttore per il passaggio di corrente in uscita.

Purtroppo durante le prime misurazioni, il circuito ha evidenziato alcune anomalie nel segnale output come dimostrato da alcune analisi effettuate con l'oscilloscopio. E' stato infatti constatato che l'andamento del segnale generato si discostava da quello classico che caratterizza le onde quadre. Per evitare che ciò condizionasse gli esiti delle misurazioni è stato deciso di riprodurre il medesimo circuito su una breadboard rimanendo fedeli allo schematico del circuito di partenza.

Una volta avvenuta la conversione da DC ad AC la corrente alternata raggiunge la spirale TX ed inizia a percorrere i suoi avvolgimenti generando, come descritto nel paragrafo 1.2, un campo magnetico di natura variabile nonché responsabile dell'induzione di corrente nella spirale RX.

Per la trasmissione è stata impiegata la spirale prodotta da TDK illustrata precedentemente in maniera dettagliata nel paragrafo 2.1.

Prima di mostrare i risultati ottenuti verrà illustrato il set up costituito da supporti in PLA realizzati con la tecnica della stampa 3D, utili per fissare la posizione delle spirali durante i test.

#### 4.2. Set up di supporto

Una delle maggiori complicazioni nel valutare le prestazioni delle spirali a base tessile è quella di mettere a punto un set up adeguato che permetta di effettuare delle misurazioni oggettive ed ottenere dati confrontabili tra loro. E' di fondamentale importanza mantenere i campioni nella posizione corretta durante i test rispettando i parametri dimensionali con i quali sono stati prodotti come, ad esempio, lo spazio che separa gli avvolgimenti adiacenti. In questo modo i risultati ottenuti possono essere considerati attendibili.

Nel caso specifico delle spirali laser cut, le difficoltà principali che emergono durante i test sono causate dalle loro caratteristiche fisiche. Nonostante il tessuto conduttivo sia stato accoppiato ad un supporto in cotone come descritto nel paragrafo 2.2.1, i campioni sono caratterizzati da un'elevata flessibilità che ostacola il posizionamento corretto dei vari avvolgimenti. Avversità di questo genere, riportate anche in altri articoli scientifici presenti in letteratura [6], ostacolano fortemente le misurazioni rendendole praticamente impossibili senza l'ausilio di alcun supporto esterno.

Per valutare le prestazioni dei modelli laser cut, il candidato ha scelto di realizzare dei sostegni aventi lo scopo di fissare la spirale TX e la spirale RX in una posizione stabile che consentisse di effettuare i test in maniera adeguata.

Un primo supporto è stato ottenuto da un pannello in poliuretano espanso sul quale è stato inciso il profilo di una spirale costituita da 15 avvolgimenti, numero più che sufficiente per poter ospitare tutti i campioni laser cut. Per effettuare l'incisione è stato impiegato lo stesso macchinario laser con cui sono state prodotte le spirali. Terminato il supporto, si è tentato di posizionare uno dei modelli laser cut. Durante tale operazione sono emerse alcune complicazioni legate all'interazione tra lo stampo in poliuretano, esempio di polimero con struttura flessibile a celle aperte, e le asperità e imperfezioni presenti sul profilo delle spirali. Non è stato possibile collocare i vari avvolgimenti ad una profondità del supporto costante per tutto il profilo della spirale che, invece, ha mostrato dei saliscendi i quali avrebbero potuto compromettere le misurazioni.

Pertanto, per realizzare i supporti, si è deciso di sfruttare la disponibilità di una stampante 3D modello Flying Bear Ghost 5 in grado di produrre oggetti in ABS o, come in questo caso, in PLA. Nelle figure seguenti (Fig. 4.2, 4.3 e 4.4) è possibile osservare i diversi componenti realizzati.



*Figura 4.2a* - *Disegno 3D del supporto per la spirale TX realizzato con Fusion 360.* 





*Figura 4.2b* - *Supporto per la spirale TX realizzato con la stampante 3D.* 



*Figura 4.3a* - Disegno 3D del supporto per le spirali RX realizzato con Fusion 360.

