

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO di  
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE  
"Guglielmo Marconi"  
DEI

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA  
DELLE TELECOMUNICAZIONI**

**TESI DI LAUREA**  
in  
Sistemi d'Antenna M

**PROGETTO ELETTROMAGNETICO DI  
ANTENNE PER TAG ECO-COMPATIBILI  
A BANDA ULTRA-LARGA**

CANDIDATO:  
**Marco Fantuzzi**

RELATORE:  
**Chiar.mo Prof. Ing. Vittorio Rizzoli**

CORRELATORI:  
**Prof. Ing. Diego Masotti**  
**Prof.ssa Ing. Alessandra Costanzo**

Anno Accademico 2012/2013

Sessione II



# Indice

<b>I</b>	<b>Introduzione al progetto GRETA</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
1.1	Possibili applicazioni . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Antenna per il <i>Green Tag</i></b>	<b>5</b>
2.1	UWB . . . . .	6
2.2	Energy Harvesting . . . . .	8
<b>II</b>	<b>Ricerca svolta</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Strumenti utilizzati</b>	<b>11</b>
3.1	Materiali utilizzati . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Antenna a spirale</b>	<b>13</b>
4.1	Spirale di Archimede con docce RF a 2.45 GHz . . . . .	15
4.1.1	Spirale realizzata . . . . .	16
4.1.2	Aumento raggio interno e modifiche alla spirale . . . . .	17
4.1.3	Utilizzo di linee interne . . . . .	20
4.1.4	Principali risultati . . . . .	22
4.2	Spirale logaritmica . . . . .	22
4.2.1	Spirale realizzata . . . . .	24
4.2.2	Aumento raggio interno e modifiche alla spirale . . . . .	24
4.3	Energy harvesting a 2.45 GHz . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Energy Harvesting a 868 MHz</b>	<b>28</b>
5.1	Spirale di Archimede con docce RF a 868 MHz . . . . .	29
5.1.1	Spirale realizzata . . . . .	29
5.1.2	Tecnica di gap-loading . . . . .	31
5.2	Spirale di Archimede e dipoli per energy harvesting . . . . .	32
5.2.1	Analisi del dipolo annesso alla spirale di Archimede . . . . .	34
5.2.2	Ricerca della struttura migliore . . . . .	39
5.2.3	Configurazione scelta . . . . .	49
5.2.4	Risultati in assenza di perdite . . . . .	52

---

<b>III</b>	<b>Circuito rettificatore e risultati</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>Circuito rettificatore</b>	<b>55</b>
6.1	Software utilizzato . . . . .	55
6.2	Circuito realizzato . . . . .	56
6.2.1	Soluzione 1 . . . . .	57
6.2.2	Risultati soluzione 1 . . . . .	58
6.2.3	Soluzione 2 . . . . .	59
6.2.4	Risultati soluzione 2 . . . . .	59
6.2.5	Potenza rettificata per diversi valori in ingresso . . . . .	61
6.3	Considerazioni sui risultati ottenuti . . . . .	61
6.3.1	Soluzione 1 senza perdite . . . . .	62
6.3.2	Soluzione 2 senza perdite . . . . .	63
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>65</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>70</b>

# Elenco delle figure

2.1	Schema di un sistema di recupero e accumulo di energia RF . . . . .	6
4.1	Spirale di Archimede e relativi parametri . . . . .	14
4.2	Antenna a spirale di Archimede con energy harvesting a 2.45 GHz . .	17
4.3	Diagramma di radiazione a 3 GHz . . . . .	18
4.4	Diagramma di radiazione a 4 GHz . . . . .	18
4.5	Diagramma di radiazione a 5 GHz . . . . .	19
4.6	Riduzione della lunghezza della porta: (a) porta discreta tradizionale (filo), (b) linee interne e utilizzo di face port . . . . .	21
4.7	Tabella riassuntiva risultati della spirale di Archimede all'aumentare del raggio interno ( <i>spiral_in_radius</i> ) . . . . .	22
4.8	Confronto dimensioni tra spirale logaritmica con estremità terminali "tagliate" (a destra) e la stessa struttura con nessun taglio (a sinistra)	23
4.9	Antenna a spirale logaritmica con energy harvesting a 2.45 GHz . . . .	25
4.10	Potenza disponibile e potenza rettificata al variare della distanza, con ERP pari a 27 dBm . . . . .	27
5.1	Risultati della spirale di Archimede con docce RF a 900 MHz al variare della larghezza delle linee da 1 a 4 mm . . . . .	30
5.2	Spirale di Archimede funzionante nella banda (0.9-5 GHz) . . . . .	31
5.3	Tecnica del gap-loading applicata alla spirale di Archimede funzionante nella banda (0.9-5 GHz) . . . . .	32
5.4	Spirale di Archimede con annesso dipolo per energy harvesting a 868 MHz . . . . .	33
5.5	Lunghezza della componente verticale del braccio del dipolo ( <i>length1</i> )	35
5.6	Risultati della spirale di Archimede con annesso dipolo per energy harvesting al variare della lunghezza <i>length1</i> . . . . .	36
5.7	Risultati della spirale di Archimede con annesso dipolo per energy harvesting al variare della lunghezza <i>length2</i> . . . . .	37
5.8	Risultati della spirale di Archimede con annesso dipolo per energy harvesting all'aumentare delle dimensioni . . . . .	38
5.9	Lunghezza complessiva del braccio che determina la risonanza del dipolo	40
5.10	Struttura A dell'antenna a spirale di Archimede con annesso dipolo ripiegato . . . . .	41

---

5.11	Struttura D dell'antenna a spirale di Archimede con annesso dipolo ripiegato . . . . .	43
5.12	Struttura K dell'antenna a spirale di Archimede con annesso dipolo ripiegato . . . . .	46
5.13	Struttura L dell'antenna a spirale di Archimede con annesso dipolo ripiegato . . . . .	47
5.14	Antenna finale scelta per la realizzazione del <i>green tag</i> . . . . .	50
5.15	Diagramma di radiazione a 868 MHz . . . . .	50
5.16	Diagramma di radiazione a 3 GHz . . . . .	51
5.17	Diagramma di radiazione a 4 GHz . . . . .	51
5.18	Diagramma di radiazione a 5 GHz . . . . .	52
6.1	Topologia circuitale relativa alla "soluzione 1" . . . . .	57
6.2	Topologia dell'accoppiatore utilizzato e relativi parametri . . . . .	58
6.3	Topologia circuitale relativa alla "soluzione 2" . . . . .	60
6.4	Potenza rettificata $P_{DC}$ al variare della potenza disponibile in ingresso, $P_{RF}$ , tra -20 e 0 dBm . . . . .	61
6.5	Efficienza di conversione al variare della potenza disponibile in ingresso, $P_{RF}$ , tra -20 e 0 dBm . . . . .	62
6.6	Efficienza di conversione in assenza di perdite al variare della potenza disponibile in ingresso, $P_{RF}$ , tra -20 e 0 dBm . . . . .	64

## Parte I

# Introduzione al progetto GRETA

# Capitolo 1

## Introduzione

L'evoluzione della società contemporanea e gli sviluppi delle tecnologie dell'informazione stanno spingendo verso l'introduzione di sistemi sempre più distribuiti nell'ambiente.

In questo contesto si collocano i paradigmi relativi a Internet of Things, Ubiquitous Electronics e Autonomous Logistics, che stanno guadagnando una popolarità sempre crescente. L'impatto di sistemi costituiti da una pluralità di nodi a basso costo (etichette o "tag"), spazialmente distribuiti, identificabili, localizzabili e in grado di rilevare parametri fisici, è potenzialmente enorme in settori quali la logistica, la sicurezza, l'energia e la salute.

Le funzionalità di identificazione, localizzazione e rilevazione sono ad oggi offerte in modo separato da tecnologie diverse quali Radio Frequency Identification (RFID), Wireless Sensor Networks (WSN) e Real-Time Locating Systems (RTLS).

E' evidente che l'integrazione di queste funzionalità in un unico dispositivo a basso costo amplierebbe enormemente le possibili applicazioni: purtroppo ciò non è possibile con le tecnologie esistenti, assai distanti tra loro. Tale integrazione richiede quindi l'individuazione di nuove soluzioni tecnologiche e una progettazione ex novo del sistema. Inoltre appare chiaro come i circuiti elettronici da impiegare dovranno possedere una caratteristica, finora presa in considerazione solo marginalmente e quasi sempre ex post, ma in futuro imprescindibile: la totale compatibilità con l'ambiente.

E' proprio in quest'ottica che si inserisce il progetto GRETA.

Il progetto GRETA rientra nell'ambito dei progetti PRIN - Programmi di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale, finanziati dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR).

L'acronimo GRETA sta per GREen TAGs (etichette "verdi"). Il progetto, che vede la collaborazione delle Università degli Studi di Bologna (coordinatrice del progetto),



Pavia, Perugia, Ferrara e L'Aquila, ha l'obiettivo strategico di studiare soluzioni innovative e tecnologie dirompenti per la realizzazione di un sistema distribuito d'identificazione, localizzazione, tracciamento e monitoraggio in ambienti indoor, basato su materiali compatibili con l'ambiente, dove i tag siano:

1. localizzabili con precisione sub-metrica anche in ambienti chiusi e in presenza di ostacoli;
2. di ridotte dimensioni (piatti, con area di pochi  $\text{cm}^2$ ) e funzionanti senza ingombranti batterie;
3. realizzati con materiali riciclabili e integrabili ad esempio in merci, vestiti o imballaggi.

Dal punto di vista tecnologico, il sistema ricercato associa a soluzioni concettualmente note, quali l'identificazione a radio frequenza (RFID), tecniche innovative di localizzazione a banda ultra larga (UWB), tecniche di monitoraggio attraverso l'utilizzo di sensori, tecnologie realizzative basate su materiali riciclabili (carta in primis) e tecniche di raccolta energetica (energy harvesting) al fine di realizzare un efficace, efficiente ed eco-compatibile sistema di monitoraggio e localizzazione in tempo reale.

## 1.1 Possibili applicazioni

Lo studio di queste reti di tag/sensori, combinato con l'uso di materiali riciclabili e di sistemi di energy harvesting, apre la strada a innumerevoli applicazioni, principalmente orientate al concetto di Internet of Things, alcune delle quali evidenziate anche negli obiettivi di Horizon 2020.

Fra queste si citano:

- eHealth: sensori energeticamente autonomi e poco invasivi per il monitoraggio di parametri biometrici (es. cerotti smart), dei farmaci, del personale medico, dell'attrezzatura sanitaria ed in generale di gestione di complesse attività ospedaliere;
- ICT for food: etichette (tag) su supporto cartaceo con a bordo sensori per il monitoraggio continuo del bene lungo la filiera produttiva e di distribuzione (es. catena del freddo);
- Factories of the future: tracciamento e monitoraggio dei beni e del personale autorizzato durante il processo produttivo per una gestione avanzata della logistica (supply chain management, SCM);
- Domotica: utilizzo di sensori di temperatura, di umidità, di presenza, ecc. per innumerevoli ambiti applicativi;
- Conservazione dei beni culturali: monitoraggio capillare, costante e poco invasivo delle condizioni ambientali in prossimità delle opere d'arte in musei e gallerie.

Tali applicazioni, grazie alla facilità di realizzazione e ai bassi investimenti richiesti, permetteranno anche a piccole e medie imprese di accedere a mercati in fortissima espansione quali quelli dei sistemi di comunicazione wireless, dei sensori e dei dispositivi biomedicali, a tutta riprova dell'elevato impatto economico-sociale del progetto.

## Capitolo 2

# Antenna per il *Green Tag*

Il lavoro elaborato in questi mesi si colloca quindi all'interno del progetto GRETA sopra descritto. In particolare si concentra sulla ricerca di un'opportuna antenna UWB tale da garantire le caratteristiche desiderate per il *green tag*.

L'antenna UWB ricercata deve incaricarsi della comunicazione reader-tag sulla banda (3.1-4.8 GHz), fornendo le necessarie caratteristiche di radiazione (opportuno guadagno, diagrammi di radiazione, efficienza, ecc.).

Come si discuterà in seguito, a tale scopo sono state analizzate diverse topologie di antenna a banda ultra larga, tra le quali si citano le antenne a spirale di Archimede e le antenne a spirale logaritmica; entrambe hanno, tra le altre cose, una topologia tale da garantire la desiderata condizione di auto-complementarità, la quale permette di ottenere un valore di impedenza pressochè costante su tutta la banda di interesse [1],[2].

Oltre alle funzionalità di comunicazione sulla banda UWB, l'antenna deve anche provvedere al recupero di energia dall'ambiente (energy harvesting), tramite un opportuno circuito rettificatore. L'antenna che converte l'energia a microonde in corrente continua prende il nome di rectenna (**rectifying antenna**). L'energia così convertita verrà poi opportunamente immagazzinata all'interno di un sottosistema di accumulo (vedi figura 2.1); da qui essa potrà poi essere convenientemente utilizzata per l'alimentazione dei sensori montati a bordo del tag e per tutte le altre funzionalità richieste da quest'ultimo.

L'eco-compatibilità sarà garantita realizzando l'intero circuito su un substrato di carta. La limitazione principale consiste nel dover contenere al massimo le dimensioni complessive della struttura, in modo tale da aumentare il più possibile il numero di plausibili applicazioni per cui può essere adottato il tag; tra le varie soluzioni esaminate verranno quindi considerate accettabili solo quelle con dimensioni del substrato di pochi cm.

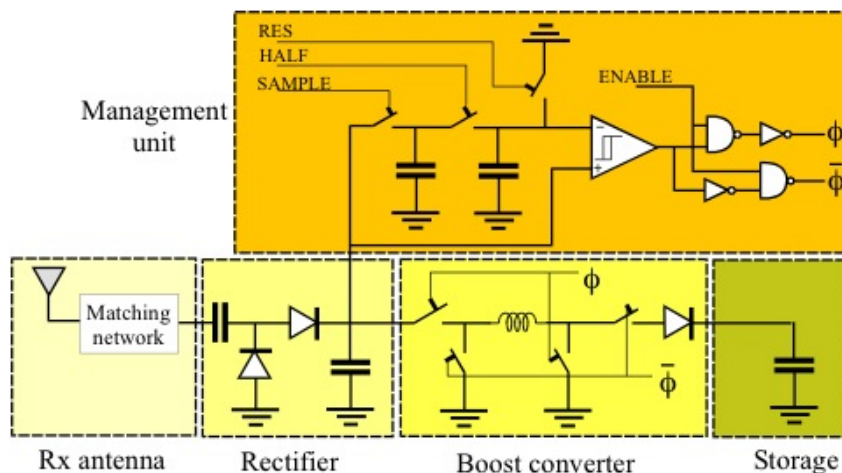


Figura 2.1: Schema di un sistema di recupero e accumulo di energia RF

Per sopperire ad entrambe le funzionalità richieste all'antenna del tag, una possibile soluzione sarebbe quella di prevedere due antenne distinte e separate tra loro: una che si occupa della comunicazione UWB e l'altra responsabile dell'energy harvesting. Sebbene questa implementazione non sia da escludere, è senza dubbio molto più interessante e innovativa (e per questo verrà investigata maggiormente) una soluzione caratterizzata da una singola antenna che provveda ad entrambe le funzioni.

## 2.1 UWB

Sotto il nome di Ultra Wide-Band (UWB) viene raccolta una serie di modalità di trasmissione di tipo prettamente impulsivo che permette di trasmettere e ricevere segnali mediante l'utilizzo di impulsi di energia a radiofrequenza di durata temporale estremamente ridotta (frazioni di nanosecondo) e quindi con occupazione spettrale necessariamente molto ampia (maggiore di 500 MHz).

L'UWB è una tecnologia che vede i suoi primi sviluppi oltre quarant'anni fa, ma che è emersa velocemente soprattutto negli ultimi anni grazie alle sue caratteristiche uniche, che permettono di ottenere grandi vantaggi in diverse aree di applicazione. Uno di questi, per esempio, è senza dubbio quello di sopperire ai grandi limiti del GPS per quanto riguarda la localizzazione indoor.

Tra i vantaggi principali si cita:

- **elevato bit rate:** la larghezza di banda occupata dai sistemi UWB permette una trasmissione ad un elevato bitrate consentendo, nelle corte distanze, di raggiungere velocità di qualche Gbit/s;
- **semplicità di implementazione:** il poter modulare direttamente un impulso si traduce nella possibilità di realizzare ricetrasmittitori poco costosi;
- **immunità ai cammini multipli:** grazie alla brevità dell'impulso, che minimizza il problema dell'interferenza tra il segnale diretto e quelli riflessi durante

il percorso, il segnale UWB vanta forte resistenza alle interferenze da cammini multipli. Questa proprietà rappresenta il principale motivo per cui tale tecnologia viene utilizzata nella localizzazione degli oggetti in ambienti chiusi (o ad alta densità di ostacoli);

- **comunicazione e localizzazione nello stesso tempo:** solitamente nei sistemi di comunicazione l'applicazione contemporanea di localizzazione e trasmissione dati comporta la presenza di numerose collisioni tra i due flussi, con la conseguenza di ottenere un basso data rate e un'alta imprecisione nella stima delle distanze. L'utilizzo di bande estremamente larghe permette di dividere i flussi di traffico ed evitare le collisioni;
- **capacità di penetrazione attraverso gli ostacoli:** i segnali UWB, a differenza della maggior parte dei segnali a banda stretta, non sono soggetti a forte attenuazioni da parte degli ostacoli; questo perché si osserva che i picchi di assorbimento dei diversi materiali (in particolare dei metalli) sono concentrati su bande di frequenza ristrette.

Nel 2002 la Federal Communication Commission (FCC) ha assegnato una nuova banda (3.1-10.6 GHz) senza licenza, nella quale l'UWB, lavorando con potenze praticamente sotto la soglia del rumore di fondo, può coesistere con gli altri sistemi a radiofrequenza. A partire dal 2003 l'European Telecommunications Standard Institute (ETSI) ed altre organizzazioni nazionali ed internazionali hanno proposto l'utilizzo dell'UWB ricalcando sostanzialmente la normativa statunitense.

Grazie alle sue ottime caratteristiche la tecnologia UWB può essere utilizzata per un grandissimo numero di applicazioni, che, con il costante aumento del livello di integrazione delle comunicazioni wireless in qualsiasi aspetto della nostra vita, è sicuramente destinato ad aumentare.

Sebbene grande enfasi sia posta sui suoi utilizzi in ambito commerciale, la tecnologia UWB è ugualmente impiegata in campo militare; uno dei principali vantaggi deriva dal fatto che, avendo uno spettro distribuito su un vastissimo range di frequenze, può risultare molto difficile da identificare.

Tra le principali applicazioni si cita:

- applicazioni radar per cui sia richiesta una risoluzione molto fine;
- applicazioni geolocation con misure della distanza e della posizione molto precise;
- comunicazioni ad elevati data rate;
- reti di comunicazione indoor (grazie all'elevata robustezza nei confronti del multipath);
- applicazioni militari LPD (Low Probability of Detection);
- applicazioni GPR (Ground Penetrating Radar) per la rivelazione e l'identificazione di obiettivi nascosti dietro ostacoli (come fogliame e pareti) o sotto terra;
- applicazioni mediche.

## 2.2 Energy Harvesting

Con il termine *energy harvesting* (anche indicato con *power harvesting* o *energy scavenging*) ci si riferisce a tutte quelle tecniche utilizzate per ricavare energia da sorgenti alternative presenti nell'ambiente che andrebbero altrimenti perse sotto forma di calore, luce, suoni, vibrazioni, ecc. questo processo permette di convertire tali forme di energia alternativa in energia elettrica direttamente utilizzabile.

Il tema dell'*energy harvesting* è stato sempre più oggetto di studi negli ultimi anni e si può affermare che molte applicazioni che utilizzano un tipo di alimentazione che sfrutta questo sistema sono diventate ormai di pratico utilizzo.

Se per esempio si fa riferimento ad un sistema WSN, quando un nodo wireless si trova in una posizione in cui una alimentazione diretta o una batteria sono non disponibili o comunque non convenienti, l'*energy harvesting* può fornire o quantomeno aumentare il supporto di potenza. In un'altra situazione, un nodo di controllo remoto che sfrutta l'*energy harvesting* può essere convenientemente implementato come sistema elettronico auto-alimentato, o ancora, in generale, l'utilizzo di sorgenti di energia multiple può essere sfruttato per migliorare l'efficienza complessiva e l'affidabilità di qualsiasi sistema.

Nell'ambiente che ci circonda è costantemente presente una certa quantità di energia elettromagnetica a causa del grande numero di servizi wireless che investe qualsiasi aspetto della nostra vita in modo sempre più pervasivo. Questa energia può quindi essere vantaggiosamente utilizzata anche dove non viene sfruttata per il servizio preposto.

Una rectenna, costituita da un'antenna ricevitrice e da un circuito rettificatore, è il dispositivo fondamentale che permette di convertire la potenza a radiofrequenza in potenza direttamente utilizzabile: l'antenna raccoglie la potenza a microonde incidente e il circuito rettificatore la converte in corrente continua. Negli ultimi anni sono stati utilizzati diversi tipi di antenne per il progetto di rectenne, tra cui dipoli [3],[4], antenne a patch [5],[6],[7] e antenne ad anello [8]; come per l'antenna, anche i circuiti rettificatori della rectenna possono avere diverse configurazioni.

Tipicamente le frequenze più sfruttate per l'*energy harvesting* sono quelle che risultano quasi sempre disponibili nei tipici ambiente di utilizzo, tra cui quelle della telefonia mobile (GSM 900, GSM 1800) e del WiFi a 2.4 GHz. Per sfruttare questo tipo di segnali, è necessario utilizzare rectenne tali da essere in grado di operare su bande diverse [9],[10],[11].

Chiaramente l'utilizzo di *energy harvesting* può risultare conveniente in uno scenario potenzialmente infinito di applicazioni, per esempio per dispositivi elettronici dotati di batteria, come smartphone, tablet, notebook, come per WSN, o per equipaggiamento militare, ma anche in campo medico o per qualsiasi altro bene di utilizzo commerciale.

Tutte queste applicazioni condividerebbero gli stessi vantaggi nell'utilizzo dell'*energy harvesting*:

- **convenienza:** i consumatori non dovrebbero più preoccuparsi continuamente di collegare e ricaricare i loro dispositivi portatili ad una fonte di alimentazione fissa;

- **sorgenti di energia in casi di emergenza:** dispositivi di energy harvesting potrebbero anche essere utilizzati come fonti di alimentazione sostitutive nel caso di malfunzionamento o guasto dell'alimentazione primaria, aumentando così l'affidibilità dell'intero sistema contro eventuali interruzioni di alimentazione. Esigenze di questo tipo sono di vitale importanza in ambienti come ospedali, in cui l'energia è sempre necessaria, anche in situazioni di emergenza (blackouts, terremoti, ecc.);
- **mobilità:** la capacità di raccogliere energia dall'ambiente può svincolare ulteriormente dalla necessità di batterie o connessioni a linee di alimentazione fissa;
- **motivi economici e ambientali:** i costi per i consumatori possono essere ridotti in termini di sviluppo, imballaggio, longevità e possibilità di riuso di certi prodotti; anche l'installazione e la manutenzione di un certo numero di prodotti potrebbe vedere significative riduzioni di costi. Un esempio è quello del risparmio che deriverebbe direttamente dall'eliminazione di batterie e relativi ricaricatori dai dispositivi elettronici di consumo, come cellulari, tablet, portatili, ecc.

Per garantire l'autonomia energetica del microsistema basato su carta oggetto di studio, saranno combinate tecniche di accumulo di energia a RF con sistemi di gestione efficiente della potenza. A tale scopo sarà necessario sviluppare topologie innovative di antenne su substrati di carta con l'obiettivo di ottenere efficienze di radiazione paragonabili a quelle tipiche di substrati più tradizionali, pur mantenendo contenuta l'area dedicata al layout (pochi cm<sup>2</sup>). Per quegli ambienti nei quali le sorgenti radio disponibili risultino insufficienti, si propone di utilizzare dei "distributori di potenza a RF" (docce RF - energy showers) che forniranno via RF l'energia necessaria ai tag presenti nell'area.

**Parte II**

**Ricerca svolta**



## Capitolo 3

# Strumenti utilizzati

Per la ricerca e il progetto di un'apposita antenna con cui realizzare il tag è stato utilizzato il software CST Microwave Studio<sup>®</sup> (CST MWS).

CST MWS è uno strumento specializzato per la simulazione elettromagnetica 3D di componenti ad alta frequenza. Permette quindi un'analisi veloce e accurata di dispositivi come antenne, filtri, accoppiatori, strutture planari e multi-strato, fornendo una rappresentazione del comportamento elettromagnetico dei progetti creati; viene inoltre utilizzato per lo studio di compatibilità elettromagnetica e integrità del segnale.

CST MWS semplifica la creazione delle strutture da simulare mettendo a disposizione un potente strumento grafico di modellizzazione 3D; dopo che il modello è stato progettato, prima di avviare la simulazione, viene creata automaticamente una procedura di meshing per l'intera struttura.

Una delle principali peculiarità di CST MWS consiste nel permettere di scegliere il tipo di simulazione o di mesh che meglio si adatta al particolare problema in esame; nessun metodo infatti funziona ugualmente bene per ogni applicazione. Una volta scelto un particolare metodo di simulazione, questo supporta al suo interno i tipi di mesh che meglio si adattano alla tecnica di simulazione scelta.

Lo strumento più flessibile è sicuramente il *transient solver*; questo è infatti in grado di fornire il comportamento in frequenza di un dispositivo a banda larga tramite una sola simulazione (al contrario dell'approccio a step di diverse frequenze adottato da molti altri simulatori). Questo tipo di simulatore è particolarmente efficiente per la maggior parte di applicazioni ad alta frequenza come connettori, linee di trasmissione, filtri e antenne.

