



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación

Antena compacta para identificación y localización de
abejas reinas desde el exterior de colmenas basada en
RFID en la banda de 868 MHz.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

AUTOR/A: Pérez Beltrán, Laura

Tutor/a: Cabedo Fabrés, Marta

Cotutor/a: Ferrando Bataller, Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

Las abejas son unos insectos protegidos porque corren peligro de extinción. La localización de las abejas reinas en el interior de una colmena, normalmente es realizada por el apicultor de forma manual. Sería de gran ayuda para los apicultores disponer de un sistema de identificación más eficiente y preciso para localizar abejas reinas en las colmenas haciendo uso de la tecnología. Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo el diseño de una microantena que se integrará en un sistema de detección para abejas que emplea tecnología RFID (*Radio Frequency Identification*) operando en la banda de 868 MHz. Los diferentes diseños de microantena se han realizado con el software de simulación electromagnética CST Microwave Studio y se ha optimizado la configuración de la antena hasta obtener una impedancia de entrada adecuada a la impedancia del chip RFID al que la antena irá conectada. Se han explorado diferentes configuraciones y materiales y se han fabricado prototipos consiguiendo un prototipo final con dimensiones de $3,49 \times 3$ mm y $4 \times 3,65$ mm. Empleando un Analizador de Redes Vectorial (VNA) se ha verificado el valor de la impedancia de entrada de la antena. Se ha usado un lector RFID para medir el rango de lectura del sistema dentro y fuera de la colmena, alcanzándose distancias hasta 23 y 17 cm en espacio libre y 45 cm dentro de la colmena.

Resum

Les abelles són uns insectes protegits perquè estan en perill d'extinció. La localització de les abelles reinas a l'interior d'una rusc, normalment es realitza per l'apicultor de forma manual. Seria de gran ajuda per als apicultors disposar d'un sistema d'identificació més eficient i precís per a localitzar abelles reinas en els ruscs fent ús de la tecnologia. Aquest Treball de Fi de Màster té com a objectiu el disseny d'una microantena que s'integrarà en un sistema de detecció per a abelles que emprava tecnologia RFID (Radio Frequency Identification) operant en la banda de 868 MHz. Els diferents dissenys de microantena s'han realitzat amb el programari de simulació electromagnètica CST Microwave Studio i s'ha optimitzat la configuració de l'antena fins a obtenir una impedància d'entrada adequada a la impedància del xip RFID al qual l'antena s'anirà connectada. S'han explorat diferents configuracions i materials i s'han fabricat prototips aconseguint un prototip final amb dimensions de $3,49 \times 3$ mm i $4 \times 3,65$ mm. Emprant un Analitzador de Xarxes Vectorial (VNA) s'ha verificat el valor de la impedància d'entrada de l'antena. S'ha utilitzat un lector RFID per mesurar el rang de lectura del sistema dins i fora del rusc, aconseguint distàncies de fins a 23 i 17 cm en espai lliure i 45 cm dins de la colmena.

Abstract

Bees are protected insects because they are in danger of extinction. The location of queen bees inside a beehive is usually done manually by beekeepers. It would be of great help for beekeepers to have a more efficient and precise identification system to locate queen bees in beehives using technology. The objective of this Master's Thesis is the design of a microantenna that will be integrated into a detection system for bees using RFID (Radio Frequency Identification) technology operating in the 868 MHz band. Different microantenna designs have been carried out using CST Microwave Studio electromagnetic simulation software, and the antenna configuration has been