**Figura 4.3b** - Supporto per le spirali RX realizzato con la stampante 3D.

Il primo supporto di Fig. 4.1b funge da incastro per la spirale di trasmissione immobilizzandola nell'area circolare scavata nel centro del sostegno in PLA. L'area di "fuga" connessa a quella circolare è stata aggiunta affinché i filamenti della spirale collegati al circuito elettrico non facessero leva sulla spirale stessa, sollevandola dalla sua posizione orizzontale ottimale.

Osservando il disegno di Fig. 4.2b è possibile notare il profilo incavo di una spirale costituita da 15 avvolgimenti in grado di ospitare tutte le tipologie di spirali ottenute con la tecnica del taglio laser. In questo caso è stata realizzata una sorta di pista all'interno della quale posizionare i vari campioni durante la fase di test. Tale struttura consente di effettuare le misurazioni sulle spirali disposte correttamente con gli avvolgimenti adiacenti collocati ad una distanza costante grazie ad uno spessore di materiale di 1.5mm che li separa l'uno dall'altro evitando il contatto reciproco.

L'isolamento degli avvolgimenti è un dettaglio non indifferente in quanto, nel caso in cui due di essi entrassero in contatto, si comporterebbero come uno unico.

Come conseguenza si osserverebbe un cambiamento in termini di efficienza della spirale dovuta alla variazione del numero di avvolgimenti che passerebbe da un valore "x" ad un valore "x-1".

In entrambi i supporti, si ereggono nell'area dei quattro angoli dei rilievi cilindrici aventi diametro 5 mm e altezza pari a 2mm. Tali elementi fungono da perno per i distanziali anch'essi di forma cilindrica ma vuota all'interno che consente un incastro efficace. Nel disegno di Fig. 4.4 è riportata l'immagine di un distanziale avente altezza pari a 10 mm. In totale sono state stampate otto differenti misure di distanziali partendo da un'altezza di 6 mm fino ad un massimo di 20 mm con una differenza di 2 mm tra una taglia e l'altra.





**Figura 4.4a** - Disegno 3D di una tipologia di distanziali avente altezza 10mm, realizzato con Fusion 360.

**Figura 4.4b** – Distanziale avente altezza 10mm, realizzato con la stampante 3D.

Un set up di questo genere consente di mantenere le due spirali formanti l'accoppiamento induttivo ad una distanza bene precisa e con il corrispettivo centro allineato, aspetto importante per l'efficienza del sistema come precedentemente discusso nel paragrafo 1.2.1 sul fattore di accoppiamento k. Pertanto è possibile comparare i valori ottenuti dai test relativi ai vari campioni così come i valori tra lo stesso campione collocato a distanze diverse dalla spirale TX.

Per quanto riguarda i test condotti sui campioni ricamati, la cui gestione risulta più semplice in quanto la loro posizione è fissata inevitabilmente al tessuto base di cotone, è stato impiegato lo stesso supporto in PLA di Fig. 4.4b. Una volta che il centro è stato fatto coincidere con quello del supporto, e di conseguenza allineato con quello della spirale TX, il campione è stato fissato con del normale nastro adesivo tirando leggermente il tessuto così da favorire il mantenimento della posizione piatta della spirale.

## 4.3. Discussione dei risultati

I test ai quali sono stati sottoposti i campioni, sono stati condotti con l'obiettivo di ottenere una dimostrazione concreta del funzionamento di un sistema WPT avente come ricevitore una spirale a base tessile. Per avere la certezza che la configurazione progettata per la trasmissione costituita da alimentatore GW Instek GPS-4303 (1), circuito TX (2) e spirale TX (3) (Fig. 4.5) funzionasse, sono prima state testate una spirale in ferrite flessibile, identica a quella di trasmissione, ed una realizzata rame. Su entrambe è stato saldato un diodo led utilizzato sia come carico che come dimostrazione visiva del funzionamento del sistema WPT. In Fig. 4.6 e 4.7 è possibile osservare i momenti in cui le due spirali sono state avvicinate a quella di trasmissione. L'alimentatore è stato impostato su una tensione pari a 3V.