Un'altra utilissima caratteristica di CST MWS è senza dubbio la possibilità di ottenere una completa parametrizzazione della struttura; questo permette quindi l'uso di variabili per definire i vari componenti.

Per lo studio svolto è stato utilizzato il simulatore transient solver con un meshing realizzato tramite esaedri.

### 3.1 Materiali utilizzati

L'antenna investigata consiste di un'antenna planare realizzata tramite getto di inchiostro conduttivo al di sopra di un substrato di carta.

La carta appare come un ottimo candidato per ridurre l'impatto ambientale della fabbricazione di circuiti elettronici; essa infatti è un materiale ampiamente disponibile, a bassissimo costo e soprattutto è completamente eco-compatibile, sia durante la sua produzione che al momento del suo smaltimento.

La stampa a getto d'inchiostro può essere impiegata efficacemente per realizzare circuiti elettronici su tali substrati [12], senza bisogno di alcun processo ad attacco chimico o uso di acidi; la carta può essere poi resa impermeabile o lavorata con materiali fuoco-ritardanti.

Nonostante siano possibili trattamenti di questo tipo per sopperire alle principali limitazioni del materiale, questo non toglie il fatto che la carta non possiede certamente le migliori caratteristiche di substrato per realizzare efficienti dispositivi elettronici; il suo principale vantaggio è dovuto al fatto che rappresenta indubbiamente uno dei migliori materiali eco-compatibili: la sua alta biodegradabilità ne permette infatti una decomposizione in materiale organico nel giro di breve tempo.

Le proprietà dielettriche utilizzate per le simulazioni sono le seguenti:

- costante dielettrica  $\varepsilon_r = 2.85$
- tangente di perdita  $\tan \delta = 0.053$  (a 4 GHz)

per quanto riguarda invece l'inchiostro conduttivo:

- conducibilità elettrica  $\sigma = 1.5 \cdot 10^7 \text{ S/m}$

Lo strato di carta ha uno spessore di 0.23 mm; per realizzare il substrato si utilizzano tre strati di carta, per uno spessore complessivo del substrato di 0.69 mm. L'inchiostro conduttivo depositato sul substrato di carta ha invece uno spessore di 35  $\mu\text{m}$ .

## Capitolo 4

# Antenna a spirale

Le varie simulazioni svolte si sono concentrate sulla possibilità di ricavare un'antenna a banda larga, operante nella banda (3.1-4.8 GHz) per la comunicazione tag-reader.

A tale scopo si è utilizzata un'antenna a spirale di Archimede. Tale antenna viene realizzata utilizzando due spirali ruotate di  $180^\circ$  l'una rispetto all'altra intorno all'origine; le correnti che scorrono su queste arrivano, dopo una certa sezione, a trovarsi praticamente in fase tra loro; qui inizia la cosiddetta *zona attiva* dell'antenna, una zona circolare approssimabile ad una spira a onda intera in regime di onda progressiva. In questa zona l'antenna produce un'irradiazione di tipo broadside con campo a polarizzazione circolare nella direzione di massimo. Al variare della frequenza la zona attiva cambia posizione, perché variando la lunghezza d'onda di lavoro cambia anche il diametro della zona circolare "attiva"; a parte questo il comportamento dell'antenna si mantiene pressoché invariato (auto-similarità). E' proprio il principio di auto-similarità che permette di ottenere prestazioni quasi costanti su bande estremamente larghe.

Oltre a questo principio, la struttura viene realizzata in modo tale da soddisfare anche l'auto-complementarità; questo significa che la metallizzazione dell'antenna può essere sostituita dal dielettrico e viceversa senza apportare nessuna modifica alla struttura dell'antenna [2]. Tale condizione permette di ottenere un valore di impedenza praticamente costante su tutta la banda di lavoro.

La struttura dell'antenna è quella rappresentata in figura 4.1, in cui compaiono anche le principali grandezze con cui l'antenna è stata parametrizzata.

I parametri utilizzati hanno il seguente significato:

- *sub\_side*: lato del substrato di carta;
- *spiral\_width*: larghezza delle linee di inchiostro conduttivo della spirale;

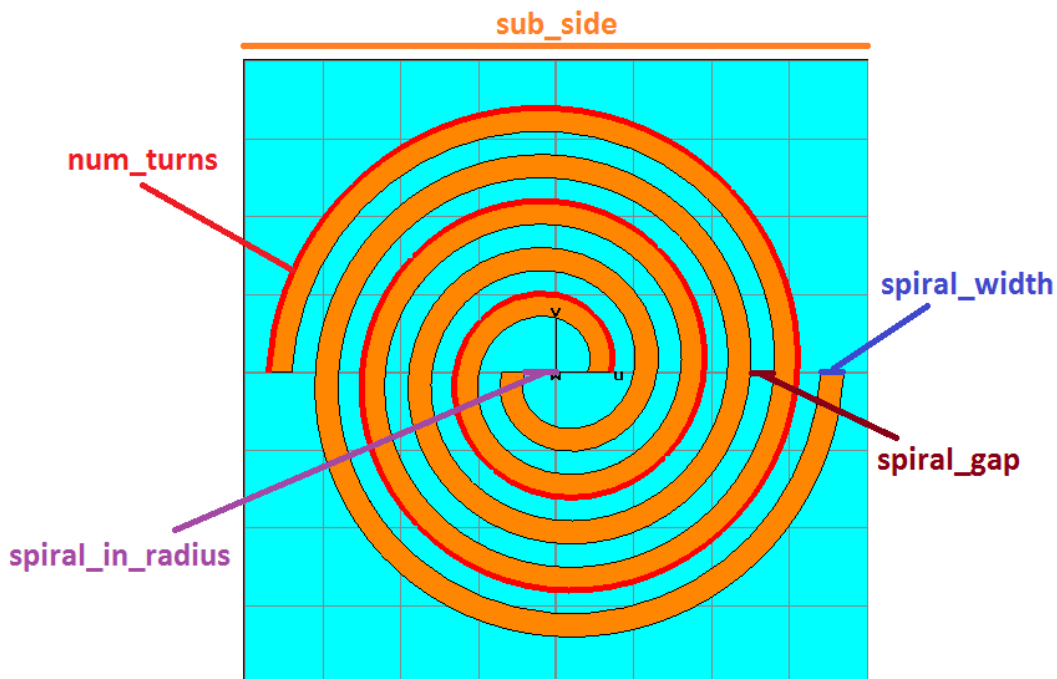


Figura 4.1: Spirale di Archimede e relativi parametri

- *spiral\_gap*: spazio tra le linee della spirale (per avere auto-complementarità si sceglie identico a *spiral\_width*);
- *spiral\_in\_radius*: raggio interno della spirale (rappresenta la distanza tra il centro della spirale e il punto di partenza della linea. Quest'ultimo coincide con il punto di alimentazione);
- *num\_turns*: numero di “giri” della spirale.

Nel seguito tutte le lunghezze verranno indicate in millimetri.

Nel corso delle varie simulazioni svolte durante la ricerca sono stati continuamente individuati ed analizzati alcuni parametri di merito, che esprimevano di volta in volta le prestazioni dell'antenna simulata, ovvero le sue caratteristiche di radiazione. Di seguito vengono elencati i principali tra tali parametri e per ciascuno di essi si dà una breve descrizione delle caratteristiche ricercate.

- **|S11|**: il modulo del coefficiente di riflessione esprime senza dubbio una tra le più importanti caratteristiche dell'antenna, dà infatti una misura di quanto questa risulti adattata. Se ne analizza quindi l'andamento per tutta la banda di frequenza di interesse: in particolare da 3.1 a 4.8 GHz l'antenna si considera adattata per un valore di |S11| inferiore ai -10 dB;
- **Z11**: anche l'impedenza d'antenna fornisce importantissime informazioni; in particolare si analizzano separatamente l'andamento della sua parte reale  $\text{Re}(Z_{11})$

e immaginaria  $\text{Im}(Z_{11})$ . La prima, resistenza di radiazione, si desidera il più possibile costante (variazione massima di circa  $20 \Omega$ ) su tutta la banda, mentre la seconda, reattanza d'antenna, si ricerca il più possibile bassa, idealmente nulla. Per un'antenna a spirale del tipo considerato ci si attende una resistenza di radiazione di  $120 \Omega$ , valore che viene per questo scelto come impedenza di normalizzazione per i parametri di diffusione (coefficiente di riflessione  $S_{11}$ );

- **efficienza di radiazione:** l'efficienza di radiazione si può intendere come rapporto tra la potenza irradiata e la potenza di alimentazione accettata in ingresso dall'antenna; questa chiaramente si dovrà cercare di renderla più alta possibile;
- **axial ratio:** l'axial ratio ci dà informazioni relative alla polarizzazione dell'antenna; esso si può intendere come rapporto tra i due assi dell'ellisse di polarizzazione del campo irradiato dall'antenna: per avere una polarizzazione circolare questo valore dovrà quindi risultare il più possibile prossimo a 1 (in scala lineare, a 0 dB in scala logaritmica), valori alti invece indicano una polarizzazione rettilinea. Quando si ricerca polarizzazione circolare, generalmente si ritengono accettabili valori di axial ratio inferiori ai 6 dB (il che significa che una delle due componenti in cui si può considerare scomposto il campo nel piano di polarizzazione non risulta superiore a 4 volte l'altra componente). Per il tag oggetto di questo lavoro di tesi si ricerca chiaramente una polarizzazione circolare in tutta la banda (3.1-4.8 GHz). Facendo riferimento ai diagrammi di radiazione tipo figura 4.3, si considera tipicamente l'andamento dell'axial ratio sul piano  $\phi = 0$  al variare di  $\theta$  e se ne valuta il valore per  $\theta = 0$ , direzione coincidente con quella di massima irradiazione dell'antenna.

### 4.1 Spirale di Archimede con docce RF a 2.45 GHz

La prima ricerca svolta ha avuto come obiettivo quello di realizzare un'unica antenna che riuscisse a provvedere sia alle funzioni di comunicazione UWB sulla banda (3.1-4.8 GHz), sia a quelle di energy harvesting. In particolare si è cercato di costruire una struttura tale da realizzare un'efficiente recupero di potenza alla frequenza 2.45 GHz.

Un fattore chiave che è sempre stato tenuto in considerazione è la dimensione complessiva dell'antenna; è stata più volte sottolineata la necessità di contenere il più possibile l'estensione del tag: quest'ultimo non dovrebbe risultare più grande di 4-5 cm (*sub\_side*), così da non pregiudicare molte delle numerose applicazioni per cui potrebbe essere impiegato. Ciononostante, per un corretto funzionamento dell'antenna, vanno sicuramente rispettati alcuni vincoli riguardo alle sue dimensioni minime: la spirale si comporta come una spira a onda intera in regime di onda progressiva, al variare della frequenza questo avviene nella zona circolare avente circonferenza pari alla lunghezza d'onda di lavoro, ovvero per cui  $\lambda = 2\pi R$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda e  $R$  è il raggio della zona circolare. Poiché il tag deve funzionare correttamente su tutta la banda compresa tra 3.1 e 4.8 GHz, la spirale dovrà avere dimensioni tali da "contenere" una zona circolare di raggio  $R$  compreso tra:

$$R_{4.8} \leq R \leq R_{3.1} \quad (4.1)$$

dove  $R_{4.8}$  è il raggio che corrisponde alla frequenza di lavoro più alta (e rappresenta perciò il raggio più interno), mentre  $R_{3.1}$  è il raggio che corrisponde alla frequenza di lavoro minore (e quindi raggio più esterno); per inserire un certo margine di sicurezza, anziché considerare queste precise frequenze di lavoro, si è analizzato il comportamento della spirale tra la frequenza minima di 3 GHz e quella massima di 5 GHz, in questo caso deve quindi valere:

$$9.5 \leq R \leq 15.9 \quad (4.2)$$

dove le grandezze sono espresse in millimetri. Questo significa che la zona più interna della spirale, a partire dalla porta di alimentazione, dovrà contenere una sezione tale per cui alla circonferenza con raggio 9.5 mm si viene già a creare la desiderata condizione di correnti in fase sui due bracci che formano la spirale. Per quanto riguarda la zona esterna, questa non potrà avere raggio inferiore a 15.9 mm, ovvero 31.8 mm di diametro; se a questo si aggiunge qualche millimetro di margine tra il termine della spirale conduttiva e il substrato di carta su cui questa viene depositata, appare chiaro come le dimensioni minime della struttura non possano essere inferiori ai 3.5 cm circa.

Una volta appurati i vincoli “invalidabili” sulle dimensioni della struttura, bisogna considerare che in questa prima investigazione si cerca un sistema che sia in grado di svolgere contemporaneamente le funzioni di comunicazione nella banda UWB e di energy harvesting con un’unica antenna. Poiché si vuole realizzare energy harvesting a 2.45 GHz, le dimensioni dell’antenna dovranno essere opportunamente adattate.

La zona circolare di circonferenza pari alla lunghezza d’onda dei 2.45 GHz ha raggio  $R_{2.45} = 19.4$  mm, seguendo ragionamenti analoghi a quanto appena esposto, è evidente che l’antenna realizzata non potrà avere dimensioni inferiori a 4 cm.

#### 4.1.1 Spirale realizzata

Dopo alcune investigazioni è stata individuata un’antenna che soddisfa le caratteristiche ricercate; i parametri relativi all’antenna in oggetto sono i seguenti:

parametro	valore	descrizione
<i>num_turns</i>	5.5	numero giri della spirale
<i>spiral_in_radius</i>	0.5	raggio interno della spirale
<i>spiral_width</i>	1	larghezza linee della spirale
<i>spiral_gap</i>	<i>spiral_width</i>	spazio tra le linee della spirale
<i>sub_side</i>	53	lato del substrato
<i>paper_thick</i>	0.23	spessore strato di carta
<i>sub_thick</i>	3* <i>paper_thick</i>	spessore substrato di carta
<i>ink_thick</i>	0.035	spessore inchiostro conduttivo

Dove, come sempre, le grandezze sono espresse in millimetri. La struttura dell’antenna è rappresentata in figura 4.2.

Questa antenna ha buone caratteristiche di radiazione su tutta la banda considerata (3-5 GHz): presenta infatti una resistenza di radiazione pressoché costante, intorno ai 125  $\Omega$  e una reattanza molto bassa (tra i 25 e i 30  $\Omega$ ). Per quanto riguarda l’adattamento,  $|S_{11}|$  risulta inferiore ai -10 dB (in particolare è circa uguale a -15 dB) su

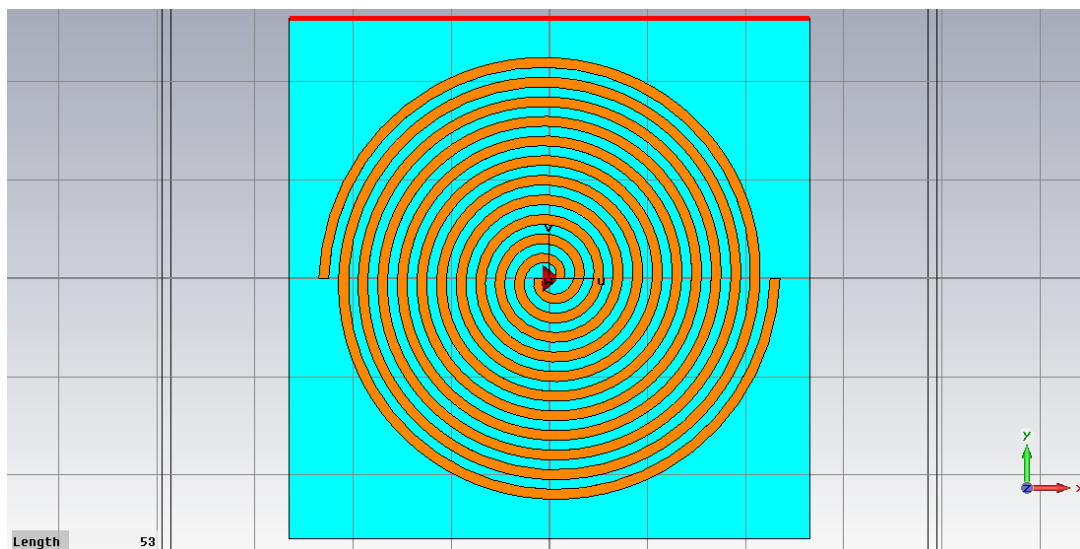


Figura 4.2: Antenna a spirale di Archimede con energy harvesting a 2.45 GHz

tutta la banda dai 3 ai 5 GHz e presenta un picco di risonanza a 2.45 GHz, utilissimo ai fini della realizzazione delle docce RF. Anche l'efficienza di radiazione appare molto buona, tra il 79 e l'85%; infine dall'analisi dell'axial ratio emerge che la polarizzazione è circolare su tutta la banda.

Per quanto riguarda i diagrammi di radiazione, questi sono rappresentati (in scala lineare) nelle figure 4.3, 4.4, 4.5 rispettivamente a 3, 4 e 5 GHz.

Come si può notare dall'immagine della struttura, la particolare antenna considerata ha dimensioni del substrato pari a 5.3 cm; queste garantiscono un corretto funzionamento dell'antenna da 3 a 5 GHz, ma soprattutto sono tali da permettere l'esistenza di un picco di risonanza a 2.45 GHz.

Il raggio interno della spirale (inteso in questo caso come distanza dal centro della spirale al punto di alimentazione) è di 0.5 mm, ciò significa che al centro della spirale si ha a disposizione un'area di  $1 \text{ mm}^2$ .

Al fine di ottenere un'area in cui poter realizzare circuiteria utile al corretto funzionamento del tag, tra cui per esempio il circuito rettificatore, si vuole cercare di aumentare il più possibile questa zona centrale "libera". A tale scopo, partendo dall'antenna appena descritta, di ottime proprietà radiative su tutta la banda d'interesse, si cerca di apportare alcune modifiche (aumento o diminuzione della larghezza delle linee della spirale, variazione del numero di giri della spirale, ecc.) in modo da ottenere caratteristiche simili, ma con raggio interno aumentato.

#### 4.1.2 Aumento raggio interno e modifiche alla spirale

A partire dalla spirale poc'anzi descritta, si è provato quindi a percorrere strade diverse per cercare di aumentare l'area "vuota" al centro della spirale e, in generale, per cercare di migliorare ulteriormente le prestazioni. Al variare della larghezza delle linee della spirale, del numero di giri della stessa e del raggio interno, è stato esami-

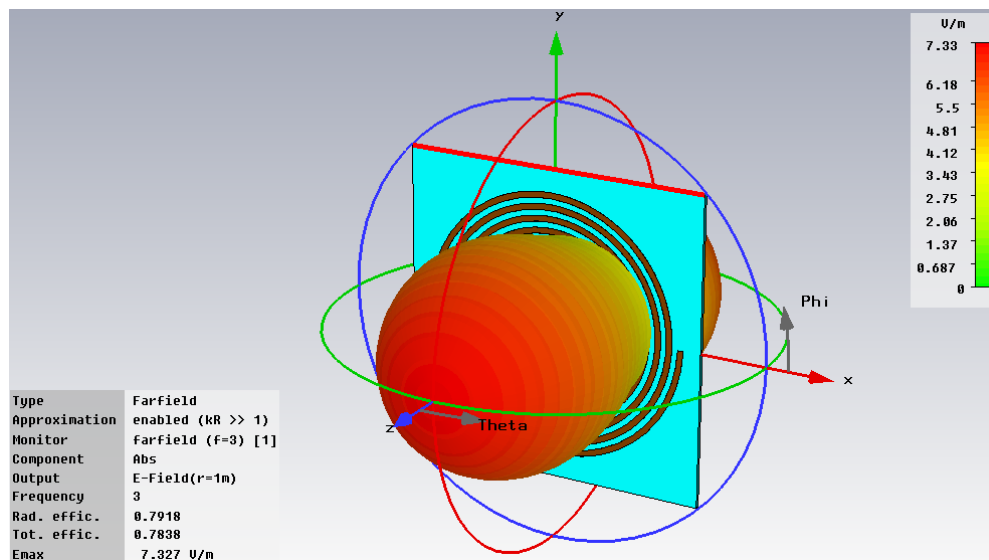


Figura 4.3: Diagramma di radiazione a 3 GHz

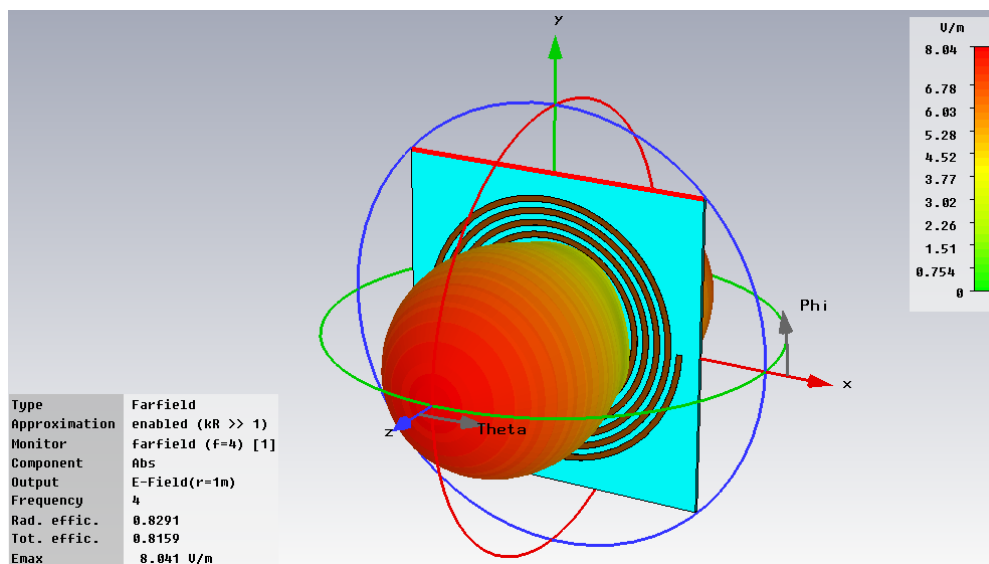


Figura 4.4: Diagramma di radiazione a 4 GHz



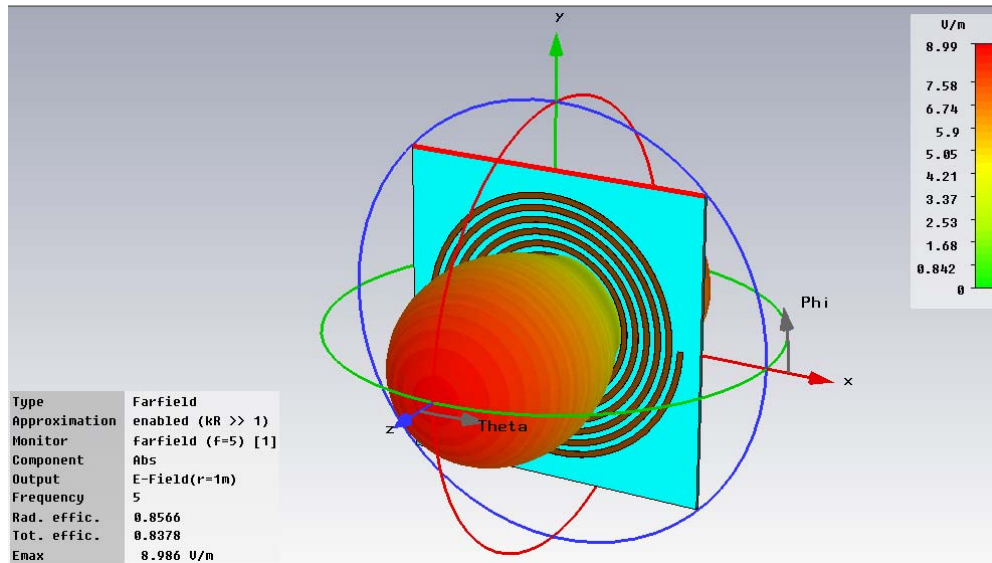


Figura 4.5: Diagramma di radiazione a 5 GHz

nato l'evolversi dei diagrammi di radiazione, dell'efficienza, dell'impedenza e di tutti i parametri caratteristici della radiazione.

Si è provato quindi, come primo tentativo, ad aumentare bruscamente il raggio interno della spirale, lasciando invariati gli altri parametri (larghezza linee e numero di giri); *spiral\_in\_radius* è stato aumentato, a partire dagli 0.5 mm di partenza, a 1 mm, 2 e infine 5 mm; l'area interna è quindi aumentata, da 1 mm<sup>2</sup> di partenza, a rispettivamente 4mm<sup>2</sup>, 16 mm<sup>2</sup> e infine 1 cm<sup>2</sup>.

Purtroppo questo aumento di *spiral\_in\_radius* ha causato un aumento in valore assoluto sia di  $\text{Re}(Z_{11})$  che di  $\text{Im}(Z_{11})$ , ma soprattutto della loro variazione nella banda (3-5 GHz), nel caso di raggio interno uguale a 5 mm  $\text{Re}(Z_{11})$  varia addirittura da circa 200  $\Omega$ , per 3 GHz, fino a più di 500  $\Omega$ , a 5 GHz. Questo notevole peggioramento può essere probabilmente imputato alla violazione della struttura auto-complementare; la zona interna della spirale infatti non è più tale da permettere uno scambio tra metallizzazione e dielettrico. Degrado ancor più notevole è stato misurato per  $|S_{11}|$ , che già per raggio interno di 2 mm non risulta più inferiore a -10 dB nella banda di interesse.