optimized until obtaining an input impedance suitable for the RFID chip to which the antenna will be connected. Different configurations and materials have been explored, and prototypes have been fabricated, achieving a final prototype with dimensions of 3.49×3 mm and 4×3.65 mm. Using a Vector Network Analyzer (VNA), the input impedance value of the antenna has been verified. An RFID reader has been used to measure the reading range of the system inside and outside the beehive, achieving distances of up to 23 and 17 cm in free space and 45 cm inside the hive.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivos del proyecto	3
1.2. Sistemas RFID	4
1.2.1. Lector del sistema RFID	5
2. Estado del arte	7
2.1. Chips comerciales para UHF RFID	9
2.1.1. Chip comercial LXTBKZMCMG-010 para UHF RFID	9
2.1.2. Chip LXMS21ACMD-220 de Murata para UHF RFID	12
2.1.3. Chip LXMS21ACMF-218 de Murata para UHF RFID	13
3. Primeros diseños de la antena	15
3.1. Diseño inicial con pista de menor longitud	16
3.2. Diseño con <i>meandering</i>	20
3.3. Diseño inicial con pistas paralelas en las dos capas	21
3.4. Diseño fabricable	23
3.5. Diseño de la antena con la incorporación de un componente electrónico, una resistencia.	24
3.6. Fabricación del prototipo	26
4. Diseño con condensador	29
4.1. Diseño con un condensador en paralelo	29
4.2. Diseño para la integración de un condensador en serie	33
4.2.1. Diseño con la incorporación de un condensador en serie.	34
4.2.2. Diseño fabricable óptimo con condensador en serie.	35
5. Integración microantena y microchip	39
5.1. Fabricación primer prototipo con condensador en serie	39
5.2. Pruebas del sistema completo	40
6. Diseño con nuevas características para una fabricación en una empresa externa	43
6.1. Prototipo de diseño para fabricar en una empresa externa con nuevas características, con condensador en serie para los chips Murata 218 y 220	43
6.2. Prototipo de diseño con un nuevo sustrato, la Poliamida	48
6.2.1. Estudio de las diferentes capas del prototipo con Poliamida	50
7. Prototipo de diseño a fabricar utilizando sustrato FR4	53
7.1. Prototipo con un grosor de línea de 0,2 mm	54

7.2. Prototipo con un grosor de línea de 0,12 mm	55
7.3. Prototipos fabricados en una empresa externa	57
7.3.1. Estudio de la cobertura	61
8. Conclusiones y líneas futuras	65
Bibliografía	67

Índice de figuras

1.1. Abeja marcada con gota de pintura en el tórax [3].	1
1.2. Funcionamiento de un sistema RFID pasivo. [8].	4
1.3. Antena Lectora Keonn SP-11 [13].	5
1.4. Lector completo RFID. [12].	5
2.1. Dipolo con brazos plegados para aplicaciones RFID [16].	7
2.2. Antena RFID integrada en un anillo formada por dipolos acoplados [17].	8
2.3. Antena RFID con configuración 3D sobre bloque dieléctrico [19].	8
2.4. Antena de doble banda para aplicaciones de detección en interiores [18].	9
2.5. Chip comercial LXTBKZMCMG-010 de Murata y montaje del mismo sobre el abdomen de una abeja.	10
2.6. Modelo circuital del chip comercial LXTBKZMCMG-010.	10
2.7. Circuito equivalente serie del chip comercial LXTBKZMCMG-010.	11
2.8. Circuito equivalente paralelo del chip comercial LXTBKZMCMG-010.	11
2.9. Capa superior de la antena impresa sobre sustrato microstrip que integra el chip comercial LXTBKZMCMG-010.	11
2.10. Chip comercial LXMS21ACMD-220 de Murata e imagen de los pads metálicos propuestos por el fabricante para conectar el chip a la antena externa.	12
2.11. Antena externa impresa propuesta por el fabricante para operar con el chip comercial LXMS21ACMD-220.	13
2.12. Chip comercial LXMS21ACMF-218 de Murata e imagen de los pads metálicos propuestos por el fabricante para conectar el chip a la antena externa.	14
3.1. Diagrama de bloques con las fases de diseño hasta llegar al prototipo final.	16
3.2. Geometría de la antena por ambos lados propuesta por el APL de la UPV	17
3.3. Vista frontal de la capa superior de la antena impresa propuesta por la UPV.	17
3.4. Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta por la UPV.	18
3.5. Parte real e imaginaria de la antena a la frecuencia 868 MHz.	19
3.6. Geometría de la antena por ambos lados con pistas de menor longitud.	19
3.7. Parte real e imaginaria de la antena a la frecuencia 868 MHz con pistas de menor longitud.	20
3.8. Geometría de la antena por ambos lados con meandering.	20
3.9. Parte real e imaginaria de la antena a la frecuencia 868 MHz con meandering.	21
3.10. Geometría de la antena coincidiendo las pistas por ambos lados.	21
3.11. Vista frontal de la capa superior de la antena impresa.	22
3.12. Parte real e imaginaria de la antena para diferentes valores del grosor a la frecuencia 868 MHz.	22