Figura 4.5 - Configurazione del sistema di trasmissione.



Figura 4.6 – Test su spirale RX in ferrite flessibile.



Figura 4.7 – Test su spirale RX in ferrite flessibile.

Come si può notare dalle immagini di Fig. 4.6 e Fig. 4.7, all'avvicinamento di entrambe le spirali RX a quella di trasmissione si verifica l'accensione del led. Questo testimonia l'effettivo funzionamento della trasmissione energetica.

Di conseguenza si è proceduto con i test sui campioni a base tessile. Il sistema RX impiegato è quello di Fig. 4.8 costituito, oltre che dai campioni stessi (4), da un multimetro Agilent 34401A (5) il cui ruolo è quello di rilevare il passaggio di corrente nelle spirali tessili. Anche in questo caso è stato connesso agli estremi dei campioni un diodo che fungesse da carico (6) per il circuito.



Figura 4.8 - Configurazione del sistema di ricezione.

Il supporto per le spirali RX è stato poi incastrato su quello per la spirale di trasmissione grazie all'utilizzo dei distanziali cilindrici cavi come mostrato in Fig. 4.9.



*Figura 4.9* – Set up completo per i test condotti sulle spirali laser cut. a) vista laterale; b) vista dall'alto.

Le misurazioni sono state condotte sia sui campioni laser cut che su quelli ricamati. Purtroppo i risultati ottenuti non sono stati quelli sperati. In tutti i modelli di entrambe le tipologie il multimetro non ha registrato alcuna variazione di corrente come invece si osserva quando viene posizionata la spirale RX in rame o in ferrite flessibile. Per questo motivo pur connettendo ai capi di ciascun campione un led della stessa tipologia di quello applicato alle spirali in rame ed in ferrite il led non si è verificata alcuna accensione.

Tra le molteplici motivazioni plausibili alla base di tale risultato ci sono con molta probabilità il circuito fungente da inverter, la natura tessile dei campioni e i parametri dimensionali con i quali sono stati realizzati soprattutto per la tipologia laser cut.

Per convertire la corrente da continua in alternata è stato messo a punto un circuito che produce come output un segnale avente la forma di un'onda quadra anziché di una sinusoide. Sebbene siano entrambe di natura variabile e quindi appartenenti al regime AC questa prima differenza potrebbe essere una delle cause del mancato trasferimento di energia ai campioni a base tessile. Inoltre potrebbe essere stata utilizzata una componentistica ausiliaria del multivibratore NE555 non adeguata in quanto è stato osservato che durante le prove il transistor si surriscaldava raggiungendo temperature elevate anche per valori di tensione di alimentazione al di sotto di 5 V. Il dubbio quindi è che il circuito realizzato, nonostante sia stato dimostrato il suo funzionamento testandolo con spirali di ricezione in materiale metallico conduttivo, non presenta caratteristiche adeguate al trasferimento di energia su spirali di natura tessile.

Un' ulteriore conferma della probabile incompatibilità del circuito con il sistema RX è legata al fatto che i modelli di spirali ricamate sono stati realizzati con la stessa tipologia di filo – HC 40 by Shieldex – e tra di essi uno è caratterizzato dagli stessi parametri dimensionali – diametro interno, diametro esterno, tecnica del punto lanciato, spaziatura tra gli avvolgimenti – di quello prodotto da Sun et al. [6]. Inoltre, come si evince dai risultati ottenuti dalla caratterizzazione, la spirale ricamata dell'articolo presenta un valore di resistenza che supera di circa 600  $\Omega$  quello relativo del medesimo modello di spirale realizzata nel presente lavoro. Nonostante una resistenza elettrica maggiore, è stato possibile ottenere l'accensione del led.