Per quanto detto in precedenza, si potrebbe notare che dal punto di inizio della spirale (punto di alimentazione) alla circonferenza corrispondente alla frequenza di lavoro più alta (ovvero quella con raggio  $R_5 = 9.5$  mm) è necessaria la presenza di un certo tratto iniziale per cui la corrente che scorre nei due bracci riesca a raggiungere la desiderata condizione di fase alla prima circonferenza di interesse (corrispondente appunto ai 5 GHz); si può allora pensare che l'aumento del raggio interno faccia sì che questa condizione non abbia il tempo di verificarsi in corrispondenza di questa prima circonferenza. Per tentare di risolvere questo problema si è deciso di provare a diminuire la larghezza delle linee della spirale, in modo da garantire la presenza di un numero maggiore di "giri" prima dell'inizio della zona attiva corrispondente a  $R_5$ .

Ripartendo quindi da raggio interno di 0.5 mm, si è esaminato il comportamento dell'antenna al diminuire della larghezza delle linee (*spiral\_width*); dalla larghezza iniziale di 1 mm si è passati a 0.8 mm, 0.6 e 0.5 mm. Questo, evidentemente, permette la formazione di un numero di giri maggiore nella spirale, proprio grazie alle ridotte dimensioni.

Dai risultati ottenuti non sono emerse sostanziali differenze, si è notato però che  $\text{Re}(Z_{11})$  assume valori più bassi di qualche Ohm e sembra rimanere ancora più costante nella banda (3-5 GHz) di quanto non facesse per *spiral\_width*=1 mm; in particolare, per *spiral\_width*=0.8 mm,  $\text{Re}(Z_{11})$  assume un valore praticamente costante pari esattamente ai 120  $\Omega$  che ci si attende dalla letteratura.

Poiché all'ulteriore diminuire della larghezza delle linee l'efficienza di radiazione inizia a calare sensibilmente, si è fissato per *spiral\_width* proprio 0.8 mm e, a partire da questo, si è proceduto con ulteriori simulazioni.

Occorre innanzitutto notare che, avendo diminuito la larghezza delle linee e avendo lasciato invariato il numero di giri e il raggio interno, le dimensioni della spirale sono chiaramente diminuite; per riottenere il desiderato picco di risonanza a 2.45 GHz si è allora aumentato il numero di giri, per la precisione la configurazione esatta è stata trovata fissando *num\_turns* a 6.8. Come ci si può aspettare, in questo modo le dimensioni complessive della struttura sono tornate praticamente identiche a quelle della spirale iniziale (larghezza linee 1 mm), infatti in questo caso *sub\_side* risulta essere pari a 5.2 cm.

#### 4.1.3 Utilizzo di linee interne

A questo punto, fissata quella che sembra essere la larghezza ottimale per le piste, si è riprovato ad aumentare bruscamente il raggio interno della spirale.

Purtroppo sono stati nuovamente ottenuti i risultati indesiderati ricavati in precedenza:  $Z_{11}$  varia sensibilmente e  $|S_{11}|$  assume valori superiori a -10 dB su tutta la banda (3-5 GHz).

I risultati negativi che si ottengono in seguito a questo aumento delle dimensioni dell'area centrale sono principalmente dovuti al fatto che CST MWS descrive la porta discreta utilizzata per l'alimentazione come un filo, il quale introduce inevitabilmente un'induttanza parassita; questo significa che, all'aumentare del raggio interno della spirale, la crescente lunghezza di questo filo introduce effetti parassiti sempre più rilevanti.

Per fare fronte a questo inconveniente si è allora pensato di creare un prolungamento della parte interna della spirale mediante due linee, una per ciascuno dei due bracci della spirale e utilizzare le "face port" che CST MWS mette a disposizione per l'alimentazione. L'espedito realizzato è illustrato in figura 4.6.

Come è stato verificato, la realizzazione di queste linee interne permette di limitare gli effetti parassiti introdotti dall'induttanza della porta discreta e questo migliora sensibilmente i risultati.

Sebbene questo espedito aiuti, non risolve purtroppo del tutto la situazione: con larghezza delle linee pari a 0.8 mm e raggio interno superiore a 1-2 mm le prestazioni non risultano soddisfacenti.

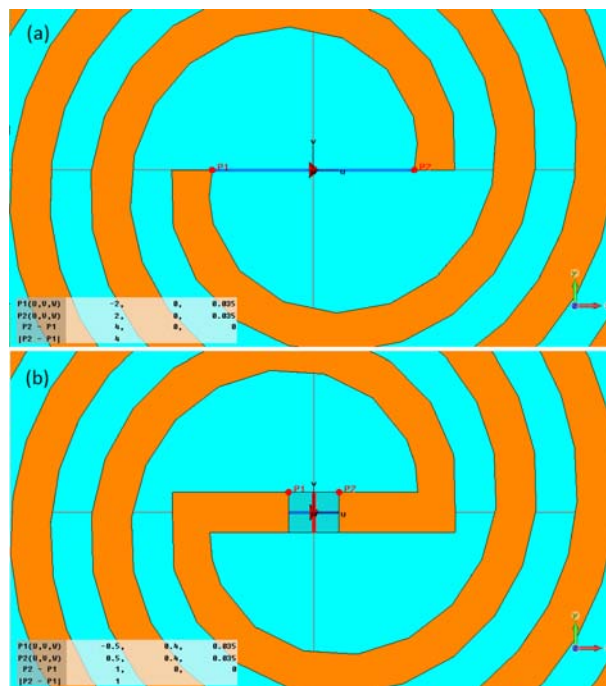


Figura 4.6: Riduzione della lunghezza della porta: (a) porta discreta tradizionale (filo), (b) linee interne e utilizzo di face port

A questo punto allora, appurato che un'ulteriore riduzione della larghezza delle linee non migliora la situazione (ma al contrario la peggiora), si è provato a vedere come questa possa variare aumentando la larghezza *spiral\_width* oltre 1 mm.

Intuitivamente, infatti, si può pensare che un'allargamento della larghezza delle linee della spirale possa ricondurre ad una situazione più vicina a quella iniziale di auto-complementarità, in quanto allargando *spiral\_width* lo spazio lasciato nella zona centrale risulta meno rilevante confrontato con le dimensioni della spirale, ora aumentate.

Effettivamente, se si prova a realizzare una spirale con raggio interno di 5 mm e utilizzando le linee interne sopra descritte, aumentando *spiral\_width* a 1.2, 1.4 e 1.6 mm si può immediatamente notare che il trend è quello di un'impedenza meno variabile e di  $|S_{11}|$  che, seppur non ancora inferiore a -10 dB, si abbassa sempre più nella banda (3-5 GHz). In seguito a questi risultati incoraggianti, si è proseguito con l'aumento di *spiral\_width* oltre i 2 e persino 3 mm. Anche in questo caso, però, non si è arrivati ad un risultato soddisfacente:  $|S_{11}|$  continua a diminuire leggermente, ma mai fino ad arrivare sotto i -10 dB, anche per *spiral\_width*=3 mm infatti  $|S_{11}|$  risulta circa pari a -8 dB; un'ulteriore aumento della larghezza delle linee non è stato possibile, in quanto le dimensioni complessive risultavano troppo elevate (*sub\_side*=7-8 cm).

spiral_in_radius	area interna	linee interne	risultati positivi	risultati negativi
0.5 mm	1 mm <sup>2</sup>	NO	efficienza $\approx$ 80% $ S_{11}  < -15$ dB $\Delta\text{Re}(Z_{11}) \approx 6 \Omega$	---
1 mm	4 mm <sup>2</sup>	NO	efficienza $\approx$ 75-80% $ S_{11}  < -10$ dB $\Delta\text{Re}(Z_{11}) \approx 10 \Omega$	---
1.5 mm	9 mm <sup>2</sup>	NO	$\Delta\text{Re}(Z_{11}) \approx 18 \Omega$	$ S_{11}  > -10$ dB
1.5 mm	9 mm <sup>2</sup>	SI	$\Delta\text{Re}(Z_{11}) \approx 18 \Omega$ $ S_{11}  < -10$ dB	---
2 mm	16 mm <sup>2</sup>	SI	$ S_{11}  < -10$ dB	$\Delta\text{Re}(Z_{11}) \approx 30-35 \Omega$
2.5 mm	25 mm <sup>2</sup>	SI	se spiral_width $> 1$ mm $ S_{11}  < -10$ dB efficienza $\approx 85\%$	$\Delta\text{Re}(Z_{11}) \approx 60-70 \Omega$ se spiral_width $\leq 1$ mm $ S_{11}  > -10$ dB
3 mm	36 mm <sup>2</sup>	SI	se spiral_width = 1.4 mm $ S_{11}  \approx -10$ dB efficienza $\approx 80\%$	se spiral_width $< 1.4$ mm $ S_{11}  > -10$ dB $\Delta\text{Re}(Z_{11}) \approx 90-100 \Omega$ se spiral_width = 1.4 mm $ S_{11}  > -10$ dB $\Delta\text{Re}(Z_{11}) \approx 70 \Omega$
3.5 mm	49 mm <sup>2</sup>	SI	---	per spiral_width che aumenta (oltre 1 mm) $ S_{11} $ cala, ma mai sotto -10 dB $\Delta\text{Re}(Z_{11})$ oltre i 100 $\Omega$

Figura 4.7: Tabella riassuntiva risultati della spirale di Archimede all'aumentare del raggio interno (*spiral\_in\_radius*)

#### 4.1.4 Principali risultati

Nella tabella di figura 4.7 vengono riportati i principali risultati ottenuti dalle investigazioni effettuate. Si è considerato come sempre il valore di efficienza di radiazione raggiunta,  $|S_{11}|$  e  $Z_{11}$ , in particolare la variazione della sua parte reale sulla banda (3-5 GHz).

All'aumentare del raggio interno le proprietà della spirale diventano sempre più critiche, tanto che a partire da *spiral\_in\_radius*=1.5 mm si rende necessario l'utilizzo di linee interne; nonostante l'utilizzo di queste ultime, poi, non è comunque stato possibile raggiungere buoni risultati per raggio interno superiore a 2 mm.

In seguito ai risultati ricavati relativi all'utilizzo della spirale di Archimede, si è deciso di analizzare anche il comportamento di un'altra antenna UWB: la spirale logaritmica. In questo modo si intende confrontare le diverse prestazioni che queste due antenne possono fornire, al fine di scegliere la configurazione migliore per il tag da realizzare.

## 4.2 Spirale logaritmica

Come la spirale di Archimede, anche la spirale logaritmica è una particolare antenna che sfrutta il principio di auto-similarità per garantire prestazioni quasi costanti su bande molto larghe: le correnti che scorrono sui due bracci della spirale risultano in fase tra loro per circonferenze diverse al variare della frequenza; per questo motivo

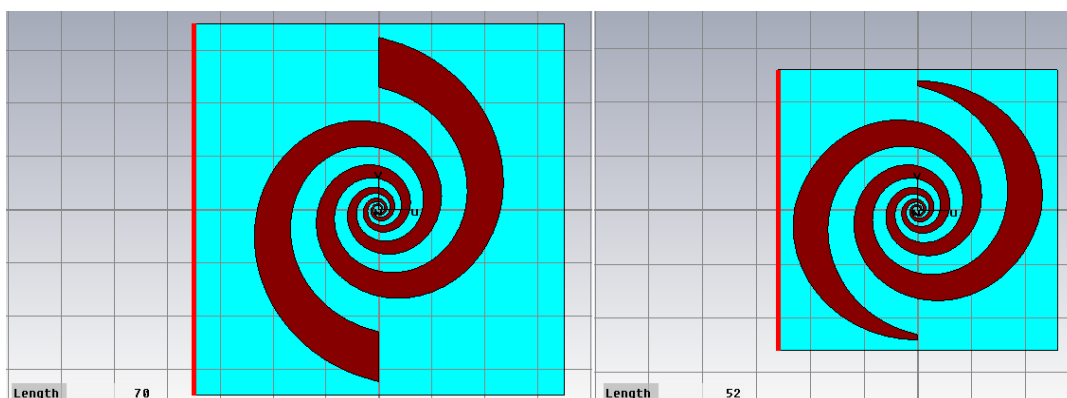


Figura 4.8: Confronto dimensioni tra spirale logaritmica con estremità terminali “tagliate” (a destra) e la stessa struttura con nessun taglio (a sinistra)

molte delle considerazioni esposte in precedenza riguardo alla spirale di Archimede (tra cui quelle relative alle dimensioni minime necessarie per un corretto funzionamento su tutta la banda di interesse) continuano ad essere valide per la spirale logaritmica.

Anche in questo caso si è cercato di realizzare un’antenna che avesse le migliori caratteristiche di radiazione possibili nella banda (3-5 GHz) per la comunicazione UWB e in più presentasse un picco di risonanza a 2.45 GHz, da essere sfruttato per le docce RF in fase di energy harvesting.

Le antenne investigate sono state realizzate creando due spirali logaritmiche ruotate di  $180^\circ$  l’una rispetto all’altra. La parte terminale più esterna delle due spirali è stata troncata in modo opportuno al fine di ottenere una struttura limitata ad una zona “circolare” più simile a quella tipica della spirale di Archimede, con lo scopo principale di ridurre le dimensioni complessive della struttura. Un troncamento di questo tipo fa senza dubbio pensare ad un possibile degrado della condizione di auto-complementarità, sempre ricercata al fine di ottenere un’impedenza il più possibile costante sulla banda di lavoro; un taglio alle estremità dei bracci della spirale porta infatti ad una struttura in cui lo scambio tra dielettrico e conduttore non risulta più possibile in maniera rigorosa, soprattutto per le zone più esterne, che interessano come noto la parte più bassa della banda di lavoro.

Fortunatamente un confronto diretto tra una struttura in cui è stato eseguito questo “taglio” e la corrispondente in cui è stata mantenuta la forma originale ha messo in evidenza che la differenza tra i risultati ottenuti non è tale da impedire l’utilizzo di questo espediente, il quale, come già anticipato, permette una notevole riduzione delle dimensioni complessive, come si può facilmente comprendere dal confronto mostrato in figura 4.8.

Rispetto alla parametrizzazione della spirale di Archimede, per quella logaritmica cambiano alcune grandezze; i principali parametri utilizzati sono:

- *sub\_side*: lato del substrato di carta;
- *num\_turns*: numero di giri della spirale;

- *initial\_radius* (*k*): raggio iniziale della spirale;
- *phi*, *delta*, *alpha*.

Questi ultimi parametri descrivono l'andamento della spirale nel modo seguente:

$$r\_1 = k \cdot e^{(\alpha \cdot \phi)} \quad (4.3)$$

$$r\_2 = k \cdot e^{(\alpha \cdot (\phi - \delta))} \quad (4.4)$$

dove  $r\_1$  e  $r\_2$  sono rispettivamente il raggio interno ed esterno di ciascun braccio della spirale. *Delta* e *phi* sono sempre stati mantenuti costanti, rispettivamente a 90 e 5, principalmente per garantire l'auto-complementarità; si è invece agito su tutti gli altri parametri per variare le dimensioni della spirale.

#### 4.2.1 Spirale realizzata

Una prima spirale di tentativo è stata realizzata utilizzando i seguenti valori:

parametro	valore	descrizione
<i>num_turns</i>	4	numero giri della spirale
<i>initial_radius</i> ( <i>k</i> )	0.75	raggio iniziale della spirale
<i>alpha</i>	0.147	
<i>sub_side</i>	55	lato del substrato
<i>paper_thick</i>	0.23	spessore strato di carta
<i>sub_thick</i>	3* <i>paper_thick</i>	spessore substrato di carta
<i>ink_thick</i>	0.035	spessore inchiostro conduttivo

L'antenna così formata, di dimensioni complessive accettabili, presenta un'area interna "libera" pari a circa 1 mm<sup>2</sup>. L'adattamento risulta ottimo su tutta la banda, |S11| infatti è minore di -10 dB tra 3 e 5 GHz. La resistenza di radiazione e la reattanza assumono valori poco variabili sulla banda di interesse; la seconda si assesta intorno ai 10 Ω, la prima tuttavia ha valori abbastanza costanti, ma centrati intorno agli 80 Ω. Si raggiunge un'ottima efficienza di radiazione, intorno all'82%, ma per quanto riguarda la polarizzazione si ottengono buoni valori di axial ratio solo per le frequenze più elevate, mentre per 3-4 GHz l'axial ratio risulta solo di poco inferiore ai 6 dB (sempre valutato nella direzione di massima irradiazione), valore limite che si è fissato per poter considerare accettabile la polarizzazione circolare.

#### 4.2.2 Aumento raggio interno e modifiche alla spirale

A fronte dei risultati ottenuti nel tentativo iniziale, si è provato ad apportare alcune modifiche all'antenna poc'anzi descritta. Analogamente a quanto fatto per la spirale di Archimede, si è cercato di aumentare l'area interna fino al massimo consentito e di migliorare le prestazioni generali.

E' stato aumentato *initial\_radius* dal valore iniziale di 0.75 mm in modo progressivo a 1.5, 2, 2.5 e 3.5 mm.

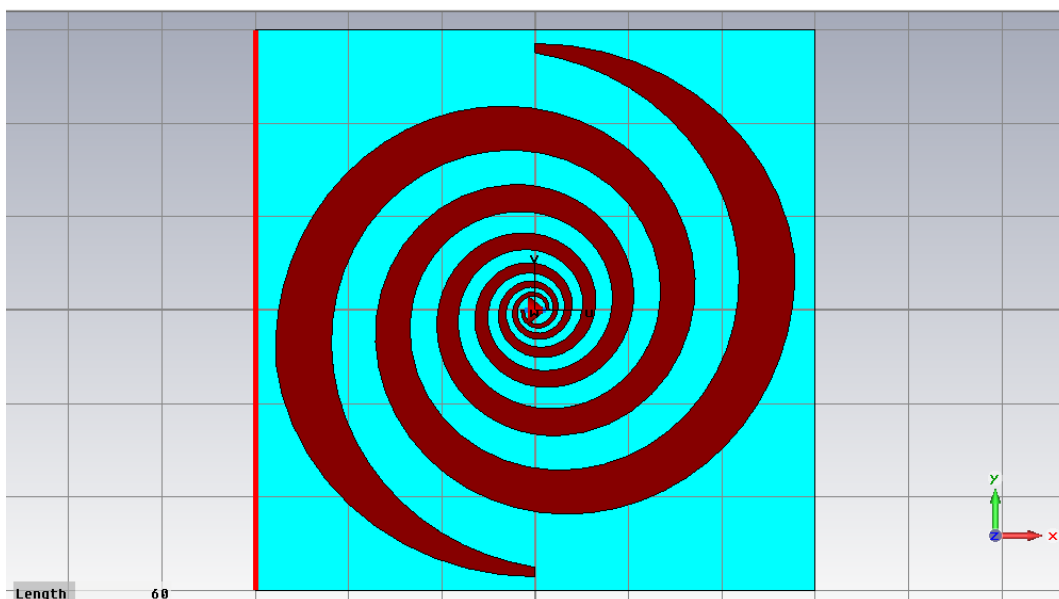


Figura 4.9: Antenna a spirale logaritmica con energy harvesting a 2.45 GHz

I risultati migliori sono stati senza dubbio ottenuti per  $initial\_radius=1.5$  mm, con  $num\_turns=3.25$  e  $alpha=0.1544$ . L'antenna ricavata è mostrata in figura 4.9.

$|S_{11}|$  è minore di -10 dB su tutta la banda (3-5 GHz) e in più presenta un ottimo picco di risonanza a 2.45 GHz. La resistenza di radiazione presenta ottimi valori e sufficientemente costanti:  $Re(Z_{11})$  infatti varia tra circa 100 e 115  $\Omega$  sulla banda di interesse; un po' meno buoni i valori di reattanza, che raggiunge quasi i 65  $\Omega$  all'avvicinarsi a 5 GHz. L'efficienza di radiazione è costantemente pari all'85% su tutta la banda e la polarizzazione risulta circolare (anche se l'axial ratio, a 3 GHz, raggiunge i 5 dB). L'area interna "libera", infine, risulta pari a circa 5.5 mm<sup>2</sup>.

Quando si aumenta  $initial\_radius$  a 2 mm, l'area interna raggiunge dimensioni pari a circa 11 mm<sup>2</sup>, ma nonostante le caratteristiche di radiazione siano ancora abbastanza buone,  $|S_{11}|$  assume valori superiori a -10 dB, a meno che non si faccia ancora una volta uso di linee interne, in modo analogo a quanto descritto per la spirale di Archimede. Se si utilizzano queste ultime (in particolare con  $num\_turns=3.25$  e  $alpha=0.132$ ) le prestazioni ottenibili sono molto simili al caso di raggio iniziale 1.5 mm:  $|S_{11}|$  si abbassa sotto i -10 dB e presenta un picco di risonanza nell'intorno di 2.45 GHz,  $Re(Z_{11})$  varia tra 105 e 125  $\Omega$  e la reattanza raggiunge circa i 70  $\Omega$ . Simili anche i valori di efficienza e di axial ratio, seppur leggermente peggiori.

Per  $initial\_radius=2.5$  mm è fondamentale l'utilizzo di linee interne al fine di contenere  $|S_{11}|$  al di sotto dei -10 dB (valore che, per le frequenze più elevate, in realtà si riesce solo ad eguagliare). Seppur la resistenza di radiazione inizi a variare in modo più sensibile e la reattanza assuma valori ancor più elevati, le altre caratteristiche risultano ancora abbastanza buone.

Infine, aumentando il raggio iniziale fino a 3.5 mm, non risulta più possibile ottenere risultati soddisfacenti, neanche con l'utilizzo di linee interne:  $|S_{11}|$  è costantemente al

di sopra dei -10 dB e l'impedenza assume valori sempre più elevati e variabili.

Al termine delle simulazioni svolte con le due diverse spirali, Archimede e logaritmica, si può affermare che dai risultati ottenuti non sono emerse sostanziali differenze.

Nonostante nessuna delle due sia quindi prevalsa rispetto all'altra, si può affermare che la spirale di Archimede presenta in generale degli andamenti di impedenza più costanti rispetto a quanto non faccia la spirale logaritmica. Questo è del tutto comprensibile in quanto, per quanto detto in precedenza, il "taglio" a cui viene sottoposta la spirale logaritmica va a pregiudicare in parte la condizione di auto-complementarità; taglio che tuttavia si rende necessario per ottenere dimensioni complessive accettabili.

Seppure la piccola differenza appena enunciata non permetta di classificare come "migliore" una delle due spirali rispetto all'altra, questa, unita alla caratteristica di maggiore regolarità della struttura che caratterizza la spirale di Archimede, ha portato a considerare quest'ultima come la candidata da preferire per tutte le investigazioni successive.

### 4.3 Energy harvesting a 2.45 GHz

Una delle caratteristiche essenziali del tag eco-compatibile che si sta cercando di realizzare è la totale assenza di batterie al suo interno. Questo significa che l'energia necessaria alla realizzazione di tutte le sue funzioni deve essere in qualche modo raccolta dall'ambiente circostante tramite energy harvesting. Al fine di raggiungere questa autonomia energetica è necessario progettare un'antenna rettificatrice altamente efficiente, in grado di ricavare abbastanza potenza per alimentare l'intero sistema.

Si potrebbe quindi pensare di sfruttare l'energia a RF disponibile in quegli scenari civilizzati dove sono presenti sistemi wireless (GSM, UMTS, WiFi, ecc.); tuttavia la potenza recuperabile da sistemi di questo tipo risulta fortemente dipendente dagli scenari in cui si va ad operare e molto spesso non è in grado di fornire un contributo di potenza adeguato, soprattutto per ambienti indoor. Per questo motivo, come già anticipato in precedenza, si prevede l'utilizzo di sorgenti RF dedicate (docce RF) in grado di fornire la quantità di energia desiderata per il funzionamento del tag.

I risultati ottenuti dalle simulazioni poc'anzi descritte hanno messo in evidenza come sia possibile realizzare un'antenna UWB che si occupi unitamente della comunicazione e dell'harvesting in un'unica struttura. Sono state trovate ottime configurazioni, di dimensioni sufficientemente ridotte, sia utilizzando la spirale di Archimede che utilizzando la spirale logaritmica.

In questa prima investigazione come frequenza operativa delle docce RF è stata scelta la frequenza 2.45 GHz, al di sotto dell'estremità inferiore della banda UWB; questo chiaramente permette di mantenere libera per la comunicazione l'intera banda (3.1-4.8 GHz). A questo punto, però, appare opportuno verificare quanto un'effettiva implementazione dell'energy harvesting a questa frequenza risulti accettabile; si intende cioè valutare quanta potenza rettificata, cioè in continua, in questo modo possa effettivamente essere resa disponibile al sistema.

Al fine di stimare la potenza disponibile all'uscita della rectenna sono state fatte alcune valutazioni di massima tramite l'utilizzo di un simulatore circuitale. Fissata



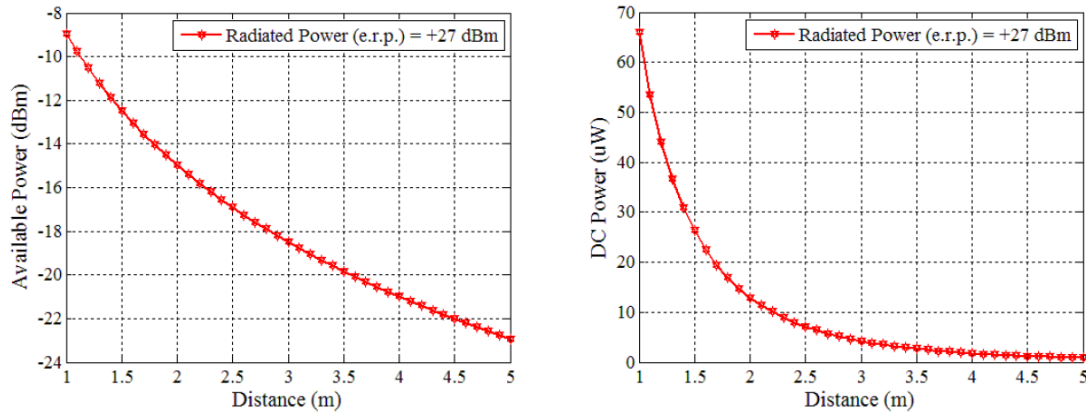


Figura 4.10: Potenza disponibile e potenza rettificata al variare della distanza, con ERP pari a 27 dBm

una determinata potenza in trasmissione per le docce RF e quindi una conseguente potenza ricevuta dal tag (potenza disponibile), si è così valutato quanta di questa potenza RF fosse possibile convertire in continua (DC) a valle del rettificatore.