3.13. Parte real e imaginaria de la antena para el diseño fabricable a la frecuencia 868 MHz.	24
3.14. Geometría de la antena fabricable con resistencia en serie de 10 Ω	25
3.15. Parte real e imaginaria de la antena para el diseño fabricable con una resistencia en serie de 10 Ω a 868 MHz.	25
3.16. Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta con una resistencia añadida.	26
3.17. Primer prototipo fabricado con resistencia en serie.	27
3.18. Punta fabricada para la medida del prototipo y kit de calibración.	27
3.19. Impedancia medida del prototipo.	28
4.1. Geometría de la antena para añadir un condensador en paralelo.	30
4.2. Vista frontal de la capa superior con las dimensiones de la antena impresa para añadir un condensador en paralelo.	30
4.3. Parte real e imaginaria de la antena para la introducción de un condensador en paralelo.	31
4.4. Geometría de la antena con placa adicional para añadir un condensador en paralelo.	31
4.5. Parte real e imaginaria de la antena con placa adicional la introducción de un condensador en paralelo.	32
4.6. Esquemático en CST para obtener el valor del condensador.	32
4.7. Parte real e imaginaria de la antena obtenida con el esquemático de CST con el condensador en paralelo.	33
4.8. Geometría de la antena impresa propuesta para fabricación en el APL de la UPV.	34
4.9. Parte real e imaginaria de la antena para añadir un condensador en serie.	34
4.10. Vista frontal y trasera de la capa superior e inferior con las dimensiones de la antena impresa óptima con el condensador en serie.	35
4.11. Parte real e imaginaria de la antena óptima 1 con un grosor de 3.2 mm.	35
4.12. Geometría final fabricable de la antena óptima.	36
4.13. Estudio paramétrico de las partes reales e imaginarias de la antena final para diferentes longitudes de líneas.	36
4.14. Parte real e imaginaria de la antena final tras el estudio paramétrico.	37
4.15. Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena acoplada.	37
5.1. Capa superior e inferior de la antena fabricada en el APL de la UPV.	39
5.2. Medida de la impedancia de entrada a 868 MHz de la antena fabricada en el APL y punta de contacto con kit de calibración empleada para realizar medida.	40
5.3. Evaluación en el interior de la cámara anecoica de la UPV del comportamiento del primer prototipo de antena desarrollado.	41
5.4. Imágenes del primer prototipo de antena colocado sobre la abeja y pegado al panel de cera con cinta adhesiva.	41
6.1. Geometría de la antena impresa utilizando el chip Murata 218 propuesta para la fabricación en Lab-Circuits.	44
6.2. Impedancia de entrada obtenida con CST para la antena propuesta para la fabricación en Lab-Circuits utilizando el chip Murata 218.	45
6.3. Diagrama de radiación a 868 MHz para la antena propuesta a fabricar en Lab-Circuits utilizando el chip Murata 218.	45
6.4. Geometría de la antena con chip Murata 220 para fabricarla en empresa externa.	46

6.5. Impedancia de entrada obtenida con CST para la antena propuesta para la fabricación en Lab-Circuits utilizando el chip Murata 220	46
6.6. Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta a fabricar en Lab-Circuits utilizando el chip Murata 220.	47
6.7. Estructura de las diferentes capas que forman la nueva geometría de la antena flexible.	49
6.8. Prototipo de antena con las nuevas características para una antena flexible con sustrato Poliamida.	49
6.9. Resultado de impedancia para el diseño flexible con Poliamida.	50
6.10. Impedancia de entrada obtenida con CST para un grosor de Poliamida de 0,05 mm y 0,25 mm.	51
7.1. Estructura de las diferentes capas que forman la antena utilizando el sustrato FR4.	53
7.2. Geometría de la antena para chip Murata 218 con un ancho de pista de 0,2 mm para la fabricación en la empresa Lab-Circuits.	54
7.3. Impedancia de entrada obtenida con CST para un ancho de pista de 0,2 mm y un sustrato FR4.	54
7.4. Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta a fabricar en Lab-Circuits con un ancho de pista de 0,2 mm.	55
7.5. Geometría de la antena con chip Murata 218 para fabricarla en empresa externa con grosor de línea de 0,12 mm.	56
7.6. Valor de impedancia del diseño con líneas de 0.12 mm.	56
7.7. Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta a fabricar en Lab-Circuits con un ancho de pista de 0,12mm.	57
7.8. Prototipos finales de antena fabricados por Lab-Circuits sobre sustrato FR-4 y con protección de las pistas, incluyendo condensadores serie de adaptación y el chip Murata 218.	58
7.9. Integración del diseño de <i>tag</i> definitivo sobre una abeja reina.	58
7.10. Resultados de impedancia con cartas de Smith para los <i>tags</i> grandes con tres valores diferentes de condensador.	59
7.11. Resultados de impedancia con cartas de Smith para los <i>tags</i> pequeños con tres valores diferentes de condensador.	60
7.12. Panel y sus dimensiones y panel con la antena integrada, junto con el lector en el lateral para evaluar el alcance en espacio libre.	61
7.13. Valores de RSSI en función de la distancia, considerando la colmena completa en espacio libre.	62
7.14. Colmena y colocación de la antena compacta dentro de un panel.	62
7.15. Valores RSSI obtenidos en una colmena con antena grande y con la pequeña dependiendo de la distancia.	63