Si è quindi provato a portare il valore di tensione dell'alimentatore a voltaggi superiore a 4.6 V, valore impiegato nei loro test, ma anche questa operazione non ha dato alcun frutto. Come riportato nell'articolo, anziché impiegare un circuito inverter per ottenere la conversione DC/AC, sono stati utilizzati un semplice transistor T1P35C ed una resistenza da 220  $\Omega$ . Come trasmettitore sono state utilizzate due spirali accoppiate costituite da un doppio cavo per altoparlanti codificati con 14 avvolgimenti. Segue una rappresentazione schematica in Fig. 4.10 del circuito di trasmissione.



Figura 4.10 - Rappresentazione schematica del circuito di trasmissione [6].

Essendo i campioni RX realizzati con del materiale conduttivo di natura tessile, i cui valori di conduttività sono inevitabilmente inferiori rispetto a quelli dei materiali metallici, potrebbe essere necessaria una potenza di trasmissione superiore per riuscire convogliare una maggiore quantità di energia alla spirale RX. In questa maniera potrebbe verificarsi l'accensione del led dimostrando il passaggio di corrente nel campione ma, a questo punto, bisognerebbe monitorare la sicurezza del sistema. Essendo il suo scopo quello di alimentare dispositivi indossabili la preservazione dell'incolumità dell'indossatore deve essere messa al primo posto, al di sopra quindi dell'efficienza. Nel caso in cui dovessero essere necessaria una potenza troppo elevata per ottenere un corretto funzionamento, la tecnologia non potrebbe essere sfruttata per garantire il sostentamento energetico ai tessuti intelligenti.

Essendo questa una tematica di carattere prettamente elettronico è opportuno che l'ottimizzazione della trasmissione venga svolta da chi dispone le competenze necessarie.

Come operazione conclusiva è stata condotta un'ultima caratterizzazione delle proprietà elettriche sulle due spirali RX funzionanti realizzate in materiale di natura metallica che, come ritratto in Fig. 4.6 e 4.7 hanno consentito a diodo led di illuminarsi. Lo scopo di queste misurazioni è quello di evidenziare il gap presente tra un induttore a base tessile e un induttore comunemente impiegato per la ricarica wireless. I dati ottenuti dai test sono riportati in Tab. 4.1.

Spirali RX di natura metallica				
Tipologia di campione	Resistenza, R	Reattanza, X	Induttanza, L	
Ferrite flessibile	1.40 μΩ	4.87 Ω	6.55 μΗ	
Rame	127.0 mΩ	9.39 Ω	7.48 μH	

 Tabella 4.1 - Dati di resistenza, reattanza e induttanza delle spirali RX di natura metallica.

Un aspetto che occorre sottolineare è che per questa tipologia di spirali la reattanza supera notevolmente il valore di resistenza. In questo caso il modulo dell'impedenza delle due spirali potrebbe essere approssimato al valore della reattanza registrato in quanto quello di resistenza diventa trascurabile.

I valori di resistenza della spirale in ferrite e di quella in rame misurano rispettivamente 1.40  $\mu\Omega$  e 127 m $\Omega$ . Rispetto a quelli ottenuti dalle misurazioni sui campioni a base tessile vi è un divario minimo di circa tre ordini di grandezza. Una distanza così importante è impossibile da azzerare in quanto strettamente legata alla natura del materiale. Possono però essere fatti dei tentativi per ridurla intraprendendo nuovi studi sui materiali impiegati e sulle tecniche di realizzazione affinché possano essere raggiunti dei risultati sufficienti per soddisfare i requisiti richiesti da tale tecnologia.

## Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto dal candidato ha avuto come obiettivo la riproduzione di induttori tessili potenzialmente integrabili in un dispositivo indossabile per svolgere la funzione di ricevitori in un sistema di ricarica wireless. Sebbene la natura dei materiali impiegati non agevoli l'efficienza dei campioni, lo sviluppo ed il perfezionamento di tale tecnologia potrebbe rappresentare un notevole step verso il futuro per il mondo dei tessuti intelligenti. Fonti energetiche voluminose e rigide potrebbero essere rimpiazzate da sistemi di sostentamento energetici leggeri, flessibili e contemporaneamente efficienti migliorando l'indossabilità del dispositivo.