Come potenza in trasmissione per le docce RF si è utilizzata quella massima consentita dallo standard a questa frequenza, vale a dire 500 mW (27 dBm) [13], è stata quindi calcolata la potenza ricevuta dal tag (Available Power) al variare della distanza e la conseguente potenza rettificata (DC Power); i risultati sono mostrati in figura 4.10.

Come si può notare, purtroppo i valori ottenuti (per di più in spazio libero) sono tutt'altro che soddisfacenti: dopo soli 2 metri di distanza la potenza rettificata risulta inferiore a 10  $\mu$ W, valore decisamente basso ai fini dell'alimentazione del sistema. Appare quindi chiaro che, nonostante sia stato possibile trovare strutture più che soddisfacenti con cui realizzare un tag operante nella banda UWB e in grado di effettuare energy harvesting a 2.45 GHz, questa strada non può essere seguita: la potenza ottenibile non risulta sufficientemente alta per il progetto desiderato, immaginando che le distanze da coprire nel collegamento siano quelle tipiche di ambienti indoor, quindi variabili tra 2 e 5 metri.

Diventa quindi strettamente necessaria una modifica al sistema finora proposto. In particolare si è deciso di abbandonare i 2.45 GHz come frequenza operativa a cui realizzare energy harvesting; al suo posto si è scelto di utilizzare la frequenza RFID 868 MHz. Operando a questa frequenza ci si attendono risultati migliori principalmente per due motivi: innanzitutto l'utilizzo di una frequenza più bassa comporta attenuazioni minori durante la propagazione; in secondo luogo, a 868 MHz la potenza massima utilizzabile risulta maggiore di quella consentita a 2.45 GHz, in particolare lo standard consente un'ERP massimo di 2 W, a fronte dei soli 500 mW permessi a 2.45 GHz [14].

## Capitolo 5

# Energy Harvesting a 868 MHz

Appurata l'impossibilità di sfruttare l'energy harvesting a 2.45 GHz, si è deciso di operare nella banda RFID (865-868 MHz) per la trasmissione di potenza dalle docce RF (RF showers) al tag; in particolare si vuole cercare di realizzare un trasferimento di potenza alla frequenza 868 MHz.

A questo punto si rende quindi necessaria la ricerca di una nuova antenna che operi correttamente secondo le nuove condizioni: la comunicazioni UWB tra tag e reader è sempre sulla banda (3.1-4.8 GHz), ma l'energy harvesting deve essere effettuato a 868 MHz.

Ancora una volta appare più interessante la ricerca di un'unica struttura compatta, che possa svolgere entrambi i compiti senza dover ricorrere a due antenne separate, soluzione peraltro già proposta in letteratura da più gruppi di ricerca: ad esempio un monopolo UWB affiancato da un dipolo ripiegato operante a UHF (868 MHz).

La base di partenza deve essere sicuramente un'antenna a banda larga che possa operare nella banda UWB: come conseguenza delle considerazioni fatte in precedenza, si sceglie di utilizzare esclusivamente la spirale di Archimede per tutte le successive investigazioni; a partire da questa bisognerà poi apportare le modifiche necessarie al fine di renderla adatta ad una ricezione di potenza a 868 MHz.

Come sempre, al variare delle grandezze e dei parametri dell'antenna analizzata, si valuteranno le prestazioni ottenute per verificare il soddisfacimento delle caratteristiche di radiazione desiderate; in particolare:  $|S_{11}|$  per avere una misura dell'adattamento alle frequenze di lavoro, l'impedenza  $Z_{11}$ , l'efficienza di radiazione raggiungibile e l'axial ratio, per capire che tipo di polarizzazione si ottiene. In questo caso per il modulo di  $S_{11}$  si cercherà di raggiungere un picco di risonanza non più a 2.45 GHz, bensì a 868 MHz, in modo da permettere un efficiente energy harvesting a questa frequenza.

## 5.1 Spirale di Archimede con docce RF a 868 MHz

Come primo tentativo si è deciso di provare a realizzare una struttura identica a quella ricavata per le docce RF a 2.45 GHz, ovvero una spirale di Archimede per la comunicazione sulla banda UWB e un'opportuno prolungamento dei bracci di questa per "raggiungere" gli 868 MHz.

In un primo approccio, anziché considerare l'esatta frequenza degli 868 MHz, si è analizzato il comportamento della struttura a 900 MHz, frequenza abbastanza prossima a quella esatta di lavoro; questo per avere un'idea di massima delle prestazioni raggiungibili. Ancora una volta, anche per la banda UWB, si è considerato il comportamento dell'antenna su tutta la banda da 3 a 5 GHz, anziché (3.1-4.8 GHz), in modo da inserire un certo margine.

Per quanto riguarda le dimensioni complessive della struttura, valgono i ragionamenti già svolti in precedenza: la spirale di Archimede ha un comportamento auto-similare al variare della frequenza; la zona attiva dell'antenna è rappresentata da una zona circolare di circonferenza pari alla lunghezza d'onda di lavoro  $\lambda$ ; per questo sarà necessario rispettare alcuni vincoli sulle dimensioni dell'antenna. La zona più interna della spirale dovrà essere tale per cui si possa creare la condizione di correnti in fase sui due bracci ad una circonferenza di raggio  $R_5=9.5$  mm; oltre a questo la spirale dovrà sicuramente essere tale per cui sia presente una zona circolare esterna di raggio  $R_3=15.9$  mm per il limite inferiore della banda UWB.

A questo punto, però, appare immediatamente chiaro che un'estensione della struttura per un funzionamento auto-similare fino a 900 MHz introdurrà un vincolo molto critico sulle dimensioni da garantire; infatti, dovendo risultare come sempre  $\lambda = 2\pi R$ , per la frequenza di lavoro minore dovrà essere presente una zona circolare di raggio  $R_{900} \simeq 53$  mm.

Tenendo presente che queste limitazioni dovranno essere in qualche modo affrontate, non essendo chiaramente "compatibili" con le dimensioni accettabili per il tag ricercato, si prosegue con l'investigazione della spirale appena descritta.

### 5.1.1 Spirale realizzata

Sono state effettuate varie simulazioni al variare della larghezza delle linee e del numero di giri della spirale (*spiral\_width* e *num\_turns*) e quindi, conseguentemente, delle dimensioni del substrato di carta su cui viene realizzata l'antenna (*sub\_side*). In seguito a quanto ottenuto dai calcoli teorici, si è cercato di realizzare una spirale abbastanza grande da contenere una circonferenza esterna avente raggio  $R_{900} = 53$  mm.

In una prima analisi si è voluto innanzitutto verificare come si comporta la spirale al variare della larghezza delle linee; per questo motivo sono state inizialmente simulate spirali avente *spiral\_width* crescente da 1 a 4 mm. Per ogni configurazione si sono così confrontati i risultati ottenuti, riassunti nella tabella di figura 5.1, in cui vengono messi in evidenza il raggio massimo corrispondente alla zona circolare esterna della spirale, la frequenza di risonanza in cui si ha un picco negativo di  $|S_{11}|$ , la variazione della resistenza di radiazione e i valori della reattanza nella banda (3-5 GHz) e l'efficienza di radiazione a 900 MHz.

spiral_width	outer_radius	picco  S11	$\Delta\text{Re}(Z_{11})$	$\text{Im}(Z_{11})$	Efficienza a 900 MHz
1 mm	53.5 mm	928 MHz	7.6 $\Omega$ (106-133)	28-47 $\Omega$	60 %
2 mm	54 mm	1036 MHz	18.4 $\Omega$ (136-155)	39-60 $\Omega$	82 %
3 mm	56.5 mm	937 MHz	26.9 $\Omega$ (153-180)	46-70 $\Omega$	87 %
4 mm	59 mm	967 MHz	35.5 $\Omega$ (168-204)	56-75 $\Omega$	92 %

Figura 5.1: Risultati della spirale di Archimede con docce RF a 900 MHz al variare della larghezza delle linee da 1 a 4 mm

In tutti e quattro i casi nella banda UWB si ha adattamento, con  $|S_{11}|$  che risulta minore di -10 dB e polarizzazione circolare.

Come si può notare immediatamente, all'aumentare della larghezza *spiral\_width* il valore di  $\text{Re}(Z_{11})$  varia in modo sempre più sensibile nella banda (3-5 GHz) e la reattanza assume valori sempre più elevati. Questo va sicuramente contro i nostri obiettivi; in particolare si vorrebbe ottenere una resistenza di radiazione il più possibile costante in tutta la banda UWB, con una variazione massima tollerata di non più di 20  $\Omega$ ; per questo, nonostante l'aumento dello spessore porti ad efficienze di radiazione sempre più alte, si sceglie come miglior compromesso un valore di *spiral\_width* pari a 2 mm. A questo punto però si nota che la spirale realizzata con questo spessore delle linee presenta un picco di risonanza di  $|S_{11}|$  abbastanza lontano da 900 MHz; si è allora aumentato il numero di giri della spirale in modo da “spostare verso il basso” la risonanza, in particolare si è passati da 6.5 a 7.5 giri, con un aumento del raggio massimo da 54 mm a 62 mm; in questo modo però anche le dimensioni del substrato (*sub\_side*), già alte (116.4 mm), sono aumentate fino a 132.4 mm. La spirale così realizzata è rappresentata in figura 5.2.

Le proprietà di radiazione di questa antenna sono senza dubbio ottime:  $|S_{11}|$  risulta inferiore a -10 dB su tutta la banda UWB e presenta un picco negativo a 900 MHz; la resistenza di radiazione assume valori abbastanza costanti nella banda (3-5 GHz), i diagrammi di radiazione sono più che soddisfacenti in tutta questa banda e soprattutto l'efficienza di radiazione assume valori notevoli, di poco superiori al 90%; anche la polarizzazione è decisamente di tipo circolare, l'axial ratio assume infatti valori non superiori agli 0.2 dB su tutta la banda. Per quanto riguarda la radiazione a 900 MHz, anche in questo caso l'efficienza è decisamente elevata, oltre l'86%; per di più, al contrario di quanto avveniva in tutte le altre spirali sopra descritte, in questo caso si arriva ad avere polarizzazione circolare anche a 900 MHz (anche se axial ratio è solo di poco inferiore ai 6 dB).

Purtroppo, nonostante questa antenna soddisfi in pieno la maggior parte delle specifiche richieste, non soddisfa assolutamente uno dei più importanti vincoli: le dimensioni complessive della struttura devono risultare il più contenute possibile, entro i 5-6 cm massimo. Un substrato di 13 cm<sup>2</sup> va ben oltre il limite massimo imposto, pertanto non può essere assolutamente adottato come soluzione per il tag da realizzare.

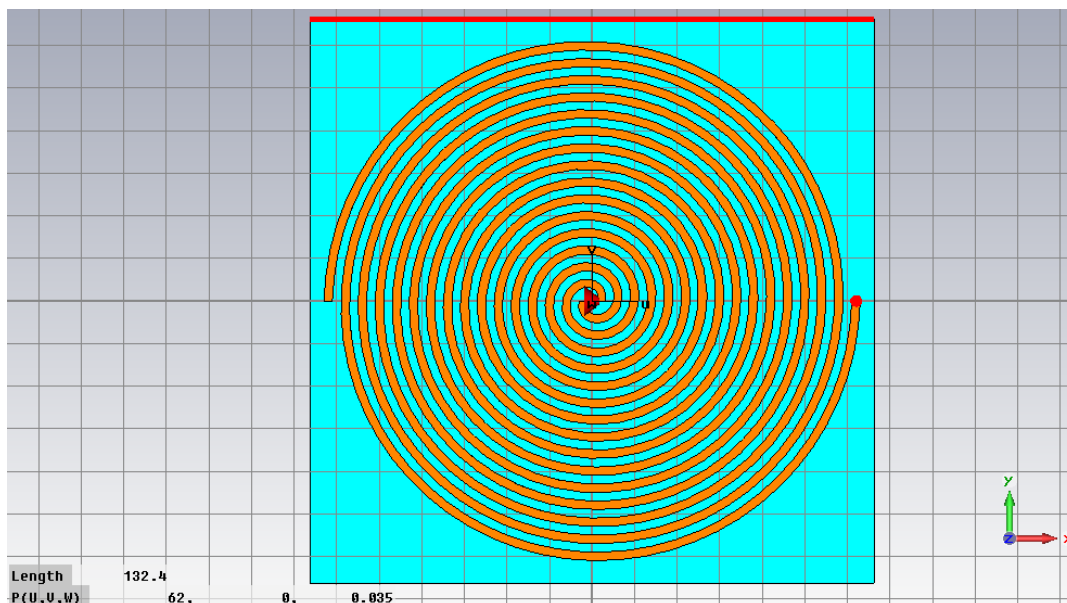


Figura 5.2: Spirale di Archimede funzionante nella banda (0.9-5 GHz)

### 5.1.2 Tecnica di gap-loading

La spirale di Archimede sopra descritta possiede ottime caratteristiche di radiazione, ma ha dimensioni decisamente superiori a quelle attese e questo ne pregiudica l'impiego come possibile candidata ad antenna per il tag; prima di abbandonare definitivamente questa struttura, tuttavia, si vuole valutare se esista qualche stratagemma per cercare di ridurre il più possibile le dimensioni dell'antenna.

La tecnica proposta è la cosiddetta tecnica di gap-loading [15],[16], la quale permette di ridurre le dimensioni elettriche dell'antenna tramite l'introduzione di un gap capacitivo; si stima che l'utilizzo di questa tecnica possa infatti portare ad una riduzione delle dimensioni di circa il 27% [17].

Si è quindi proceduto nel seguente modo: a partire dalla spirale sopra descritta e rappresentata il figura 5.2, avente raggio esterno pari a 62 mm, si è costruita una seconda spirale avente raggio esterno di 46 mm, ovvero ridotto di circa il 27%; dopodiché è stato introdotto un anello che circonda tutta la circonferenza della spirale, senza però mai entrare in contatto con essa; in particolare l'anello ha spessore 1 mm ed è distante 1 mm dall'estremità terminale della spirale. La struttura realizzata è rappresentata il figura 5.3.

La spirale realizzata tramite la tecnica del gap-loading appena descritta presenta picco di risonanza a 900 MHz e in più  $|S_{11}|$  risulta inferiore a -10 dB in tutta la banda (3-5 GHz). La resistenza di radiazione è abbastanza costante in tutta la banda UWB, presentando una variazione massima di ancora 18  $\Omega$  circa; l'efficienza di radiazione a 900 MHz raggiunge l'80% e nella banda UWB si attesta ancora una volta tra il 90 e il 92%. La polarizzazione è sempre perfettamente circolare tra i 3 i 5 GHz e per di più risulta ancor più circolare a 900 MHz di quanto non fosse per la spirale originaria

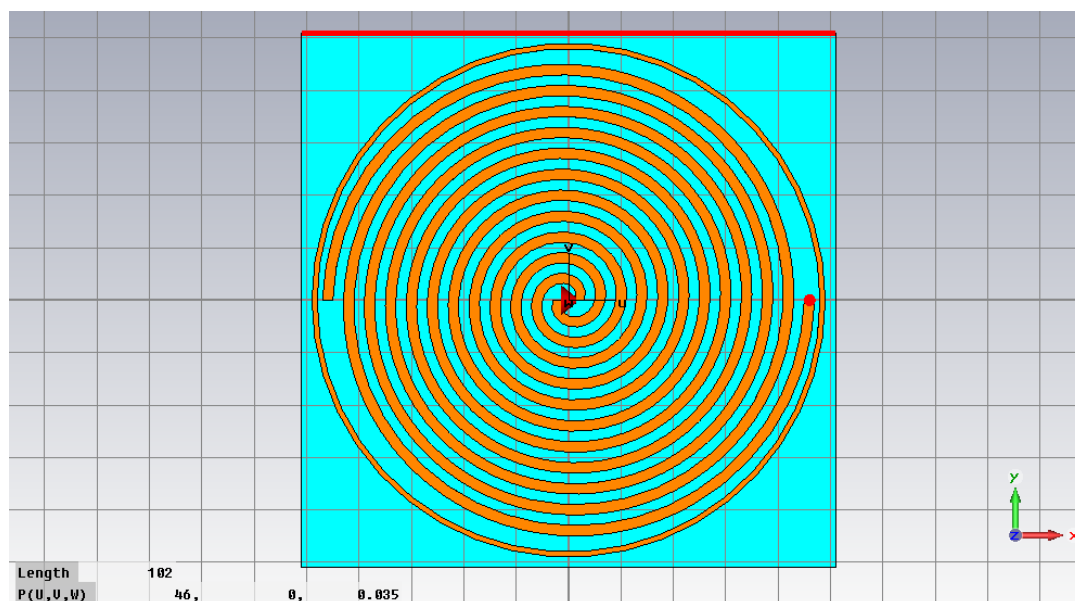


Figura 5.3: Tecnica del gap-loading applicata alla spirale di Archimede funzionante nella banda (0.9-5 GHz)

(axial ratio intorno ai 2.5 dB).

La tecnica di gap-loading quindi permette una notevole riduzione delle dimensioni complessive della struttura, garantendo prestazioni in termini di radiazione pressoché invariate; tuttavia, sebbene la riduzione delle dimensioni del substrato sia risultata di circa il 23% (*sub\_side* passa da 132 mm a 102 mm), le dimensioni della spirale così realizzata risultano ancora eccessive.

A questo punto risulta quindi inevitabile la ricerca di un'altra tecnica che possa soddisfare le specifiche richieste, in grado di fornire un'antenna per la comunicazione nella banda UWB e per l'energy harvesting a 900 MHz, attraverso una struttura di dimensioni sufficientemente ridotte.

## 5.2 Spirale di Archimede e dipoli per energy harvesting

Come è stato poc'anzi ribadito, si sta cercando di trovare una struttura tale da poter realizzare un tag di dimensioni ridotte che sia in grado di operare correttamente nella banda UWB (3.1-4.8 GHz) e al tempo stesso effettuare energy harvesting a 868 MHz.

Le strutture analizzate finora hanno permesso la realizzazione di antenne di ottime caratteristiche, ma queste sono state in grado di effettuare energy harvesting solo a 2.45 GHz; cercando di estendere queste strutture per un impiego a 868 MHz si sono ottenute antenne di dimensioni eccessivamente elevate, inutilizzabili per gli obiettivi preposti.

Dai limiti evidenti con cui ci si è scontrati e dalle stringenti necessità precedentemente descritte, è nata la nuova idea di affiancare all'antenna a banda larga impie-

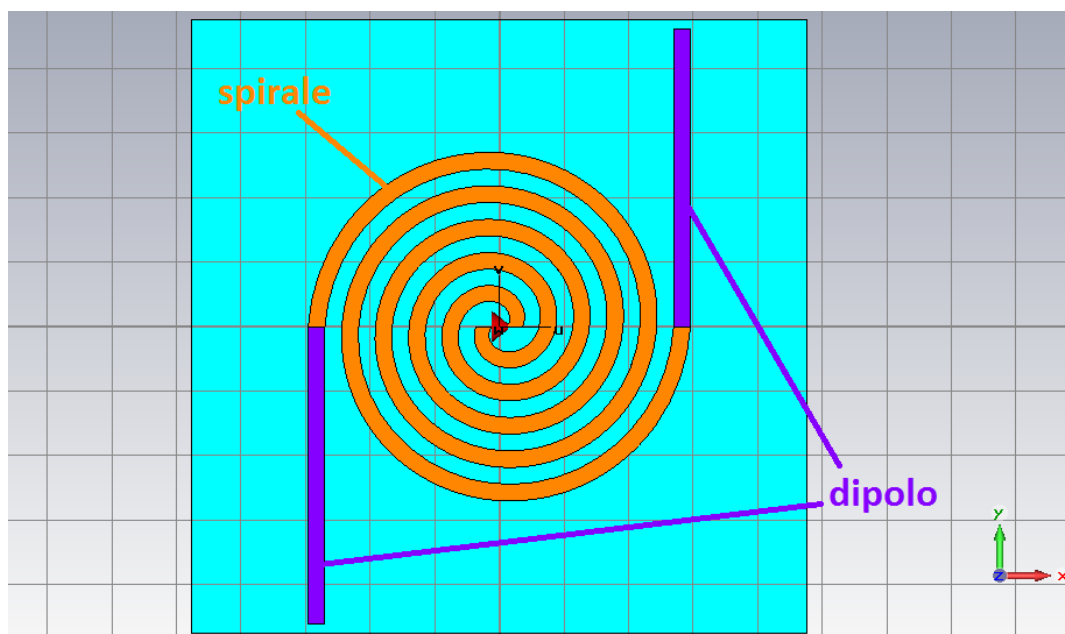


Figura 5.4: Spirale di Archimede con annesso dipolo per energy harvesting a 868 MHz

gata finora, l'utilizzo di dipoli, a banda stretta, per soddisfare le necessità di energy harvesting a 868 MHz.

L'utilizzo congiunto di un'antenna a banda larga per la comunicazione in banda UWB e di una seconda antenna con funzioni di energy harvesting non è sicuramente una novità; l'aspetto innovativo che si intende realizzare è la costruzione di una sola antenna che sia in grado di occuparsi di entrambe le funzioni in un'unica soluzione. A tale scopo si investigherà quindi la realizzazione di un'unica struttura costituita da una spirale di Archimede, che si occuperà della comunicazione in banda UWB, con annesso un dipolo, il quale avrà funzione di antenna per l'energy harvesting a 868 MHz.

Un'idea di massima della struttura che si intende realizzare è rappresentata il figura 5.4, in cui sono evidenziati i due bracci che costituiscono il dipolo, collegati alle estremità dei relativi bracci della spirale. Molto probabilmente, per limitare le dimensioni complessive, si dovrà fare uso di dipolo ripiegato.

Risulta a questo punto opportuno fare una precisazione riguardo alla polarizzazione del dipolo. Fino a quando si è considerato come ruolo di "harvester" una porzione dell'antenna a spirale stessa, chiaramente si richiedeva a quest'ultima una polarizzazione il più possibile circolare; ciò aveva sicuramente l'indubbio vantaggio di permettere all'antenna di catturare qualsiasi tipo di campo ricevente.

Appare a questo punto ovvio, però, che il dipolo non può avere una tale caratteristica di polarizzazione, esso infatti presenterà necessariamente una polarizzazione di tipo rettilineo; questo tuttavia è un limite a cui si può sopperire. E' stato già anticipato, infatti, che non ci si concentrerà sull'energy harvesting delle sorgenti RF tipicamente disponibili nell'ambiente, in quanto il recupero di potenza non risulterebbe sufficiente

per gli scopi prefissati; si farà bensì uso di docce RF (RF showers) opportunamente progettate e quindi chiaramente di posizione nota: questo potrebbe portare alla capacità di determinare la polarizzazione del campo incidente proveniente dalle docce, oppure, più in generale, si potrebbero utilizzare docce tali da irradiare nello spazio circostante un campo a polarizzazione circolare, rendendo così non più necessaria una polarizzazione circolare da parte dell'harvester posizionato sul tag.

Uno degli obiettivi dell'investigazione sarà quindi quello di realizzare un dipolo tale da presentare una polarizzazione rettilinea (in particolare di tipo verticale per un dipolo come quello rappresentato in figura 5.4), nonché un diagramma di radiazione il più possibile omnidirezionale sul piano orizzontale dell'antenna. Oltre a questo, poi, si cercherà chiaramente di ottenere l'efficienza di radiazione più alta possibile, unitamente a tutte le caratteristiche di radiazione già più volte menzionate per quanto riguarda la sezione dell'antenna relativa alla banda UWB (3.1-4.8 GHz).

Fatta questa precisazione, come prima cosa è stato condotto un elevato numero di investigazioni per mettere in luce il comportamento di questo particolare dipolo.

### 5.2.1 Analisi del dipolo annesso alla spirale di Archimede

Non avendo nessun riferimento affidabile da cui partire per l'analisi di questo particolare dipolo annesso alla spirale di Archimede, dato che si tratta di un'idea originale, si è proceduto per tentativi al variare progressivo della struttura.

Si è da subito considerato un dipolo ripiegato, in cui è stata progressivamente modificata la lunghezza di entrambe le componenti del braccio del dipolo: la componente verticale e quella orizzontale (ripiegata). Ovviamente la variazione della lunghezza della componente verticale comporta una diretta variazione della distanza tra il braccio (ripiegato) del dipolo e la spirale di Archimede; un'opportuna distanza dovrà essere mantenuta tra questi due, se troppo vicini infatti potrebbero influenzarsi a vicenda.

Si è quindi realizzata una spirale di Archimede con i seguenti parametri:

parametro	valore	descrizione
<i>num_turns</i>	5.5	numero giri della spirale
<i>spiral_in_radius</i>	1	raggio interno della spirale
<i>spiral_width</i>	1	larghezza linee della spirale
<i>spiral_gap</i>	<i>spiral_width</i>	spazio tra le linee della spirale
<i>sub_side</i>	variabile da 53 a 103	lato del substrato
<i>sub_thick</i>	$3 * \textit{paper\_thick}$	spessore substrato di carta
<i>ink_thick</i>	0.035	spessore inchiostro conduttivo

dove, come sempre, tutte le lunghezze sono espresse in mm.