Índice de tablas

2.1. Tabla de cantidades y precios unitarios del chip comercial LXMS21ACMD-220 [22].	13
2.2. Tabla de cantidades y precios unitarios del chip comercial LXMS21ACMF-218 [22].	14
3.1. Tabla con diferentes grosores para el material FR-4 y el valor de impedancia correspondiente.	22
3.2. Tabla comparativa de los valores de impedancia para un diseño con una longitud mayor y una longitud menor con un grosor de 0.3mm.	23
3.3. Tabla de sustratos: sustrato FR-4 utilizado anteriormente y el nuevo sustrato llamado Netlec.	24
3.4. Tabla de las características de la antena a fabricar.	26
4.1. Tabla de características para el diseño con un condensador en paralelo.	29
5.1. Tabla comparativa del valor obtenido de impedancia en simulación y en fabricación.	40
6.1. Tabla de características generales para la fabricación de la antena en el laboratorio APL y en la empresa Lab-Circuits.	43
6.2. Especificaciones de los dos chips utilizados de la serie Murata.	44
6.3. Comparación de los valores de impedancia en simulación con los obtenidos en las medidas reales.	47
7.1. Tabla de valores de impedancia de la antena en simulación con CST y en medida real para ambos tipos de <i>tags</i> , con una variedad de valores de condensadores. . .	60
7.2. Resultados de distancias máximas de lectura para <i>tag</i> grande y pequeño en espacio libre.	62

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, la localización de las abejas reinas ejerce un rol de vital importancia debido al peligro de extinción en el que se encuentran estas. La localización de estos insectos tiene un importante interés ya que es la única hembra fértil de la colonia [1]. Gracias a ellas se incrementa el número de individuos dentro de una colmena y mantienen la cohesión de la colonia. Las abejas ofrecen beneficios a las personas, a las plantas y al planeta. Trasladan el polen de una flor a otra y regeneran la producción de alimentos mediante la polinización [2]. Poseen un impacto positivo en el medio ambiente ya que algunos alimentos dependen de la polinización. Por esta razón, existe la necesidad de protegerlas y una manera para hacerlo es tenerlas localizadas.

Tradicionalmente, la localización e identificación de la abeja reina en una colmena se ha generado manualmente extrayendo panal a panal o colocando una gota de pintura en el abdomen de la reina (ver Figura 1.1), permitiendo al apicultor inspeccionar visualmente la sección hasta hallarla [3] y así poder diferenciarla mejor del resto. Dependiendo del color del tórax, la reina tiene una determinada edad, lo que significa que cada vez que cumpla años tendrá un color u otro. Generalmente, es un proceso complicado y largo ya que una colmena puede tener entre 8 y 20 paneles en la cámara de cría, es decir, una colmena puede contener entre 10.000 y 80.000 abejas.



Figura 1.1: Abeja marcada con gota de pintura en el tórax [3].

Los sistemas de identificación por radiofrecuencia se componen de un *tag* o etiqueta y un lector, empleados para la transmisión inalámbrica de datos. El lector actúa como sistema activo mientras que el *tag* puede ser activo o pasivo. Estos sistemas de Identificación por Radio Frecuencia (RFID) trabajan en diversas bandas de frecuencia. Es necesario que el *tag* tenga unas dimensiones considerablemente reducidas, dado que se colocará sobre el abdomen de la abeja reina, lo que implica limitaciones de tamaño y peso.