Nel corso dei capitoli è stata fornita una descrizione dettagliata delle operazioni condotte durante il processo produttivo. Essendo il ricamo una tecnica consolidata e da un punto di vista realizzativo più semplice, le maggiori complicazioni sono state riscontrate durante il taglio laser. Al fine di raggiungere dei risultati accettabili sono state necessarie numerose prove per individuare il giusto compromesso tra intensità e velocità del fascio.

Terminata la fase di realizzazione ha avuto inizio quella di caratterizzazione in cui è stata valutata la dipendenza delle proprietà elettriche dalla geometria dei campioni. Analizzando i risultati è emerso che più è lungo e tortuoso il cammino che deve percorrere la corrente, maggiore sarà l'impedenza esibita dal materiale. Occorre sottolineare che i valori ottenuti dalle misurazioni di impedenza e resistenza non sono sufficienti per poter definire le prestazioni elettriche delle spirali. Esse infatti dipendono fortemente anche dal sistema TX. Oltre al fattore di accoppiamento k potrebbe essere utile effettuare delle misurazioni sulle spirali in presenza di un campo magnetico variabile come quello generato dalle spirali di trasmissione. In questo caso sarebbe necessario porre l'attenzione sul rapporto tra campo magnetico e area della spirale RX. Infatti, se nel corso del Capitolo 3 è stato affermato che un numero di avvolgimenti maggiore comporta inequivocabilmente un'impedenza più elevata, in questo caso un area più estesa corrisponde ad una maggiore quantità di materiale conduttivo esposto all'azione del campo magnetico. Di conseguenza potrebbe accadere che una spirale dotata da un'impedenza maggiore sia contemporaneamente quella percorsa da una quantità di corrente più elevata per via della sua area. Quanto appena descritto potrebbe essere oggetto di futuri studi per osservare la dipendenza delle prestazioni elettriche delle spirali in funzione della loro geometria ma in questo caso in presenza di campo magnetico che simula un ambiente reale come quello in cui deve operare un ricevitore wireless.

Nell'ultimo capitolo si è cercato di costruire un set up che riproducesse un vero e proprio sistema WPT per testare il funzionamento dei campioni. E' stato realizzato un circuito che potesse ricoprire il ruolo di inverter per consentire la conversione DC/AC in quanto non è stato possibile accedere ad un alimentatore che producesse direttamente un segnale in regime alternato.

Per testare il funzionamento del circuito sono state utilizzate due spirali realizzate con materiali altamente conduttivi quali ferrite flessibile e rame. Dopodiché si è passati ai campioni a base tessile dai quali però non sono state ottenute le risposte desiderate, nonostante sia stata testata la stessa tipologia di spirali ricamate con cui Sun et al. [6] sono stati in grado di ottenere l'accensione del diodo led. Come riportato alla fine del quarto capitolo, una motivazione che potrebbe aver condotto ad un mancato funzionamento del sistema è il differente metodo di conversione impiegato per ottenere una corrente alternata. Seppur conduttivi, i materiali tessili presentano conduttività inferiori rispetto a quelli convenzionalmente impiegati negli accoppiamenti induttivi per la ricarica wireless. Potrebbero quindi essere necessari un voltaggio e un potenza operativa maggiori per consentire al campo magnetico di attivare il flusso di elettroni nelle spirali RX. Se così fosse sarebbero necessarie ulteriori analisi per testare la sicurezza del sistema in quanto, trattandosi di una tecnologia indossabile, potrebbe risultare rischioso per l'indossatore trovarsi a stretto contatto per un tempo prolungato con una potenza troppo elevata. Possibili test come il SAR (Specific Absorption Rate) potrebbero essere condotti per valutare l'entità delle radiazioni elettromagnetiche alle quali il corpo umano può essere esposto durante l'utilizzo del sistema WPT. Pertanto, la realizzazione di un sistema TX adatto per l'alimentazione di induttori tessili potrebbe essere possibile altro oggetto di studio per il futuro.