Una volta realizzata la spirale, a partire dalle sue estremità terminali sono stati creati due opportuni prolungamenti che vanno così a costituire i due bracci del dipolo. Per contenere il più possibile le dimensioni, ciascun braccio del dipolo è stato poi piegato di 90° lungo il bordo del substrato.

A questo punto, riferendosi con *length1* alla componente verticale del dipolo e con *length2* a quella orizzontale (vedi figura 5.5), si è proceduto con la progressiva variazione di queste lunghezze al fine di mettere in luce il comportamento congiunto



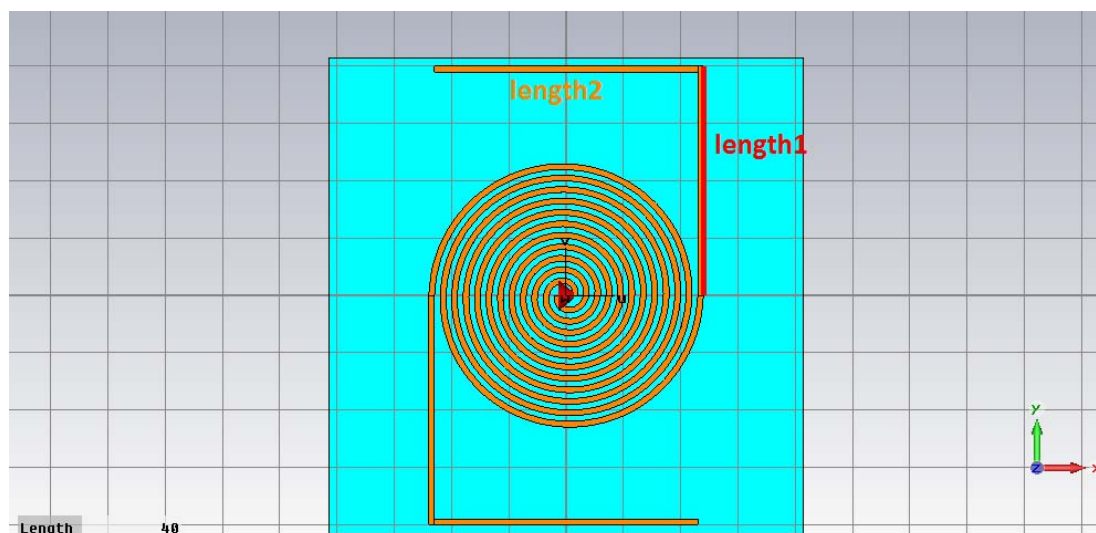


Figura 5.5: Lunghezza della componente verticale del braccio del dipolo ( $length1$ )

della spirale e del dipolo; in particolare è stata fatta variare innanzitutto la lunghezza della componente  $length1$  da 25 a 50 mm (e conseguentemente la distanza tra la spirale e il dipolo). Sono quindi state analizzate le seguenti configurazioni (tutte le lunghezze sono in mm):

1.  $length1=25$   $length2=46$  (totale=71) (distanza spirale-dipolo=1 mm)
2.  $length1=30$   $length2=46$  (totale=76) (distanza spirale-dipolo=6 mm)
3.  $length1=35$   $length2=46$  (totale=81) (distanza spirale-dipolo=11 mm)
- (a)  $length1=35$   $length2=51$  (totale=86) (distanza spirale-dipolo=11 mm)
4.  $length1=40$   $length2=46$  (totale=86) (distanza spirale-dipolo=16 mm)
5.  $length1=45$   $length2=46$  (totale=91) (distanza spirale-dipolo=21 mm)
6.  $length1=50$   $length2=46$  (totale=96) (distanza spirale-dipolo=26 mm)

per ciascuna di queste è stato poi messo in evidenza la frequenza (in GHz) a cui si hanno i picchi di risonanza (minimo assoluto e minimi relativi di  $|S_{11}|$ ) e il relativo valore (in dB), l'efficienza di radiazione a 900 MHz, il valore di axial ratio a 900 MHz (valore minimo) e i valori di axial ratio a 3,4 e 5 GHz (sempre in dB). I risultati ottenuti sono riassunti nella tabella di figura 5.6.

I risultati ottenuti hanno mostrato che tutte le configurazioni forniscono una polarizzazione sufficientemente circolare nella banda UWB, mentre a 900 MHz essa risulta rettilinea;  $|S_{11}|$  inoltre risulta sempre inferiore ai -10 dB nella banda (3-5 GHz). Anche se non riportati, i valori di efficienza di radiazione nella banda UWB sono risultati abbastanza costanti al variare della frequenza, spaziando generalmente tra il 75% (a

	1	2	3	3a	4	5	6
S11  (dB)	<b>2.38 (-21)</b>	<b>2.33 (-22)</b>	<b>2.28 (-21)</b>	<b>2.35 (-22)</b>	<b>2.18 (-20)</b>	<b>2.12 (-19)</b>	<b>2.06 (-19)</b>
	1.87 (-17)	1.86 (-14)	1.83 (-14)	1.83 (-16)	1.82 (-14)	1.80 (-14)	1.78 (-14)
	3.17 (-17)	3.05 (-18)	3.01 (-18)	2.99 (-18)	2.76 (-18)	2.72 (-19)	2.69 (-19)
<b>Efficienza a 900 MHz</b>	19%	41%	51%	48%	54%	53.9%	52%
<b>Axial Ratio a 900 MHz (dB)</b>	40	39	35	34	32	30	28.5
<b>Axial Ratio a 3 GHz (dB)</b>	1.3	2	2.61	3.3	2.65	2.11	1.12
<b>Axial Ratio a 4 GHz (dB)</b>	0.72	1.5	1.8	1.3	2	1.9	1.61
<b>Axial Ratio a 5 GHz (dB)</b>	1.56	1.03	0.77	0.88	0.62	0.55	0.43

Figura 5.6: Risultati della spirale di Archimede con annesso dipolo per energy harvesting al variare della lunghezza  $length1$

3 GHz), fino all'85% circa (a 5 GHz). Per questo motivo e per il fatto che l'obiettivo principale è la ricerca di un dipolo tale da realizzare un efficiente energy harvesting a 900 MHz, è stata presa come figura di merito l'efficienza di radiazione a 900 MHz.

Si può notare che nel caso (1) essa risulta nettamente più bassa (circa 19%) rispetto agli altri valori, risultato che si poteva ragionevolmente attendere in quanto il braccio del dipolo dista soltanto 1 mm dalla spirale, il che porta inevitabilmente ad un'influenza reciproca delle correnti che scorrono nei due tratti di linea. All'aumentare della lunghezza  $length1$  e quindi della distanza tra il braccio del dipolo e la spirale, l'efficienza aumenta sempre di più, fino ad arrivare ad una situazione (5-6) in cui essa torna a calare.

Si sceglie quindi di adottare la situazione (3), corrispondente a  $length1=35$  mm, compromesso ottimale per cui si ottiene una delle massime efficienze (51%) e una distanza tra dipolo e spirale non esagerata (11 mm), con conseguente contenimento delle dimensioni complessive.

A questo punto, fissata  $length1$ , si vuole vedere come cambia l'andamento dell'antenna al variare della lunghezza  $length2$ .

Si prosegue quindi con ragionamento analogo a quello appena condotto; si fissa  $length1=35$  mm e quindi la distanza tra il braccio ripiegato del dipolo e la spirale pari a 11 mm e si varia  $length2$  analizzando così le seguenti configurazioni:

1.  $length1=35$   $length2=51$  (totale=86)
2.  $length1=35$   $length2=45$  (totale=80)
3.  $length1=35$   $length2=34.5$  (totale=69.5)
4.  $length1=35$   $length2=23$  (totale=58)
5.  $length1=35$   $length2=11.5$  (totale=46.5)

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b> S11  (dB)</b>	2.35 (-22)	2.26 (-21)	2.25 (-36)	2.31 (-20)	2.36 (-39)
<b>Efficienza a 900 MHz</b>	48%	50%	56%	52%	33%
<b>Axial Ratio a 900 MHz (dB)</b>	34	35	34	33	31
<b>Axial Ratio a 3 GHz (dB)</b>	3.33	2.43	1.67	2.69	4.2
<b>Axial Ratio a 4 GHz (dB)</b>	1.3	1.71	2.36	1.62	0.82
<b>Axial Ratio a 5 GHz (dB)</b>	0.88	0.8	0.63	0.64	0.61

Figura 5.7: Risultati della spirale di Archimede con annesso dipolo per energy harvesting al variare della lunghezza  $length2$

si mette ancora una volta in evidenza la frequenza (in GHz) a cui si ha picco di risonanza e il relativo valore (in dB) di  $|S11|$ , l'efficienza di radiazione a 900 MHz, il valore di axial ratio a 900 MHz (come sempre il valore minimo, ottenuto per  $\theta = 0$ ) e i valori di axial ratio a 3,4 e 5 GHz (tutti sempre in dB). I risultati ottenuti sono riassunti nella tabella di figura 5.7.

Ancora una volta i valori di efficienza di radiazione nella banda UWB vanno da circa 75% a 3 GHz fino a 85% per 5 GHz e appaiono grossomodo costanti al variare delle configurazioni analizzate; lo stesso si può dire per i valori di axial ratio, sia a 900 MHz, sia nella banda UWB, dove  $|S11|$  è ancora inferiore ai -10 dB. La configurazione migliore quindi sembra essere quella relativa al punto (3), per cui si ottiene un'efficienza di radiazione di circa il 56%.

Trovata questa struttura apparentemente “migliore” delle altre, la si è scelta come configurazione di base su cui provare ad apportare alcune modifiche. In particolare si è provato ad aumentare lo spessore delle linee dell'antenna e a modificare il numero di giri della spirale; tutto questo mantenendo il rapporto appena trovato tra le due componenti di lunghezza  $length1$  e  $length2$  del braccio del dipolo ripiegato.

Sono quindi infine state analizzate le seguente configurazioni:

1.  $spiral\_width=1$   $num\_turns=12$   $sub\_side=152$
2.  $spiral\_width=2$   $num\_turns=5.5$   $sub\_side=140$
3.  $spiral\_width=2$   $num\_turns=7.5$   $sub\_side=188$
4.  $spiral\_width=3$   $num\_turns=4$   $sub\_side=152$
5.  $spiral\_width=3$   $num\_turns=5$   $sub\_side=188$

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b> S11  (dB)</b>	1.03 (-28)	1.31 (-34)	0.87 (-38)	1.26 (-27)	0.94 (-32)
<b>Efficienza a 900 MHz</b>	67%	79%	84%	90%	90%
<b>Axial Ratio a 900 MHz (dB)</b>	13.8	15.7	5.2	13.3	7.6
<b><math>\Delta\text{Re}(Z_{11})</math></b>	15 $\Omega$	18 $\Omega$	120 $\Omega$	32 $\Omega$	33 $\Omega$
<b><math>\text{Im}(Z_{11})</math></b>	(30-55) $\Omega$	(39-61) $\Omega$	(0-125) $\Omega$	(46-73) $\Omega$	(43-73) $\Omega$

Figura 5.8: Risultati della spirale di Archimede con annesso dipolo per energy harvesting all'aumentare delle dimensioni

tutte le lunghezze sono sempre espresse in mm. I risultati ottenuti sono riassunti nella tabella di figura 5.8. Questa volta sono stati messi in evidenza il picco di risonanza di  $|S_{11}|$ , con relativo valore in dB, l'efficienza di radiazione e l'axial ratio a 900 MHz (in dB), la variazione della resistenza di radiazione  $\text{Re}(Z_{11})$  e i valori assunti dalla reattanza  $\text{Im}(Z_{11})$  nella banda UWB.

I risultati ottenuti mostrano che in generale un aumento della larghezza delle linee *spiral\_width* porta ad un aumento dell'efficienza, il ché conferma quanto già precedentemente ricavato nel corso delle simulazioni passate. Tuttavia questi ultimi risultati si possono considerare al più come linee guida per una variazione dell'efficienza e dell'impedenza dell'antenna, in quanto le dimensioni complessive con cui si dovrebbe lavorare sono estremamente elevate e molto lontane dai requisiti richiesti al tag oggetto di studio.

Oltre alle simulazioni elencate qui sopra sono state eseguite anche alcune altre investigazioni di tentativo, con strutture simili a questa ma con alcune caratteristiche diverse, come la costituzione di un dipolo ripiegato un numero maggiore di volte, al fine di aumentarne la lunghezza e modificarne la forma, oppure di un dipolo con larghezza delle linee aumentata rispetto a quella delle linee della spirale, ecc. Nessuna di queste investigazioni tuttavia ha portato a buoni risultati.

Quanto ottenuto finora non ha quindi portato ai risultati voluti, ma è stato di grande utilità per mettere in luce il funzionamento complessivo dell'antenna studiata.

E' emerso infatti che nel comportamento del dipolo non ha grande importanza il fatto che esso venga ripiegato o meno; inoltre il risultato più importante è probabilmente quello relativo al fatto che la lunghezza del tratto terminale della struttura (ovvero, in riferimento a quanto definito in precedenza,  $length1+length2$ ) non influisce sensibilmente sull'andamento del diagramma di radiazione a 900 MHz, o della risonanza a

tale frequenza, quest'ultima è infatti direttamente legata alla lunghezza complessiva di ciascun braccio dell'antenna, vale a dire l'unione del braccio della spirale e del braccio del dipolo.

Alla luce di quanto scoperto, è quindi possibile condurre un'analisi dettagliata dell'antenna proposta, al fine di ricavare una struttura finale in grado di soddisfare tutti i requisiti desiderati.

### 5.2.2 Ricerca della struttura migliore

Gli obiettivi dell'ultima investigazione che si vuole condurre sono in generale già stati definiti in precedenza, ma si riassumono ancora una volta.

Uno dei requisiti fondamentali riguarda la dimensione della struttura, il lato del substrato di carta non deve superare i 4-5 cm massimo; oltre a questo si possono elencare le seguenti specifiche ricercate rispettivamente per la porzione di antenna relativa alla spirale di Archimede (funzionamento nella banda UWB) e per quella relativa al dipolo (funzionamento a 900 MHz):

- Spirale di Archimede
  - adattamento da 3 a 5 GHz, ovvero  $|S_{11}| < -10$  dB (si ricorda che nelle simulazioni si è sempre utilizzata un'impedenza di normalizzazione pari a  $120 \Omega$ , ovvero a quella attesa teoricamente dall'antenna a spirale);
  - efficienza di radiazione più alta possibile, un obiettivo ragionevole sembra essere il 90% circa;
  - polarizzazione circolare, per questo si richiede un axial ratio il più basso possibile;
  - impedenza: si cerca di avere una resistenza di radiazione il più costante possibile sull'intera banda, per questo si richiede una variazione di  $\text{Re}(Z_{11})$  entro i 20-30  $\Omega$  massimo; lo stesso si vorrebbe per  $\text{Im}(Z_{11})$ , che dovrebbe assumere valori più bassi possibile.
  
- Dipolo
  - risonanza a 868 MHz, frequenza a cui si vuole implementare energy harvesting;
  - efficienza di radiazione più alta possibile, un obiettivo ragionevole sembra essere il 70% circa;
  - polarizzazione rettilinea, si richiede axial ratio più alto possibile (in CST MWS si pone come valore massimo 40 dB).

Ritornando all'andamento del dipolo, si è quindi capito come il suo funzionamento e in particolare la sua risonanza, sia legata alla lunghezza complessiva della linea di conduttore su cui scorre corrente. Il parametro di riflessione  $S_{11}$  è normalizzato (per scelta) a  $120 \Omega$ , valore tipico dell'impedenza d'antenna della spirale di Archimede, ma lontano dai tipici valori dei dipoli. Per questo motivo, per capire l'esatta risonanza

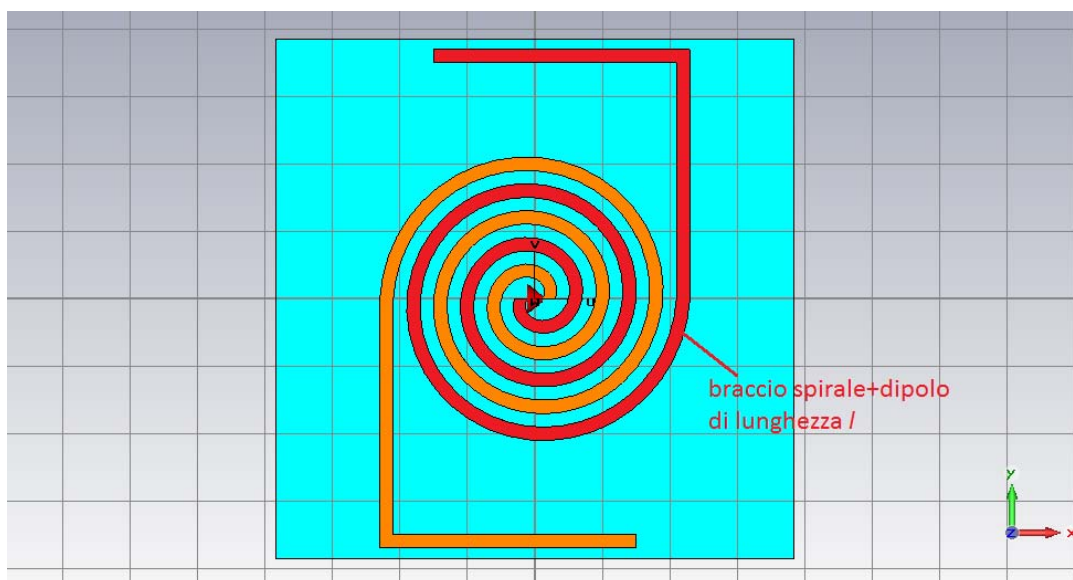


Figura 5.9: Lunghezza complessiva del braccio che determina la risonanza del dipolo

del dipolo, è conveniente studiare l'andamento dell'impedenza (in particolare della reattanza) anzichè del coefficiente di riflessione.

La risonanza del dipolo dipende quindi dalla lunghezza  $l$  del braccio che parte dal punto di alimentazione all'interno della spirale e finisce all'estremità più esterna del dipolo ripiegato, ovvero dall'intera lunghezza evidenziata in figura 5.9.

Ricordando a questo punto l'andamento teorico della reattanza del dipolo e indicando con  $2l$  la sua lunghezza complessiva, è noto che essa si annulla in corrispondenza di:

$$2l = 0.5\lambda, \lambda, 1.5\lambda, 2\lambda, \dots \quad (5.1)$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda di lavoro. Questa è la relazione che si dovrà tenere presente durante la realizzazione della struttura, essa infatti dovrà soddisfare tutti i requisiti richiesti, in particolare nella banda UWB, ma la lunghezza complessiva del braccio  $l$  dovrà essere tale soddisfare questa condizione al fine da ottenere risonanza a 868 MHz.

Di seguito si elencano quindi tutte le investigazioni condotte e i risultati ottenuti per ciascuna di esse (come sempre tutte le lunghezze sono espresse in mm).

#### **A - *spiral\_width=2 num\_turns=2.5 sub\_side=66.9***

Questa prima struttura, rappresentata in figura 5.10, appare sicuramente troppo grande rispetto alle dimensioni ricercate, tuttavia si è scelto di iniziare con una configurazione meno stringente in modo da capire quali siano le prestazioni massime raggiungibili e da qui poi iniziare una ricerca volta a ridurre le dimensioni.

Questa struttura garantisce  $|S_{11}| < -10$  dB da 3 a 5 GHz, efficienze di radiazione a 3,

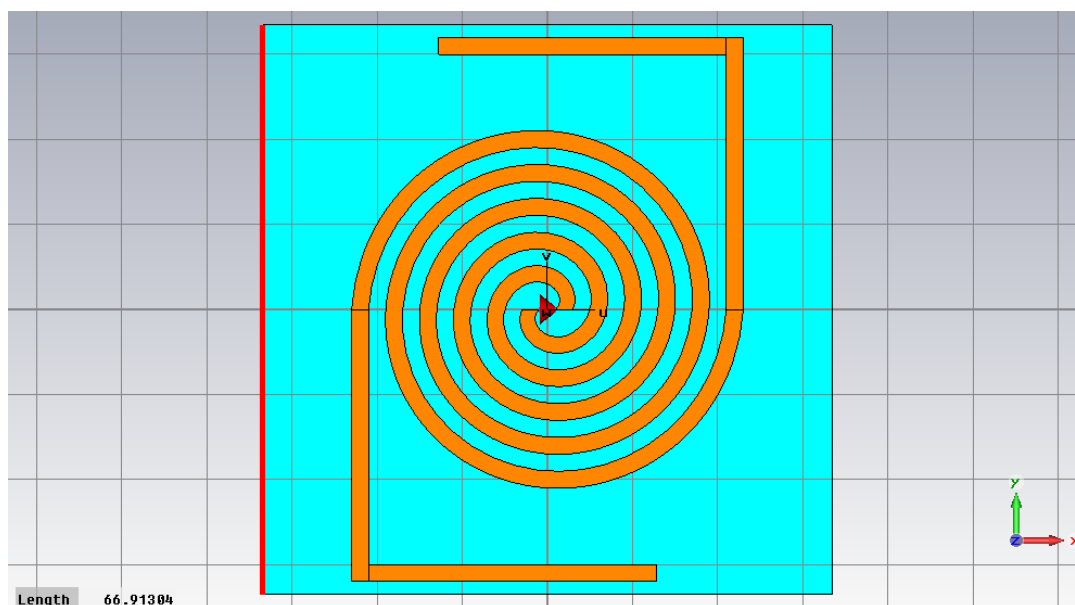


Figura 5.10: Struttura A dell'antenna a spirale di Archimede con annesso dipolo ripiegato

4 e 5 GHz rispettivamente pari al 90%, 91% e 92% e valori di axial ratio rispettivamente 1.2, 4.1 e 1.4 dB. Per quanto riguarda quindi il funzionamento in banda UWB, tutti i requisiti risultano soddisfatti.

Per quanto riguarda il dipolo, la risonanza ( $\text{Im}(Z_{11}) = 0$ ) più vicina a 868 MHz si ha in corrispondenza di 794 MHz, la quale corrisponde all'incirca alla risonanza relativa a  $2l = 1.5\lambda$ , infatti in questo caso la lunghezza complessiva del braccio dell'antenna risulta  $l = 255$  mm. Per avvicinare la risonanza a 868 MHz si dovrebbe ridurre quindi questa lunghezza e ciò sarebbe possibile agendo sulla componente *length2* del dipolo.

L'efficienza di radiazione ottenuta a 868 MHz è del 72%, mentre l'axial ratio assume un valore minimo pari a 36 dB.

I risultati ottenuti in questa prima prova sono senza dubbio molto incoraggianti, ma le dimensioni risultano decisamente troppo elevate, quindi si deve procedere subito verso una loro riduzione; ciò è stato effettuato tramite una diminuzione di *spiral\_width* e *num\_turns*.

#### **B - *spiral\_width*=1.8 *num\_turns*=2 *sub\_side*=49.8**

Questo substrato ha dimensioni più che accettabili, si presenta quindi come un buon candidato per l'antenna ricercata.

$|S_{11}|$  risulta sempre inferiore a -10 dB nella banda UWB; le efficienze di radiazione a 3, 4 e 5 GHz risultano pari rispettivamente all'87%, 90% e 90%, mentre i valori di axial ratio a 10, 2.3 e 3.2 dB. Questo mette già in discussione la bontà di questa struttura, in quanto a 3 GHz non si ha polarizzazione circolare.

Per quanto riguarda il dipolo, in questo caso la lunghezza complessiva  $l$  risulta circa

pari a 163 mm; la forte diminuzione delle dimensioni ha portato ad un avvicinamento alla zona di risonanza  $2l = \lambda$ , in cui la curva della reattanza presenta una pendenza estremamente ripida, rendendo di fatto inutilizzabile questo valore: un lieve scostamento dalla frequenza di risonanza esatta infatti comporterebbe un cambiamento di centinaia di  $\Omega$  sul valore di  $\text{Im}(Z_{11})$ . Per raggiungere risonanze di lavoro accettabili bisogna quindi apportare le dovute modifiche sulla lunghezza  $l$ , una sua ulteriore diminuzione porterebbe ad un avvicinamento alla zona per cui  $2l = 0.5\lambda$ , mentre un aumento tenderebbe a far raggiungere la condizione  $2l = 1.5\lambda$ . Tra le due quest'ultima sarebbe da preferire, in quanto ci si aspetta che la pendenza della curva  $\text{Im}(Z_{11})$  risulti via via minore all'aumentare delle dimensioni.

L'efficienza di radiazione ottenuta a 868 MHz è pari al 42%, mentre l'axial ratio arriva a 40 dB.

**C - *spiral\_width=1.8 num\_turns=2 sub\_side=49.8* aumento *length2* da 24.7 a 37.8**

In seguito alle considerazioni appena fatte riguardo alla risonanza del dipolo si è deciso di provare ad aumentare la lunghezza  $l$ , incrementando *length2* dai 24.7 mm della configurazione (B) a 37.8 mm, in modo da cercare di avvicinarsi alla risonanza relativa a  $2l = 1.5\lambda$ .

Per quanto riguarda la spirale,  $|S_{11}|$  risulta abbastanza buono, ma questa volta (intorno ai 4 GHz) supera, seppur di solo 0.5 dB, i -10 dB. L'efficienza di radiazione a 3, 4 e 5 GHz risulta 89%, 90% e 92% rispettivamente e i valori di axial ratio sono 4.1, 0.2 e 1.8 dB.

In merito alla risonanza del dipolo, la curva della reattanza si trova più vicina alla risonanza a  $1.5\lambda$ , ma non abbastanza, in quanto  $\text{Im}(Z_{11})$  risulta inferiore a -400  $\Omega$ ; occorre quindi modificare ulteriormente le grandezze in gioco.