La singularidad de este trabajo radica en el desarrollo de una antena personalizada, caracterizada por sus dimensiones mínimas. Estos prototipos de antenas han sido desarrollados mediante el software *CST Studio Suite* y realizado medidas de los prototipos con un Analizador de Redes Vectorial (VNA) para poder comprobar su funcionamiento de manera real. Por consiguiente, resulta fundamental resaltar la importancia de este avance significativo; las reducidas dimensiones y el alcance logrado representan un logro importante y una contribución valiosa al campo de la apicultura y al de la investigación en sistemas RFID.

Este trabajo final de máster se ha llevado a cabo gracias a mi participación en un convenio de prácticas en el *Antennas and Propagation Lab* (APL) del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la *Universitat Politècnica de València*. Este proyecto ha sido financiado por la Comisión Europea y la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través del programa Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER): medida 16,1 del programa de desarrollo rural de la región de Murcia 2014-2020 y por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España en el marco del proyecto PID2022-136869NB-C32. En este proyecto ha participado también la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). Además, he tenido el honor de contribuir significativamente en diversos congresos de renombre internacional. Destaco mi participación como primera autora en varios artículos presentados en congresos destacados, entre los que se incluyen el XXXVIII Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI) [4], en el cual tuve el privilegio de exponerlo, así como el *European Conference on Antennas and Propagation* (EuCAP) [5], donde el *paper* fue aceptado. Además, mi contribución se extiende a otros congresos relevantes, como el *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and ITNC-USNC-URSI Radio* (APS) [6], en el que también figuro como autora en un artículo presentado.

La estructura del consiguiente trabajo se ha dividido en diferentes capítulos para tener una mejor comprensión de los resultados finales obtenidos, siguiendo un proceso de diseño y simulación para poder obtener un buen prototipo final.

En el primer capítulo se aborda la importancia de la identificación de las abejas reinas y del sistema RFID utilizado para el prototipo del proyecto. Se describe el sistema compuesto por un *tag* pasivo y un lector, operando en la banda UHF (*Ultra High Frequencies*) a 868 MHz. Se presentan la motivación y objetivos del trabajo, centrados en la creación de una antena RFID de dimensiones reducidas y fabricable. El objetivo principal es desarrollar una antena compacta que aproveche eficientemente las dos caras de la antena para maximizar la longitud de las pistas.

En el segundo capítulo se habla del estado del arte, una vez introducido el tema a tratar, en cuanto a antenas para aplicaciones RFID en la banda de 868 MHz. Se revisa la literatura existente sobre diferentes diseños de antenas para esta aplicación específica de identificación y localización. Se destaca la necesidad de encontrar chips UHF RFID con dimensiones reducidas para utilizar en el *tag* de la abeja reina, lo que conlleva la realización de un diseño propio de antena. Es importante comprender los diseños ya desarrollados para poder adaptarlos y mejorarlos a nuestras especificaciones. Por lo tanto, se mostrará que tipo de antenas han sido diseñadas para aplicaciones RFID en

UHF.

En los capítulos 3 y 4 se presentan los diseños iniciales de las antenas desarrolladas. En el primero, se plantea el desafío de aumentar la parte real de la impedancia de la antena para igualarla a la del chip. Se observa que al aumentar la parte real, también lo hace la parte imaginaria, lo que genera un problema. En el segundo capítulo, se propone una solución para reducir la parte imaginaria sin afectar a la parte real de la impedancia de la antena. La solución planteada es introducir un condensador con el objetivo de lograr la impedancia compleja conjugada del chip, permitiendo así una máxima transmisión de potencia. Además, este diseño se adapta a las especificaciones necesarias para su posterior fabricación.

En el siguiente capítulo se detalla la fabricación de la antena, incluyendo la integración del microchip y del condensador. Se presentan las medidas obtenidas, donde se observa una desviación con respecto a la simulación. Asimismo, se describen las pruebas realizadas con el sistema completo, es decir, con el lector, para verificar su detección. Se llevaron a cabo lecturas tanto dentro como fuera de la colmena, añadiendo la antena en las abejas para las pruebas correspondientes.