Il presente elaborato è stato redatto al fine di contribuire alla diffusione della conoscenza del sostentamento energetico dei tessuti intelligenti. Sono state condivise le esperienze pratiche vissute dal candidato affinché il lavoro svolto possa rappresentare un punto di partenza per ulteriori studi. I tessuti intelligenti necessitano di potersi servire di una tecnologia che offra loro la corretta alimentazione e che sia all'avanguardia tanto quanto le funzioni che tali dispositivi sono in grado di svolgere.

## Bibliografia

- [1] Trovato V. (2019). Smart Textiles classificazione e approcci di sviluppo, p. 9. *Progetto Fit4You, Formazione per l'innovazione e la tecnologia.*
- [2] Hatamvand M., Kamrani E., et al. (2020). Recent advances in fiber-shaped and planarshaped textile solar cells. *Elsevier LTD, Vol.71, p. 104609, Nano Energy*.
- [3] Khoso N., Jiao X., et al. (2021). Enhanced thermoelectric performance of graphene based nanocomposite coated self-powered wearable e-textiles for energy harvesting form human body heat. *RSC advances, Vol.11 (27), p. 16675-16687.*
- [4] Pu X., Hu W., et al. (2018). Nanogenerators for Smart Textiles. *Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc, Smart Textiles, p. 177-210.*
- [5] Ziyang Zhang, Adie Alwen, Hongming Lyu, et al. (2019). Stretchable Transparent Wireless Charging Coil Fabricated by Negative Transfer Printing. *ACS Appl. Mater. Interfaces 2019*, 11, 40677-40684.
- [6] Damnei Sun, Meixuan Chen, Symon Podilchak, et al. (2019). Investigating flexible textilebased coils for wireless charging wearable electronics. *Journal of Industrial Textiles*.
- [7] Shihong Xu, Zeng Fan, Shuaitao Yang et al. (2020). Flexible, self-powered and multifunctional strain sensors comprising a hybrid of carbon nanocoils and conducting polymers. *Chemical Engineering Journal*.
- [8] Paolo Mazzoldi, Massimo Nigro, Cesare Voci. (2008). Elementi di Fisica Elettromagnetismo e Onde, II<sup>a</sup> edizione. *Edides*.
- [9] Yi Li, Neil Grabham, Russel Torah, et al. (2018). Textile-Based Flexible Coils for Wireless Inductive Power Trasmission. *Applied Sciences Vol.8*.
- [10] Siamak Bastam. (2013). Induzione magnetica o risonanza magnetica per la ricarica wireless?. *Elettronica Oggi Vol. 427*.
- [11] Chang C., Riehl P., Lin J., (2020). Wireless Charging for Smart Garment with Textile based Receiver Coils. *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 2020, p.484-487.
- [12] Micus S., Padani L., et al. (2021). Textile-Based Coils for Inductive Wireless Power Transmission. *Applied Sciences; Basel Vol. 11, Fasc. 9.*

- [13] Ren Ohmura, Kikuya Miyamura, Takanori Okuda and Yuichi Miyaji. (2019). Wrinkling and bending effect in wireless power transfer on clothes. *Proceedings International Symposium on Wearable Computers (ISWC)*.
- [14] Reza Sedehi, David Budgett, Jincheng Jiang, et al. (2021). A Wireless Power Method for Deeply Implanted Biomedical Devices via Capacitively Coupled Conductive Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- [15] Monica Zolog, Dan Pitică and Ovidiu Pop. (2007). Characterization of Spiral Planar Inductors Built on Printed Circuit Boards. Applied Electronics Department, Technical University of Cluj-Napoca, Romania.

## Sitografia

- [I] <u>https://www.datamanager.it/2017/10/samsung-brevetta-la-ricarica-wireless-risonanza-magnetica/#:~:text=Samsung%2C%20che%20ha%20portato%20Linux,di%20farlo%20a nche%20a%20distanza.</u>
- [II] <u>https://tecnouser.net/cose-la-ricarica-wireless-smartphone/</u>
- [III] https://docs.rs-online.com/1e02/0900766b815f0d58.pdf
- [IV] <u>https://it.wikipedia.org/wiki/Impedenza</u>