L'efficienza ottenuta a 868 MHz è pari al 50%, l'axial ratio raggiunge ancora i 40 dB.

**D - *spiral\_width=1.7 num\_turns=2.25 sub\_side=52.6***

Anche in questo caso le dimensioni complessive della struttura risultano accettabili, questa è rappresentata in figura 5.11.

L'antenna risulta adattata su tutta la banda UWB, con  $|S_{11}|$  che scende sotto i -10 dB da 3 a 5 GHz; l'efficienza di radiazione a 3, 4 e 5 GHz risulta rispettivamente 88%, 90% e 91%, l'axial ratio invece 5.2, 0.3 e 3.2 dB.

Per quanto riguarda il dipolo, a 868 MHz  $\text{Im}(Z_{11})$  risulta pari a circa -161  $\Omega$ ; ci si è dunque avvicinati ancora di più alla risonanza  $1.5\lambda$ , ma ancora non abbastanza. In questo caso  $l = 192$  mm.

L'efficienza ottenuta è pari al 41% e l'axial ratio risulta 40 dB.

**E - *spiral\_width=1.7 num\_turns=2.25 sub\_side=52.6* aumento *length2* da 32.6 a 40.6**

L'obiettivo di questo aumento di *length2* è quello di un ulteriore avvicinamento alla risonanza a  $1.5\lambda$ .



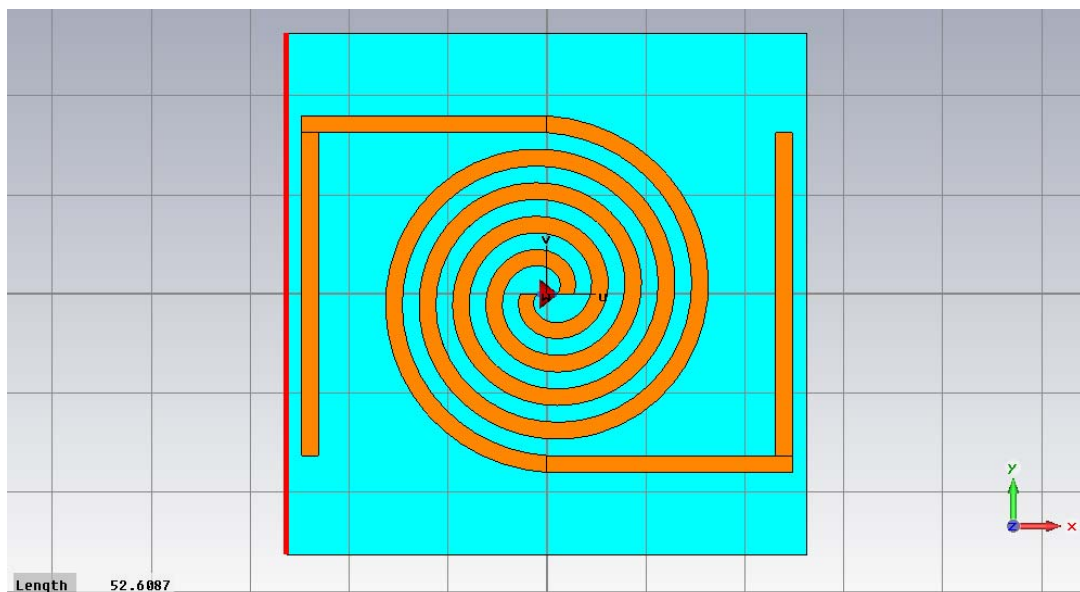


Figura 5.11: Struttura D dell'antenna a spirale di Archimede con annesso dipolo ripiegato

L' $|S_{11}|$  ottenuto risulta inferiore a -10 dB su tutta la banda UWB; l'efficienza di radiazione è pari all'89%, 84% e 91% rispettivamente alle frequenze 3, 4 e 5 GHz, mentre l'axial ratio risulta 3, 1.4 e 1.2 dB.

Per quanto riguarda il dipolo, in questo caso si ottiene  $\text{Im}(Z_{11}) = -99\Omega$ , ci si è dunque avvicinati alla condizione di risonanza desiderata, ma l'aumento di  $length2$  non è stato sufficiente.

L'efficienza ottenuta a 868 MHz è pari al 52%, l'axial ratio invece 40 dB.

#### **F - $spiral\_width=1.8$ $num\_turns=2.25$ $sub\_side=55.3$**

In questo caso le dimensioni della struttura risultano leggermente più elevate, ma ancora accettabili e come abbiamo visto per raggiungere la risonanza  $2l = 1.5\lambda$  non si può fare altro che aumentare le dimensioni.

L' $|S_{11}|$  raggiunto è inferiore ai -10 dB su tutta la banda, l'efficienza calcolata a 3, 4 e 5 GHz è rispettivamente 89%, 89% e 91%, l'axial ratio invece 2.1, 0.9 e 2.1 dB.

E' interessante notare il beneficio che si è ottenuto nelle prestazioni (axial ratio, in particolare) alla frequenza inferiore della banda UWB. L'aumento delle dimensioni ha favorito l'ottenimento della polarizzazione circolare anche a 3 GHz.

In questo caso la lunghezza raggiunta dal braccio dell'antenna risulta essere  $l = 211$  mm, il che porta ad una risonanza alla frequenza 925 MHz (in cui  $\text{Re}(Z_{11})$  risulta pari a circa  $12\Omega$ ); questo significa che, nonostante ci si stia avvicinando al risultato desiderato, non si è ancora aumentata abbastanza la lunghezza del braccio dell'antenna; a 868 MHz infatti  $\text{Im}(Z_{11})$  risulta pari a circa  $-53\Omega$ , occorre quindi aumentare ulteriormente la dimensione della struttura.

In questo caso l'efficienza raggiunta è pari al 56%, mentre l'axial ratio è come sempre 40 dB.

#### **G - *spiral\_width=1.8 num\_turns=2.5 sub\_side=60.8***

In questo caso il lato del substrato, superiore ai 6 cm, seppur minore di quello relativo alla configurazione (A) risulta poco accettabile per i requisiti richiesti; ciononostante si analizza comunque questa struttura, per vedere se si riesce finalmente a raggiungere la risonanza desiderata.

Per quanto riguarda la spirale,  $|S_{11}|$  è inferiore ai -10 dB su tutta la banda UWB, l'efficienza di radiazione assume i valori 89%, 90% e 91% a 3, 4 e 5 GHz rispettivamente e l'axial ratio a sua volta 1.7, 3.2 e 1.5 dB.

Per quanto riguarda invece il dipolo, in questo caso a 868 MHz  $\text{Im}(Z_{11}) = 30\Omega$ . Questo significa che si è finalmente raggiunta (e superata) la lunghezza per cui si ha la risonanza desiderata, in questo caso  $l = 239$  mm. Si può facilmente verificare infatti che con questa lunghezza la risonanza  $2l = 1.5\lambda$  si ha a 835 MHz (in cui  $\text{Re}(Z_{11}) = 10\Omega$ ). Questa volta si rende quindi necessario un lieve decremento delle dimensioni.

A 868 MHz l'efficienza di radiazione raggiunta è pari a circa il 59%, mentre l'axial ratio risulta intorno ai 39 dB.

#### **H - *spiral\_width=1.8 num\_turns=2.5 sub\_side=60.8 decremento length2 da 38 a 30***

Per quanto riguarda la spirale tra 3 e 5 GHz si ottiene  $|S_{11}| < -10$  dB, l'efficienza di radiazione a 3, 4 e 5 GHz è pari all'88%, 88% e 92% e l'axial ratio a 3.7, 3.6 e 1.6 dB.

Riguardo alla risonanza del dipolo, il decremento di *length2* ha portato finalmente, per gli 868 MHz, ad un valore di  $\text{Im}(Z_{11})$  pari a  $-2.3 \Omega$  e di  $\text{Re}(Z_{11})$  di circa  $9.3 \Omega$ . La risonanza esatta si ha a 870 MHz, ma i valori ottenuti risultano comunque accettabili. La lunghezza  $l$  del braccio dell'antenna per cui si ottiene la desiderata condizione  $2l = 1.5\lambda$  è quindi pari a circa 231 mm.

In questo caso l'efficienza di radiazione a 868 MHz vale 49% e l'axial ratio risulta circa 39 dB.

Nonostante si sia ottenuto finalmente l'obiettivo ricercato, come già detto una struttura di lato oltre i 6 cm risulta troppo grande per il tag che si sta cercando di ricavare, quindi si prosegue l'indagine in cerca di altre configurazioni possibili.

#### **I - *spiral\_width=1.5 num\_turns=2.75 sub\_side=56.2***

Si è provato in questo caso a diminuire lo spessore delle linee dell'antenna e ad aumentare il numero di giri, per vedere verso quale trend evolutivo può portare questo cambiamento. In questo caso si è cercato fin da subito di realizzare una struttura con lunghezza del braccio  $l$  il più possibile vicina a 231 mm, in quanto si è visto che è questa la lunghezza che porta alla desiderata situazione di risonanza a 868 MHz.

La struttura così realizzata presenta dimensioni ancora una volta abbastanza accettabili. Per quanto riguarda la spirale sono stati ottenuti i seguenti risultati:  $|S_{11}| < -10$  dB da 3 a 5 GHz, efficienza di radiazione pari a 84%, 85%, 88% a 3, 4 e 5 GHz rispettivamente e axial ratio 4.9, 1.2 e 2.2 dB.

In riferimento all'andamento del dipolo, in questo caso l'esatta risonanza si otterrebbe a 863 MHz, ma a 868 MHz si hanno comunque i buoni valori  $\text{Im}(Z_{11}) = 3.7\Omega$  e  $\text{Re}(Z_{11}) = 7.1\Omega$ . L'efficienza di radiazione è di circa il 44% e l'axial ratio è di 40 dB.

Dai risultati ottenuti sembra quindi possibile affermare che la riduzione della larghezza delle linee non ha introdotto sostanziali miglioramenti, ha anzi avuto come conseguenza una lieve riduzione dell'efficienza di radiazione, sia nelle banda UWB, che a 868 MHz; questo porta quindi a ritenere opportuno utilizzare valori di *spiral\_width* non inferiori a 1.7-1.8 mm per tutte le investigazioni successive.

#### **J - *spiral\_width*=2 *num\_turns*=1.25 *sub\_side*=36.4**

Al fine di una considerevole riduzione delle dimensioni complessive si è anche voluto analizzare la possibilità di diminuire drasticamente il numero di giri della spirale, realizzando così una struttura di lato pari a poco più di 3 centimetri e mezzo. Chiaramente in questo modo risulterà impossibile raggiungere la risonanza  $2l = 1.5\lambda$ , si cercherà bensì di operare alla prima risonanza del dipolo, vale a dire  $2l = 0.5\lambda$ .

Per quanto riguarda i risultati nella banda UWB, purtroppo  $|S_{11}|$  risulta inferiore a -10 dB soltanto tra i 3.4 e i 4.6 GHz e superiore altrove. L'efficienza di radiazione risulta circa del 90% a tutte le frequenze tra i 3 e 5 GHz, ma l'axial ratio vale rispettivamente 17.2, 11.9 e 7.7 dB a 3, 4 e 5 GHz.

La lunghezza complessiva del braccio dell'antenna così realizzata risulta circa pari a  $l = 87$  mm; in questo modo a 868 MHz si ottiene  $\text{Im}(Z_{11}) = 4.8\Omega$  e  $\text{Re}(Z_{11}) = 1.4\Omega$  (valore decisamente basso). L'efficienza di radiazione è pari a circa il 19% e l'axial ratio come sempre 40 dB.

Questa struttura non ha quindi dato i risultati sperati, ma risulta molto utile per trarre alcune considerazioni da sfruttare nelle ricerche future. Innanzitutto le dimensioni sono troppo piccole per permettere un corretto funzionamento dell'antenna, soprattutto relativamente alla spirale nella banda UWB, questo si deduce, oltre che da  $|S_{11}|$ , anche dagli alti valori di axial ratio ottenuti. Ciò è perfettamente coerente con tutti i risultati ottenuti nelle numerose simulazioni precedenti: una struttura di dimensioni inferiori ai 4 cm non è in grado di soddisfare i requisiti per un corretto funzionamento dell'antenna nella banda UWB. Oltre a questo, importante è anche quanto ottenuto riguardo alla risonanza del dipolo: dimensioni così contenute permettono di avvicinarsi alla sola situazione di risonanza  $2l = 0.5\lambda$ , ma in questa zona la resistenza di radiazione assume valori estremamente bassi, cosa che potrebbe far nascere alcune difficoltà in fase di realizzazione del circuito rettificatore; tale aspetto tuttavia è ancora da verificare.

Alla luce dei risultati ottenuti si prosegue con l'investigazione della struttura in esame, ma tornando ad avvicinarsi il più possibile alla zona di risonanza corrispondente a  $1.5\lambda$ .

#### **K - *spiral\_width*=2 *num\_turns*=2 *sub\_side*=54.7**

Le analisi finora condotte hanno iniziato a delineare i limiti e i requisiti da rispettare per la realizzazione di una efficiente struttura. Le dimensioni non possono essere troppo piccole (3-4 cm) perché queste pregiudicherebbero il corretto funzionamento dell'an-

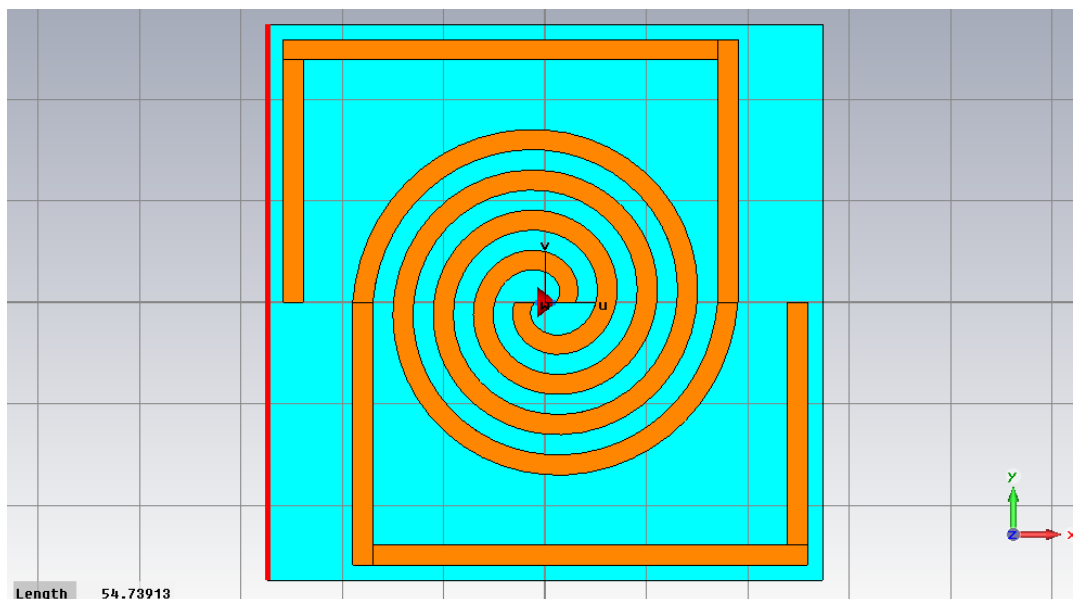


Figura 5.12: Struttura K dell'antenna a spirale di Archimede con annesso dipolo ripiegato

tenna, soprattutto nella banda UWB; non possono essere troppo grandi (oltre i 6 cm) perché i requisiti richiesti al tag non sarebbero rispettati: le dimensioni complessive dell'antenna dovranno quindi indicativamente stare tra i 4.5 e i 5.5 cm. Oltre a questo, bisogna essere in grado di raggiungere la condizione di risonanza  $2l = 1.5\lambda$  a 868 MHz e questo comporta la necessità di realizzare una linea di conduttore sufficientemente lunga; al tempo stesso, però, la larghezza della linea di conduttore (*spiral\_width*) non può essere ridotta troppo, perché come si è visto questo porta in generale ad una riduzione dell'efficienza di radiazione.

L'insieme di tutti questi vincoli ha portato alla definizione di un nuovo tipo di struttura: essa consiste nell'introduzione di un'ulteriore ripiegatura al braccio del dipolo, al fine di poterne aumentare la lunghezza (per raggiungere la risonanza desiderata), ma senza un eccessivo aumento delle dimensioni del substrato. L'antenna proposta è riportata in figura 5.12.

I risultati ottenuti in questo caso sono molto buoni. Per quanto riguarda la spirale  $|S_{11}|$  risulta inferiore ai -10 dB su tutta la banda UWB; l'efficienza di radiazione a 3, 4 e 5 GHz è pari rispettivamente al 90%, 91% e 92%, mentre l'axial ratio vale 1.5, 1.5 e 2.6 dB.

Riguardo al dipolo, invece, la risonanza esatta è stata ottenuta a 864 MHz, mentre a 868 MHz  $\text{Im}(Z_{11})$  risulta circa  $3.1 \Omega$  e  $\text{Re}(Z_{11})$   $8.7 \Omega$  (in questo caso  $l = 219$  mm). L'efficienza di radiazione è pari al 60% e l'axial ratio a 39 dB.

Questa configurazione ha quindi portato a risultati più che interessanti; si prosegue comunque con la ricerca al fine di valutare se ulteriori modifiche alla struttura appena proposta possano portare a risultati ancora migliori.

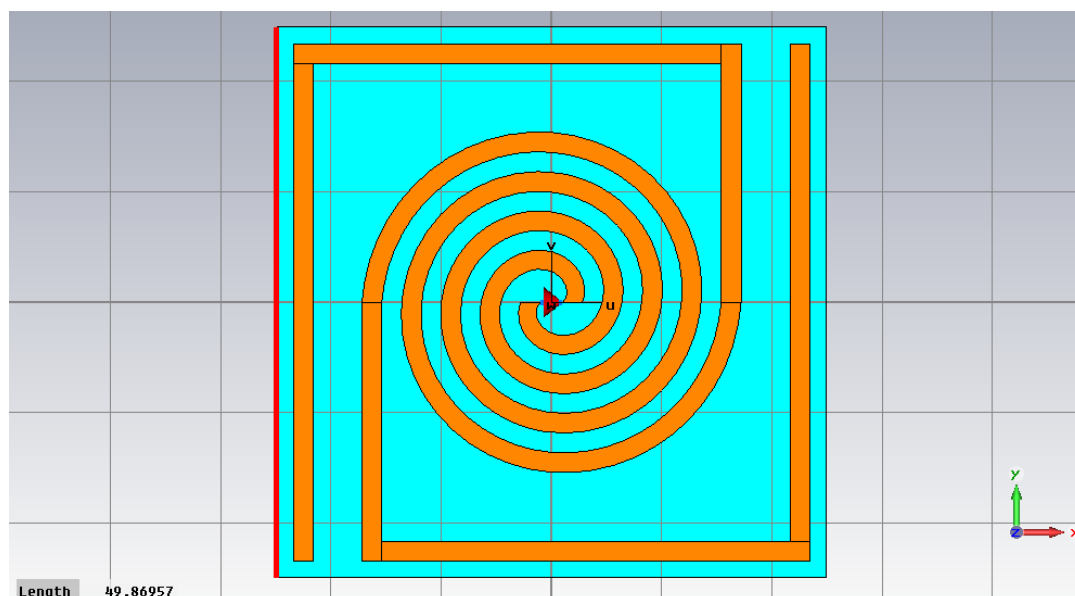


Figura 5.13: Struttura L dell'antenna a spirale di Archimede con annesso dipolo ripiegato

**L -  $spiral\_width=1.8$   $num\_turns=2$   $sub\_side=49.8$**

Tramite una riduzione di  $spiral\_width$  a 1.8 mm si riducono le dimensioni del substrato a poco meno di 5 cm. L'antenna così realizzata è rappresentata in figura 5.13.

In questo caso i risultati ottenuti per la spirale sono i seguenti:  $|S_{11}| < -10$  dB su tutta la banda (3-5 GHz), efficienze 89%, 88% e 91% a 3, 4 e 5 GHz e axial ratio 2.2, 4.2 e 1.9 dB.

Il braccio dell'antenna risulta di lunghezza complessiva  $l$  pari a circa 222 mm, ma in questo caso questo porta ad una condizione di risonanza per gli 827 MHz; a 868 MHz la reattanza risulta circa  $27 \Omega$  (e  $\text{Re}(Z_{11}) = 4.5\Omega$ ). L'efficienza a 868 MHz risulta circa del 42% e l'axial ratio vale ancora 40 dB.

**M -  $spiral\_width=1.8$   $num\_turns=2$   $sub\_side=49.8$  decremento  $length3$  da 45 a 35**

Poiché con la configurazione (L) si è ottenuta risonanza per una frequenza più bassa di quella desiderata, è necessario diminuire la lunghezza  $l$  complessiva per avvicinarsi alla risonanza a  $1.5\lambda$  per gli 868 MHz. Analogamente a quanto fatto in precedenza riguardo a  $length2$ , si è indicato con  $length3$  quella che adesso è la terza componente di lunghezza del dipolo, ovvero quella all'estremità più esterna della linea, dopo la seconda ripiegatura.

In questo caso per la spirale purtroppo  $|S_{11}|$  risulta superiore a -10 dB per le frequenza tra 3.8 e 4.3 GHz; le efficienze di radiazione sono pari rispettivamente a 89%, 87% e 91% a 3, 4 e 5 GHz e l'axial ratio a 0.8, 2.3 e 2.7 dB.

A 868 MHz si ottiene la situazione di risonanza, in quanto  $\text{Im}(Z_{11}) = 0.8\Omega$ ; in questo caso  $\text{Re}(Z_{11}) = 5.4\Omega$ .

L'efficienza di radiazione ottenuta a 868 MHz è invece uguale al 46%, mentre l'axial ratio raggiunge i 40 dB.

#### **N - *spiral\_width=1.8 num\_turns=2.25 sub\_side=55.3***

Con questa configurazione, lasciando invariata la larghezza delle linee, si aumenta il numero di giri della spirale in modo da riuscire a raggiungere la lunghezza  $l$  desiderata anche senza occupare tanto spazio al di sopra del substrato come avviene per le due precedenti strutture; questo, nonostante porti ad un lieve aumento delle dimensioni, potrebbe tornare utile nel momento in cui si renderà necessario realizzare qualche tipo di circuiteria sul substrato del tag.

In questo caso, per quanto riguarda la spirale,  $|S_{11}|$  risulta inferiore a -10 dB su tutta la banda UWB, l'efficienza è pari all'89%, 90% e 91% a 3, 4 e 5 GHz rispettivamente, mentre l'axial ratio assume i valori 2.4, 0.5 e 2.8 dB.

A 868 MHz  $\text{Im}(Z_{11})$  vale  $1.3\Omega$  e  $\text{Re}(Z_{11})$   $11.1\Omega$ . L'efficienza di radiazione riesce ad arrivare al 63% a 868 MHz, mentre l'axial ratio raggiunge i 39 dB.

#### **O - *spiral\_width=1.8 num\_turns=2.125 sub\_side=52.6***

In questo caso si riduce lievemente il numero di giri, sempre con lo scopo di ridurre le dimensioni.

Per la spirale, si ha adattamento su tutta la banda UWB, anche se in questo caso a 4.8 GHz  $|S_{11}|$  risulta proprio pari a questo valore limite; le efficienze sono 89%, 90% e 90%, mentre l'axial ratio vale 1.8, 0.8 e 2.7 dB.

Per quanto riguarda il dipolo, a 868 MHz esso si trova in risonza, in quanto la reattanza vale circa  $0.7\Omega$ , mentre la resistenza  $8.6\Omega$ . Si raggiunge un'efficienza del 56% e un axial ratio di 40 dB.

#### **P - *spiral\_width=1 num\_turns=3.5 sub\_side=48.6***

Si prova infine un ultimo tentativo di riduzione della larghezza delle linee. Questa considerevole diminuzione di *spiral\_width* porta infatti alla creazione di una struttura di lato inferiore ai 5 cm senza avere bisogno di ripiegare il dipolo una seconda volta.

In questo caso  $|S_{11}|$  risulta maggiore di -10 dB tra 3.3 e 3.6 GHz; le efficienze di radiazione valgono rispettivamente 73%, 82% e 85% a 3, 4 e 5 GHz, mentre l'axial ratio assume i valori 12.6, 0.6 e 3.5 dB.

Per quanto riguarda il dipolo, la risonanza esatta si ha 840 MHz, mentre a 868 MHz  $\text{Im}(Z_{11}) = 16.5\Omega$ . L'efficienza di radiazione vale appena il 12% e l'axial ratio come sempre 40 dB.

Quest'ultimo risultato ribadisce ancora una volta come sia meglio non diminuire la larghezza delle linee di conduttore, in quanto questo porta in generale ad una diminuzione dell'efficienza di radiazione

### 5.2.3 Configurazione scelta

In aggiunta a quelle sopra elencate, sono state realizzate anche alcune altre configurazioni di tentativo. Sono state per esempio realizzate strutture in cui la larghezza delle linee del dipolo risultava diversa da quella delle linee della spirale, o ancora strutture impieganti la tecnica di gap-loading. Nessuno di questi tentativi ha tuttavia portato al raggiungimento di risultati più soddisfacenti di quelli finora descritti; la tecnica di gap-loading in particolare risulta troppo complicata da realizzare in questo caso e non introduce nessun apparente vantaggio.

Analizzati quindi tutti i risultati delle strutture precedentemente descritte, si è deciso di selezionare tra queste la configurazione (N) come quella complessivamente migliore.

Le dimensioni del substrato sono pari a circa 5.5 cm e quindi rientrano nelle specifiche richieste al *green tag* oggetto di studio; il comportamento dell'antenna risulta ottimo in tutta la banda UWB: si ha infatti un buon adattamento da 3 a 5 GHz, si raggiungono efficienze di radiazione dell'ordine del 90% su tutta la banda e la polarizzazione appare di tipo circolare.

Anche il comportamento del dipolo a 868 MHz è decisamente buono, esso risulta in risonanza a suddetta frequenza, presenta polarizzazione rettilinea e soprattutto raggiunge un'efficienza di radiazione pari al 63%, valore più alto di quelli ottenuti tra tutte le configurazioni precedentemente giudicate "accettabili", motivo principale che ha portato alla scelta di questa particolare struttura.

L'antenna realizzata è rappresentata in figura 5.14 e di seguito sono riassunti i valori dei parametri che la caratterizzano:

parametro	valore	descrizione
<i>num_turns</i>	2.25	numero giri della spirale
<i>spiral_in_radius</i>	1	raggio interno della spirale
<i>spiral_width</i>	1.8	larghezza linee della spirale
<i>spiral_gap</i>	<i>spiral_width</i>	spazio tra le linee della spirale
<i>sub_side</i>	55.3	lato del substrato
<i>paper_thick</i>	0.23	spessore strato di carta
<i>sub_thick</i>	3* <i>paper_thick</i>	spessore substrato di carta
<i>ink_thick</i>	0.035	spessore inchiostro conduttivo
<i>length1</i>	26.1	prima componente braccio del dipolo
<i>length2</i>	45.1	seconda componente braccio del dipolo
<i>length3</i>	13.1	terza componente braccio del dipolo

come sempre tutte le lunghezze riportate sono intese in millimetri.

Si riportano infine i diagrammi di radiazione (in scala lineare) dell'antenna alle frequenze 868 MHz (fig. 5.15), 3 GHz (fig. 5.16), 4 GHz (fig. 5.17) e 5 GHz (fig. 5.18).

Questa è dunque la struttura che si propone come candidata alla realizzazione dell'antenna per il *green tag*.

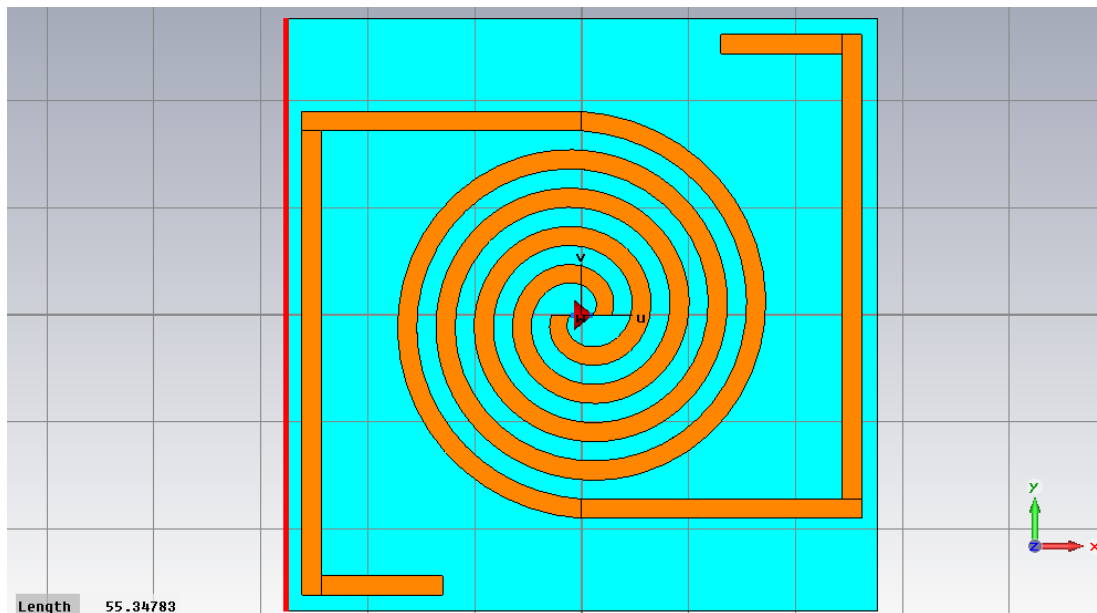
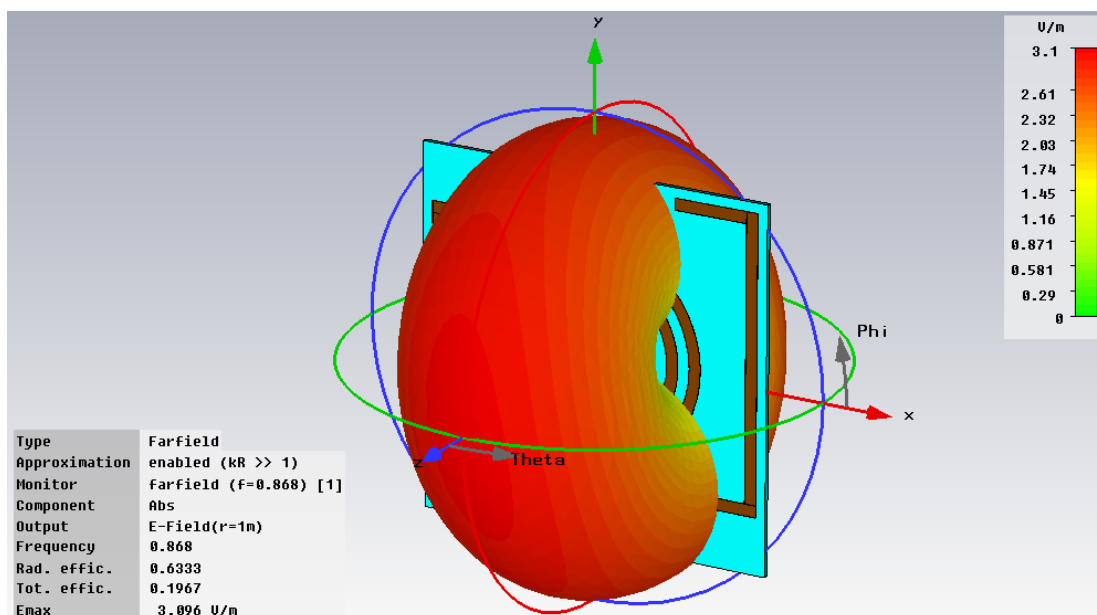
Figura 5.14: Antenna finale scelta per la realizzazione del *green tag*

Figura 5.15: Diagramma di radiazione a 868 MHz



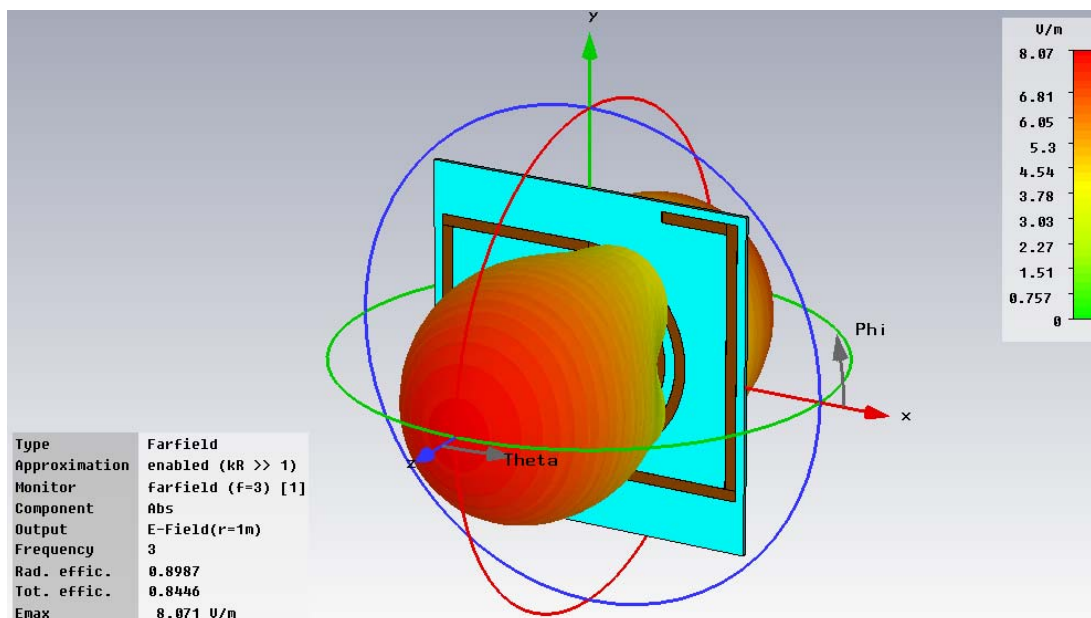


Figura 5.16: Diagramma di radiazione a 3 GHz

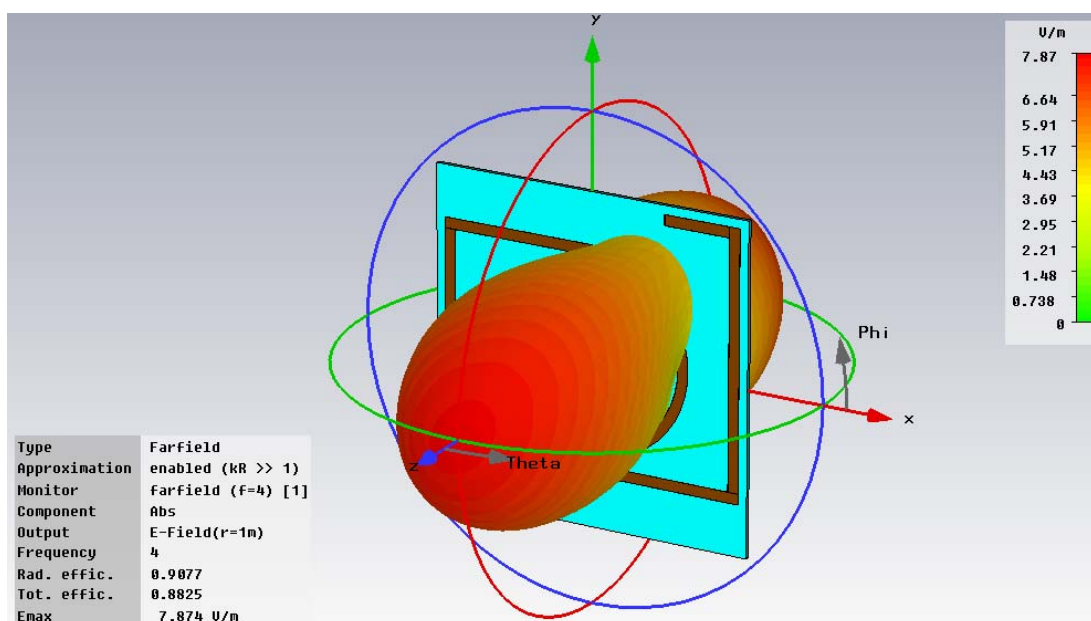


Figura 5.17: Diagramma di radiazione a 4 GHz

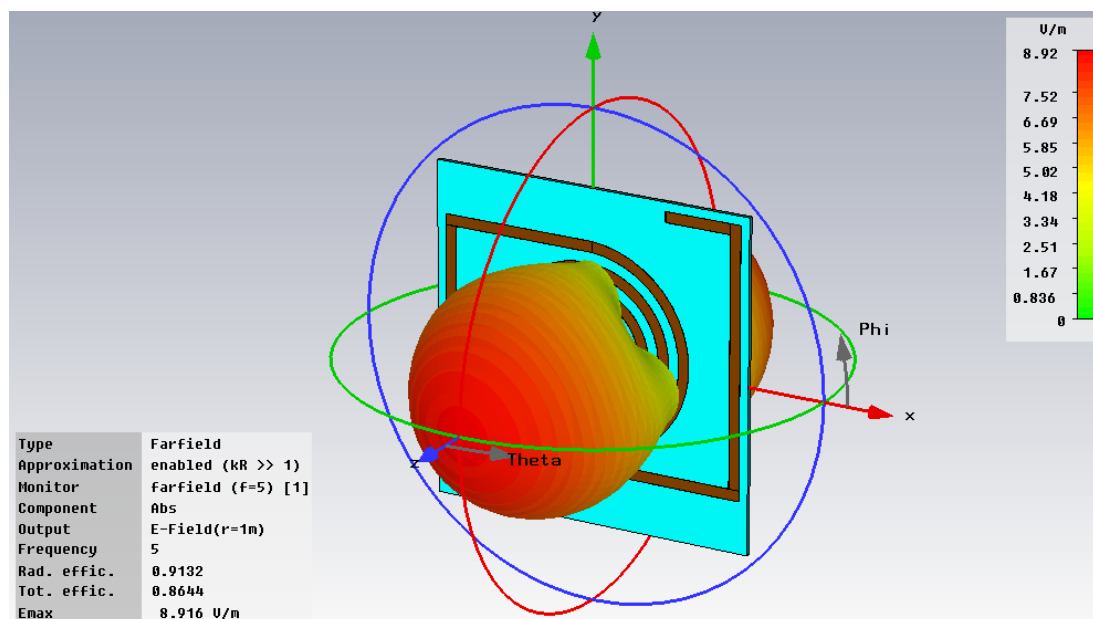


Figura 5.18: Diagramma di radiazione a 5 GHz

### 5.2.4 Risultati in assenza di perdite

Sono già state in precedenza discusse le proprietà del substrato di carta che si utilizza per la realizzazione del tag.

La carta presenta indubbiamente molteplici vantaggi, primi fra tutti la sua alta biodegradabilità, l'ampia disponibilità e il costo estremamente contenuto. E' al tempo stesso vero che nonostante soddisfi appieno i requisiti di eco-compatibilità richiesti al tag, non è certamente il materiale più adatto alla realizzazione di substrati per dispositivi elettronici.

Uno dei principali svantaggi è legato alle perdite che questa introduce: la sua tangente di perdita, pari a 0.053 (a 4 GHz), è infatti abbastanza alta, spesso addirittura di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella dei materiali tipicamente utilizzati per la realizzazione di substrati.

Per questo motivo, una volta ricavata la migliore struttura per l'antenna in esame, si è anche voluto valutare quanto fossero influenti le perdite introdotte dalla carta. Si sono quindi eliminate completamente le perdite, fissando la tangente di perdita  $\tan \delta = 0$  e sono state esaminate le prestazioni ottenute in questo caso dall'antenna poc'anzi descritta.

I risultati ottenuti hanno messo in mostra prestazioni praticamente identiche a quella del caso con perdite, a fronte però di un forte aumento dell'efficienza di radiazione. Vengono di seguito riportati i valori di efficienza di radiazione raggiunti:

---

<b>frequenza</b>	<b>con perdite</b>	<b>senza perdite</b>
868 MHz	63.3 %	82.8 %
3 GHz	89.9 %	99.6 %
4 GHz	90.8 %	99.5 %
5 GHz	91.3 %	99.9 %

Il notevole incremento dell'efficienza di radiazione mette quindi distintamente in mostra quanto il substrato di carta risulti penalizzante in termini di perdite.

## Parte III

# Circuito rettificatore e risultati

## Capitolo 6

# Circuito rettificatore

Una delle peculiarità principali che caratterizza il tag RFID oggetto della ricerca è la totale assenza di batterie al suo interno; come già più volte anticipato, quindi, esso dovrà adottare meccanismi tali da raggiungere una completa autonomia energetica.

Per la comunicazione nella banda UWB si prevede l'utilizzo del tag come componente esclusivamente passivo, ciò significa che la risposta che esso invia al reader avviene esclusivamente tramite riflessione della potenza del segnale interrogativo proveniente da quest'ultimo; le proprietà riflessive dell'antenna del tag varieranno in base all'informazione che deve essere trasmessa al reader (*backscatter modulation*).

Per un corretto funzionamento del tag tuttavia è necessaria la presenza di un'unità di controllo al suo interno, i cui circuiti andranno opportunamente alimentati. Oltre a questo, al di là della semplice comunicazione con il reader, il tag dovrà anche svolgere una serie di ulteriori funzioni; si vuole infatti realizzare uno smart tag equipaggiato con sensori di vario tipo, i quali avranno chiaramente bisogno di un'adeguata fonte di alimentazione per funzionare.

Tutte queste funzionalità richiedono un apporto di energia che va al di là del semplice segnale RF ricevuto dal reader e l'assenza di batterie implica la necessità di realizzare un efficiente sistema di energy harvesting tale da garantire un contributo di potenza sufficiente all'espletamento di tutti i compiti richiesti al tag.

Individuata la struttura candidata ad antenna per il tag, si vuole a questo punto fare una prima analisi del circuito rettificatore che si dovrà realizzare su quest'ultimo per svolgere i compiti richiesti dall'energy harvester. Questo ci permette di avere un'idea di massima della potenza effettivamente convertibile in modo da poter essere opportunamente utilizzata da parte del tag.

### 6.1 Software utilizzato

Per lo studio e la progettazione del circuito da realizzare è stato utilizzato AWR Design Environment<sup>®</sup> (AWRDE).

AWRDE ed in particolare la suite Microwave Office, è un programma di simulazione circuitale utilizzabile per il progetto di tutti i tipi di circuiti a radiofrequenza e a

microonde, sia lineari che non lineari. Esso permette la creazione di complessi circuiti e di eseguirne un veloce e accurato studio attraverso diversi metodi di analisi, tra cui quello del bilanciamento armonico.

Nel corso della realizzazione del circuito rettificatore una delle funzioni maggiormente utilizzate di AWRDE è stata quella relativa all'ottimizzazione in tempo reale delle grandezze caratteristiche del circuito. In particolare, è stata importata in AWRDE la matrice S dell'antenna realizzata in CST MWO, dopodiché sono stati definiti alcuni obiettivi principali che il circuito deve soddisfare e ne sono state conseguentemente ottimizzate le grandezze caratteristiche.

## 6.2 Circuito realizzato

Al fine di una stima della quantità di potenza ottenibile sarebbe sufficiente creare una rete di adattamento per la sola frequenza 868 MHz, quella in cui si effettua appunto energy harvesting, seguita da un opportuno rettificatore. In un'ottica di progetto più ampia si è però deciso di mettere già da subito in conto il "duplice" funzionamento dell'antenna: harvester per le docce RF a 868 MHz e dispositivo di comunicazione nella banda (3.1-4.8 GHz); in questo modo si ottiene anche una più realistica configurazione di quello che potrebbe essere il circuito finale da realizzare sul tag.

Per quanto riguarda il recupero di potenza a 868 MHz, dalle docce RF arriverà una certa contributo di potenza a radiofrequenza, questa per poter essere utilizzata verrà convertita in continua attraverso un apposito rettificatore (e successivamente convertita alla giusta tensione di lavoro per un suo utilizzo nei circuiti a valle di quest'ultimo). Chiamando  $P_{RF}$  (o  $P_{AV}$ ) la potenza a radiofrequenza proveniente dalle docce RF, ricevuta dall'antenna e resa quindi disponibile all'ingresso del circuito e  $P_{DC}$  la potenza in continua rettificata, si può definire l'efficienza di conversione  $\eta$  attraverso il rapporto:

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{RF}} \quad (6.1)$$

chiaramente si cercherà di fare in modo di rendere questa efficienza più alta possibile. Dato il basso valore delle potenze in gioco tuttavia non risulterà pensabile raggiungere valori particolarmente elevati.

Per motivi di semplicità anziché considerare l'intero range di frequenze della banda UWB si caratterizzerà il comportamento del circuito alla sola frequenza centrale 3.95 GHz.

Gli obiettivi principali sono quindi due:

- a 3.95 GHz si richiede che la maggior parte della potenza in ingresso si propaghi verso l'uscita desiderata, ovvero alla porta UWB. Idealmente si desidera un trasferimento del segnale senza perdite di potenza; chiaramente però la natura dissipativa dei materiali utilizzati farà sì che una parte di questa venga inevitabilmente perduta;
- a 868 MHz si richiede l'efficienza più alta possibile nella conversione della potenza disponibile all'ingresso ( $P_{RF}$ ) in potenza in continua ( $P_{DC}$ ).

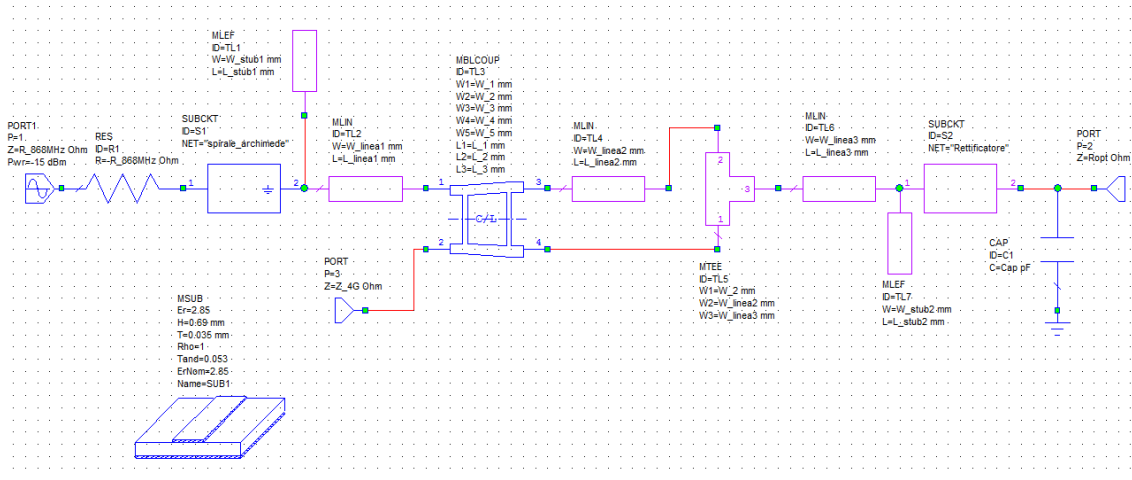


Figura 6.1: Topologia circuitale relativa alla “soluzione 1”

Con lo scopo di soddisfare gli obiettivi preposti sono state realizzate due diverse possibili topologie circuitali.

### 6.2.1 Soluzione 1

In un primo caso si è utilizzato un accoppiatore tale da funzionare come divisore a 3 dB del segnale in arrivo alla frequenza 868 MHz; su ciascuna delle due uscite accoppiate di quest’ultimo si ottiene così il segnale a potenza dimezzata, queste vengono poi opportunamente ricollegate e il tutto va in ingresso al blocco che si occupa della rettificazione. In questo modo si cerca quindi di massimizzare la potenza in continua disponibile alla porta 2, che rappresenta quindi  $P_{DC}$ .

La porta dell’accoppiatore idealmente isolata a 868 MHz è invece quella in cui si cerca di far confluire la quasi totalità di potenza del segnale a 3.95 GHz. In questo caso alla porta 3 si collegherà quindi il chip destinato alla comunicazione UWB.

Il circuito descritto è rappresentato in figura 6.1.

Esso in particolare fa riferimento allo schematico che si utilizza per la frequenza 868 MHz. A questa frequenza si sceglie di impostare come potenza disponibile in ingresso alla porta 1 ( $P_{RF}$ ) un valore pari a -15 dBm, valore abbastanza plausibile date le potenze utilizzabili dalle docce RF e le distanze di collegamento tipiche degli ambienti indoor. Inoltre si imposta come valore di impedenza alla porta 1 l’esatto valore che l’antenna realizzata presenta alla frequenza 868 MHz, ovvero 11.13  $\Omega$ .

Lo schematico a 3.95 GHz è identico a questo, con la sola sostituzione della relativa potenza in ingresso, questa volta pari a -10 dBm e dell’impedenza, pari invece a 127.2  $\Omega$ . In realtà il livello del segnale a 3.95 GHz in questo caso è poco significativo, poiché il segnale a questa frequenza coinvolge solo componenti lineari.

La sottorete denominata “spirale\_archimede” descrive l’antenna scelta per la realizzazione del tag, precedentemente proposta e descritta, mentre quella chiamata

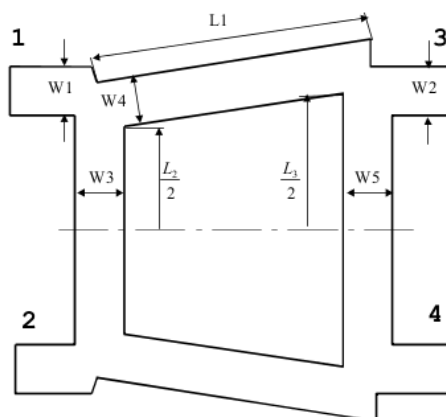


Figura 6.2: Topologia dell'accoppiatore utilizzato e relativi parametri

“rettificatore” contiene appunto il circuito non lineare che si occupa di convertire il segnale in continua.

### 6.2.2 Risultati soluzione 1

Dopo numerose ottimizzazioni, la topologia che ha fornito i migliori risultati è quella caratterizzata dalle seguenti grandezze (in riferimento alle figure 6.1 e 6.2):

parametro	valore
$W_{1}$	2.273 mm
$W_{2}$	0.801 mm
$W_{3}$	0.119 mm
$W_{4}$	0.100 mm
$W_{5}$	0.761 mm
$L_{1}$	11.253 mm
$L_{2}$	26.492 mm
$L_{3}$	63.978 mm
$W_{\text{linea1}}$	2.273 mm
$L_{\text{linea1}}$	73.978 mm
$W_{\text{linea2}}$	0.801 mm
$L_{\text{linea2}}$	63.296 mm
$W_{\text{linea3}}$	0.100 mm
$L_{\text{linea3}}$	33.428 mm
$W_{\text{stub1}}$	0.100 mm
$L_{\text{stub1}}$	5.002 mm
$W_{\text{stub2}}$	0.100 mm
$L_{\text{stub2}}$	5.003 mm
Cap	594.99 pF
Ropt	7605.08 $\Omega$
$R_{4G}$	95.34 $\Omega$



Sono stati così ottenuti i seguenti risultati:

- $P_{DC} = -21.67 \text{ dBm}$  (potenza in continua alla porta 2);
- $\eta = 22.15\%$  (efficienza di conversione);
- $P_{out_{3.95GHz}} = -14.09 \text{ dBm}$  (potenza a RF alla porta 3).

Come previsto quindi l'efficienza di conversione non riesce a raggiungere valori molto elevati, anche a causa delle basse potenze in gioco. Purtroppo inoltre, come si può facilmente notare dalla potenza in uscita a 3.95 GHz, le perdite sono abbastanza consistenti.

Dalle dimensioni elencate nella tabella sopra riportata si può notare come alcune linee presentino una lunghezza considerevole, soprattutto in relazione alle dimensioni del substrato di carta su cui viene realizzata l'antenna. Il substrato infatti ha lato pari a 55 mm e alcune lunghezze delle piste del circuito superano i 60 mm; questo significa che per una sua effettiva realizzazione sul substrato di carta considerato si renderà necessaria l'adozione di particolari tecniche di miniaturizzazione del circuito, quali la meandrazione.

### 6.2.3 Soluzione 2

Questa seconda topologia è concettualmente identica alla precedente, a differenza del solo fatto che l'accoppiatore qui funziona da divisore a 3 dB alla frequenza 3.95 GHz e quindi risulta più piccolo rispetto alla soluzione precedente (dato che le lunghezze dei rami sono legate alla lunghezza d'onda). Attraverso la porta isolata confluisce invece in questo caso il segnale a 868 MHz.

Il circuito in esame è rappresentato in figura 6.3.

### 6.2.4 Risultati soluzione 2

Anche questa volta è stato eseguito un elevato numero di ottimizzazioni, con lo scopo di ricavare la topologia che garantisse i risultati migliori.

In questo caso sono state ricavate le seguenti grandezze:

parametro	valore
W_1	2.827 mm
W_2	2.827 mm
W_3	2.827 mm
W_4	0.100 mm
W_5	2.827 mm
L_1	45.000 mm
L_2	15.770 mm
L_3	21.073 mm
W_linea1	0.800 mm
L_linea1	5.000 mm
W_linea2	2.827 mm
L_linea2	23.515 mm

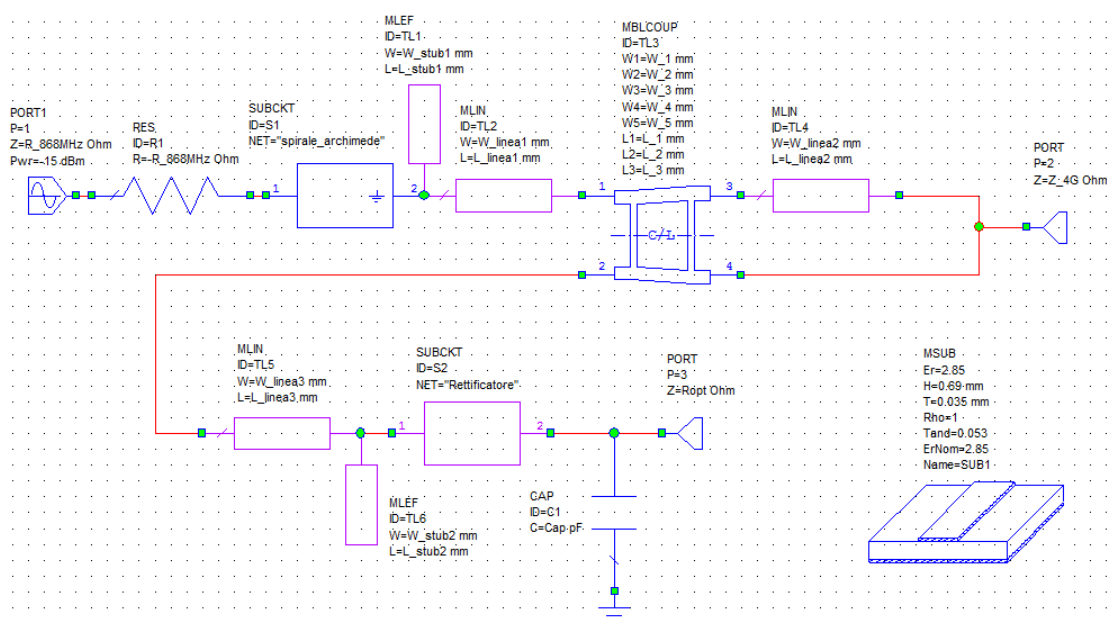


Figura 6.3: Topologia circuitale relativa alla “soluzione 2”

W_linea3	0.100 mm
L_linea3	23.100 mm
W_stub1	0.100 mm
L_stub1	30.559 mm
W_stub2	0.423 mm
L_stub2	8.233 mm
Cap	2528.89 pF
Ropt	5416.45 $\Omega$
R_4G	60.61 $\Omega$

I risultati ottenuti attraverso il circuito appena descritto sono i seguenti:

- $P_{DC} = -20.77 \text{ dBm}$  (potenza in continua alla porta 3);
- $\eta = 26.34\%$  (efficienza di conversione);
- $P_{out_{3.95GHz}} = -13.55 \text{ dBm}$  (potenza a RF alla porta 2).

I valori ricavati in questo caso sono quindi abbastanza simili a quelli relativi alla “soluzione 1”, sebbene leggermente migliori. Una delle maggiori peculiarità di questa seconda soluzione riguarda la lunghezza media delle linee del circuito, si può infatti notare che queste risultano in generale minori a quelle relative alla precedente topologia; ciò deriva direttamente dal fatto che, come già anticipato, in questo caso l'accoppiatore è progettato per funzionare correttamente a 3.95 GHz e l'utilizzo di una frequenza più elevata comporta chiaramente una riduzione della lunghezza delle linee.

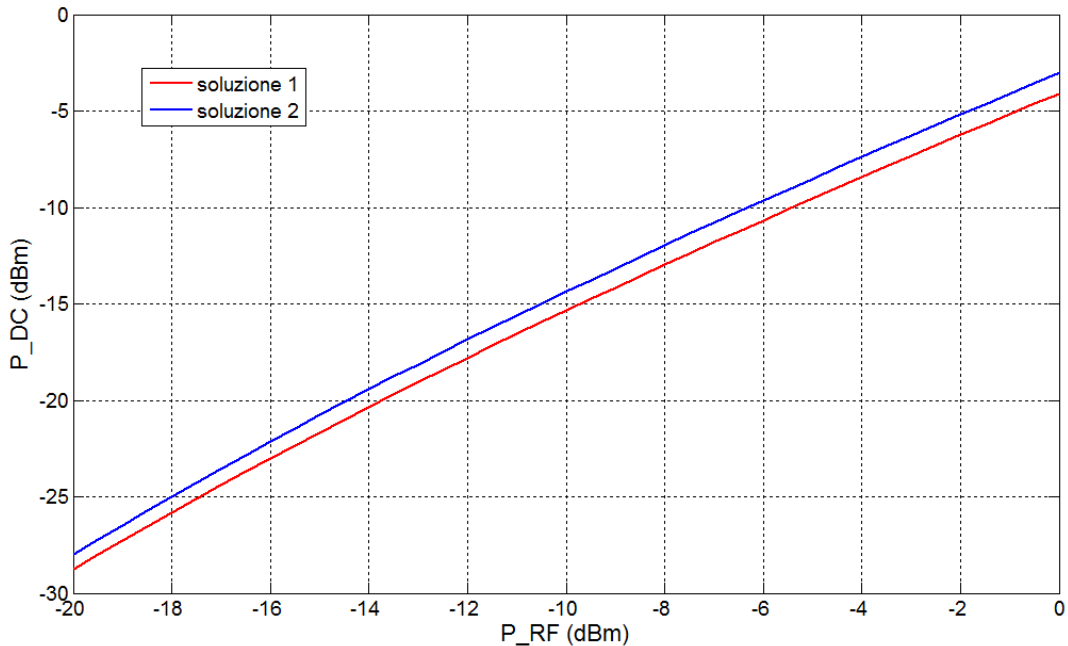


Figura 6.4: Potenza rettificata  $P_{DC}$  al variare della potenza disponibile in ingresso,  $P_{RF}$ , tra -20 e 0 dBm

### 6.2.5 Potenza rettificata per diversi valori in ingresso

I valori assegnati come potenza in ingresso al circuito sono, come già detto, valori tipici e più che plausibili date le potenze utilizzabili e i tipici scenari indoor in cui si pensa di sfruttare il tag. La non linearità del circuito tuttavia rende interessante una valutazione delle prestazioni che possono essere ottenute anche per livelli di potenza in ingresso diversi da quelli finora utilizzati, limitandosi comunque a valori bassi.

A tale scopo è stata condotta una valutazione della potenza rettificata e dell'efficienza di conversione al variare della potenza disponibile in ingresso, per valori di  $P_{RF}$  che vanno da -20 a 0 dBm, mettendo a diretto confronto le prestazioni raggiunte con le due diverse topologie. I risultati ottenuti sono riportati in figura 6.4 e 6.5.

## 6.3 Considerazioni sui risultati ottenuti

I risultati ottenuti hanno mostrato come sia possibile realizzare un circuito che si occupi di rettificare il segnale ricevuto a radiofrequenza, al fine di realizzare energy harvesting a 868 MHz.

Sono state proposte due differenti topologie circuitali; la prima, indicata con “soluzione 1”, utilizza un accoppiatore progettato per funzionare da divisore a 3 dB alla frequenza 868 MHz; la seconda, indicata con “soluzione 2”, utilizza invece un accoppiatore progettato per funzionare correttamente a 3.95 GHz.

I due circuiti danno risultati simili, ma, come già anticipato, il fatto che quello relativo alla “soluzione 2” venga progettato per una frequenza più elevata ha come

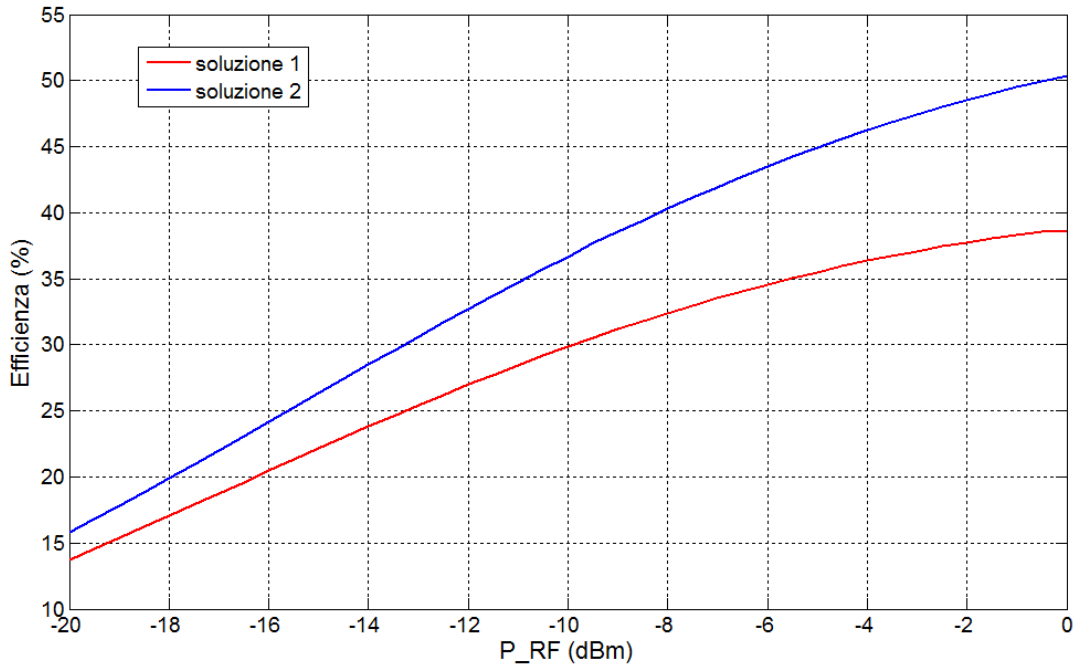


Figura 6.5: Efficienza di conversione al variare della potenza disponibile in ingresso,  $P_{RF}$ , tra -20 e 0 dBm

conseguenza il raggiungimento di dimensioni complessivamente minori. Oltre a ciò questa seconda soluzione offre anche risultati migliori in termini di potenza rettificata ed efficienza di conversione nel funzionamento a 868 MHz e di potenza ceduta alla porta UWB nel funzionamento a 3.95 GHz. Questi due motivi portano quindi alla scelta della topologia indicata con “soluzione 2” come possibile circuito rettificatore da realizzare sul tag.

Come ultima cosa, considerate le osservazioni più volte discusse riguardo alla bontà del substrato di carta, si vuole anche in questo caso avere un’idea più precisa di quanto questa porti ad un peggioramento delle prestazioni.

Eliminando ancora una volta le perdite introdotte da questo materiale, si considerano, imponendo  $\tan \delta = 0$ , i risultati ottenibili dal circuito in questo caso ideale.

### 6.3.1 Soluzione 1 senza perdite

Utilizzando un substrato ideale avente tangente di perdita nulla, la topologia relativa alla “soluzione 1” offre i seguenti risultati:

- $P_{DC} = -19.05 \text{ dBm}$  (potenza in continua alla porta 2);
- $\eta = 39.38\%$  (efficienza di conversione);
- $P_{out_{3.95GHz}} = -10.43 \text{ dBm}$  (potenza a RF alla porta 3).

Di seguito vengono quindi messi a diretto confronto i risultati ottenuti nei due casi:

risultato	con perdite	senza perdite
$P_{DC}$	$-21.67 \text{ dBm}$	$-19.05 \text{ dBm}$
$\eta$	22.15%	39.38%
$P_{out3.95GHz}$	$-14.09 \text{ dBm}$	$-10.43 \text{ dBm}$

La potenza rettificata a 868 MHz risulta quasi duplicata, mentre quella in banda UWB in uscita alla porta 3 è pari a più del doppio del caso con perdite, a dimostrazione che i lunghi tratti di microstriscia su carta sono da evitare, perchè causa di forti perdite.

### 6.3.2 Soluzione 2 senza perdite

Nel caso relativo al circuito della topologia 2, il substrato ideale porta ai risultati seguenti:

- $P_{DC} = -19.56 \text{ dBm}$  (potenza in continua alla porta 2);
- $\eta = 35.18\%$  (efficienza di conversione);
- $P_{out3.95GHz} = -10.44 \text{ dBm}$  (potenza a RF alla porta 3).

Si mettono quindi ancora una volta a confronto questi risultati con quelli precedenti consideranti le perdite della carta:

risultato	con perdite	senza perdite
$P_{DC}$	$-20.77 \text{ dBm}$	$-19.56 \text{ dBm}$
$\eta$	26.34%	35.18%
$P_{out3.95GHz}$	$-13.55 \text{ dBm}$	$-10.44 \text{ dBm}$

In questo caso il divario tra i due risultati è minore rispetto alla topologia relativa alla “soluzione 1”, tuttavia si può ancora notare quanto le perdite introdotte dalla carta risultino fortemente degradanti per le prestazioni del circuito.

Anche in questo caso è stata condotta una valutazione dell’efficienza di conversione raggiungibile al variare della potenza disponibile in ingresso, per valori di  $P_{RF}$  che vanno da -20 a 0 dBm, mettendo ancora una volta a diretto confronto le due diverse topologie. I risultati sono riportati in figura 6.6.

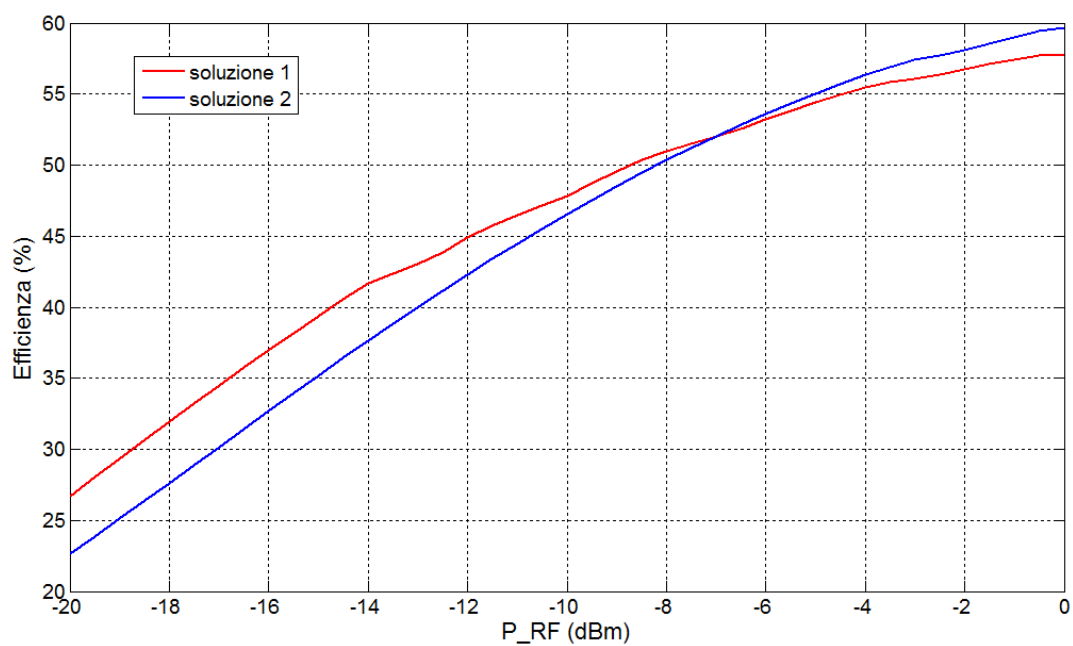


Figura 6.6: Efficienza di conversione in assenza di perdite al variare della potenza disponibile in ingresso,  $P_{RF}$ , tra -20 e 0 dBm

## Capitolo 7

# Conclusioni

Il lavoro svolto ha mostrato la possibilità di realizzare un'antenna per il *green tag* oggetto di studio tale da soddisfare i requisiti ricercati.

L'antenna ricavata ha le seguenti caratteristiche:

- substrato di carta quadrato di lato 55 mm e spessore 0.69 mm;
- buon adattamento su tutta la banda UWB (3.1-4.8 GHz), all'interno della quale viene garantita polarizzazione circolare e efficienza di radiazione pari al 90%;
- risonanza alla frequenza 868 MHz e efficienza di radiazione pari al 63%.

Questa antenna permette quindi la fabbricazione di un tag RFID che operi nella banda UWB desiderata e raggiunga la completa autonomia energetica grazie all'impiego di energy harvesting a 868 MHz, il tutto garantendo la massima eco-compatibilità.

Sono state inoltre svolte le prime indagini riguardo alla realizzazione di un opportuno circuito rettificatore per l'antenna proposta.

I risultati ottenuti hanno messo in mostra come sia possibile raggiungere efficienze di conversione dell'ordine del 20-25% in corrispondenza di valori plausibili di potenza disponibile in ingresso pari a -15 dBm; questo valore è relativamente basso, non solo per il contenuto livello delle potenze utilizzate ma ancor più a causa delle proprietà dielettriche del materiale impiegato. La carta risulta infatti un dielettrico di caratteristiche fortemente degradanti in termini prestazionali: i risultati mostrano che le perdite dovute alla carta comportano da sole un dimezzamento della potenza utilizzata.

Per investigazioni future si propone quindi l'utilizzo di materiali alternativi, che garantiscano prestazioni migliori rimanendo tuttavia in linea con le esigenti richieste in termini di eco-compatibilità.

# Bibliografia

- [1] Y. Mushiake, “Self-complementary antennas”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, pp. 23-29, vol. 34, no. 2, Dec. 1992.
- [2] W. Wiesbeck, G. Adamiuk, C. Sturm, “Basic Properties and Design Principles of UWB Antennas”, *Proceedings of the IEEE*, pp. 372-385, vol. 97, no. 2, Feb. 2009.
- [3] J. O. McSpadden, L. Fan, K. Chang, “Design and experiments of a high conversion efficiency 5.8 rectenna”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2053–2060, Dec. 1998.
- [4] J. O. McSpadden, T. W. Yoo, K. Chang, “Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 40, no. 6, pp. 1259–1266, June 1992.
- [5] J. Zbitou, M. Latrach, S. Toutain, “Hybrid rectenna and monolithic integrated zero-bias microwave rectifier”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, no. 1, pp. 147–152, Jan. 2006.
- [6] J. A. G. Akkermans, M. C. van Beurden, G. J. N. Doodeman, H. Visser, “Analytical models for low-power rectenna design”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, pp. 187–190, 2005.
- [7] M. Ali, G. Yang, R. Dougal, “A new circularly polarized rectenna for wireless power transmission and data communication”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, pp. 205–208, 2005.
- [8] Y. J. Ren, M.-Y. Li, K. Chang, “35 GHz rectifying antenna for wireless power transmission”, *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 11, pp. 602–603, May 2007.
- [9] V. Rizzoli et al., “Integration of numerical and field-theoretical techniques in the design of single and multi-band rectennas for micro-power generation”, *EuMA Int. J. Microwave Wireless Tech.*, 2010.
- [10] A. Costanzo, A. Romani, D. Masotti, N. Arbizzani, V. Rizzoli, “RF/baseband co-design of switching receivers for multiband microwave energy harvesting”, *Sensors and Actuators A: Physical*, June 2012.
- [11] U. Batool, A. Rehman, N. Khalil, M. Islam, M.U. Afzal, T. Tauqeer, “Energy extraction from RF/ Microwave signal”, *Multitopic Conference (INMIC), 2012 15th International*, pp.165-170, Dec. 2012.



- 
- [12] V. Lakafosis et al, "Progress Towards the First Wireless Sensor Networks Consisting of Inkjet-Printed, Paper-Based RFID-Enabled Sensor Tags", *Proc. IEEE*, Sept. 2010.
- [13] ETSI EN 300 440-1 V1.5.1, "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short range devices; Radio equipment to be used in the 1 GHz to 40 GHz frequency range", *European standard (2009-03)*.
- [14] ETSI EN 302 208-1 V1.1.2, "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio Frequency Identification Equipment operating in the band 865 MHz to 868 MHz with power levels up to 2 W", *European standard (2006-03)*.
- [15] S. Qu, C. Ruan, Q. Xue, "A Planar Folded Ultrawideband Antenna With Gap-Loading", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 1, pp. 216-220, January 2007.
- [16] R. L. Li, V. F. Fusco, "Broadband semiloop antenna", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.34, issue 4, pp. 233-234, August 2002.
- [17] C. Ding, C. Ruan, L. Peng, J. Chu, "A Novel Archimedean Spiral Antenna with Uniplanar EBG Substrate", *8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, 2008.
- [18] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, Wiley, 2004.
- [19] S. Gezici et al., "Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks", *IEEE Signal Processing Magazine*, Jul. 2005.
- [20] D. Dardari, R. D'Errico, C. Roblin, A. Sibille, M. Z. Win, "Ultrawide bandwidth RFID: The next generation?", *Proceedings of the IEEE, Special Issue on RFID - A Unique Radio Innovation for the 21st Century.*, Sep 2010.
- [21] V. Heires et al., "UWB Backscattering System for Passive RFID Tag Ranging and Tracking", *International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB2011)*, 2011.
- [22] D. Dardari et al., "Ultra-wide bandwidth backscatter modulation: Processing schemes and performance", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011.
- [23] V. Rizzoli et al., "Investigation of Interactions Between Passive RFID Tags By Means Of Nonlinear/EM Co-Simulation", *Proc. 36th Europ. Microwave Conf.*, Sept. 2006.
- [24] A. Costanzo, R. Weigel, "Energy Challenges in RFIDs and Wireless sensors", *Digest of IEEE EuMC Workshop WFS05*, 2010.
- [25] R. Vyas et al., "Paper-Based RFID-Enabled Wireless Platforms for Sensing Applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2009.

- 
- [26] M. Belleville et al., “Energy Autonomous Sensor Systems: State and Perspectives of a Ubiquitous Sensor Technology”, *Microelectronics Journal*, 2010.
- [27] M.M. Tentzeris, “Novel paper-based inkjet-printed antennas and wireless sensor modules”, *IEEE Int. Conf. Microwaves Communications Antennas Electronic Syst.*, 2008.
- [28] A. Rida et al, “Conductive Inkjet-Printed Antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WSN Applications”, *IEEE Antennas Propag. Magazine*, June 2009.
- [29] F. Alimenti et al., “Crossed dipole frequency doubling RFID TAG based on paper substrate and ink-jet printing technology”, *Int. Microwave Symposium Digest*, May 2010.
- [30] M. Z. Win, D. Dardari, A. F. Molisch, W. Wiesbeck, Z. Jinyun, “History and applications of UWB”, *Proc. of IEEE, Special Issue on UWB Technology & Emerging Applications*, vol. 97, no. 2, pp.198-204, Feb 2009.
- [31] H. J. Visser, R. J. M. Vuller, “Wireless sensors remotely powered by RF energy”, *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, March 2012.



# Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il mio relatore prof. Rizzoli e i miei correlatori prof. Masotti e prof.ssa Costanzo.

Un sentito ringraziamento va in particolare al prof. Masotti, per la sua costante pazienza e disponibilità dimostrata in qualsiasi momento durante tutti questi mesi di lavoro.

Ringrazio la mia famiglia, mia mamma Mariarosa, mio papà Lauro e mia sorella Alessandra per il costante sostegno che hanno sempre offerto, senza chiedere nulla in cambio. Mia nonna Tilde, i miei zii, i miei cugini e i parenti tutti.

Ringrazio inoltre la mia ragazza Jessica, per avermi supportato e sopportato sempre, anche nei momenti più difficili.

Un ringraziamento infine va a tutti i miei amici, i miei colleghi di università e i compagni di tennis per i tanti bei momenti passati insieme.

Grazie!