En el capítulo 6 se exploran nuevos diseños con el propósito de facilitar la fabricación en una empresa externa. Se realizan ajustes en diversos parámetros, como anchos de pistas, diámetros de vías y diámetros de corona. Se introduce un nuevo chip de Murata, con diferentes valores de impedancia y sensibilidad de lectura y escritura, para poder realizar comparaciones entre ellos. Se lleva a cabo la fabricación de dos prototipos, observando mejor rendimiento en el nuevo chip. Sin embargo, en las medidas de fabricación sigue habiendo falta de adaptación entre la antena y el chip, lo que causa la realización de un nuevo diseño con un material de sustrato flexible. Se efectúa un estudio exhaustivo de las diferentes capas del nuevo diseño, concluyendo que el grosor del sustrato flexible es demasiado pequeño para obtener buenos resultados.

Finalmente, en el último capítulo, se toma la decisión de realizar nuevos diseños debido a los resultados poco satisfactorios obtenidos con anterioridad. Se emplea un sustrato FR-4 con un nuevo grosor y se utiliza el nuevo chip de Murata. Se diseñan dos variantes diferentes, variando el grosor de la línea para aumentar las opciones de fabricación. Tras obtener un diseño bueno en la simulación, se procede a la fabricación de los prototipos y se realizan mediciones una vez fabricados. Se lleva a cabo un estudio de la cobertura, determinando la distancia máxima de lectura en espacio libre y dentro de la colmena. Además, se investiga el efecto de diferentes posiciones de la antena sobre la abeja. Es importante destacar que, además de lograr la fabricación de los prototipos, uno de los objetivos del proyecto era la presentación del mismo en un artículo para la conferencia nacional URSI, lo cual se realizó. Asimismo, se logró elaborar otros dos artículos para las conferencias internacionales EuCAP y APS.

1.1. Motivación y objetivos del proyecto

La localización de la abeja reina en las colmenas ha adquirido una relevancia considerable debido a su estado crítico de pérdida, lo que implica que existe la necesidad de desarrollar un sistema de identificación que resulte más eficiente y ágil que los métodos visuales convencionales. Ha sido necesario desarrollar una antena con dimensiones reducidas para aplicaciones RFID en la banda de 868 MHz ya que a nivel comercial no existía.

El objetivo de este proyecto es crear una antena RFID de dimensiones reducidas y que sea posible fabricar. Se busca desarrollar una antena compacta, la cual se logra aprovechando las dos caras de

la antena para poder maximizar así la longitud de onda, que permita la integración fácil y efectiva en el entorno de una colmena, con etiquetas que puedan leerse a cierta distancia con un tamaño considerablemente pequeño ya que estas etiquetas deberán colocarse en el tórax de la abeja reina, sustituyendo de esta manera a la gota de pintura. Se pretende lograr un rendimiento óptimo de la antena en términos de alcance de lectura y precisión en la identificación de las abejas reinas.

1.2. Sistemas RFID

Es importante comprender en qué consisten los sistemas RFID para la aplicación de estos. La identificación por radiofrecuencia es una tecnología basada en el uso de ondas de radio con una amplia gama de aplicaciones, como la identificación, el control de accesos, el seguimiento de animales [7]... Esta tecnología es inalámbrica y emplea técnicas RF para extraer información. Un sistema RFID consta de un lector en las proximidades y una etiqueta integrada, también conocida como *tag*. Estas etiquetas RFID pueden ser activas o pasivas. Las activas dependen de una fuente de alimentación como sería una batería, transmiten de manera autónoma. Sin embargo, los dispositivos pasivos no necesitan ninguna batería para su funcionamiento [8], es decir, la etiqueta recibe una señal inalámbrica enviada por el lector para ser activada y esta responde a la misma con información que contiene almacenada en su memoria interna [9]. El lector se comunica con el *tag* y obtiene la información que contenga, es importante que este transmita a la misma frecuencia que el *tag*.

Un sistema de RFID contiene 2 antenas para la conexión entre etiqueta y lector, una antena para cada elemento. En una etiqueta RFID el cometido de la antena es absorber las ondas RF y transmitir la información que se encuentra en el chip del *tag*. A esto se le conoce como acoplamiento [10]. La antena del lector permite leer las ondas radio de los *tags*.

En la Figura 1.2 se puede observar la ejecución de un sistema RFID pasivo.

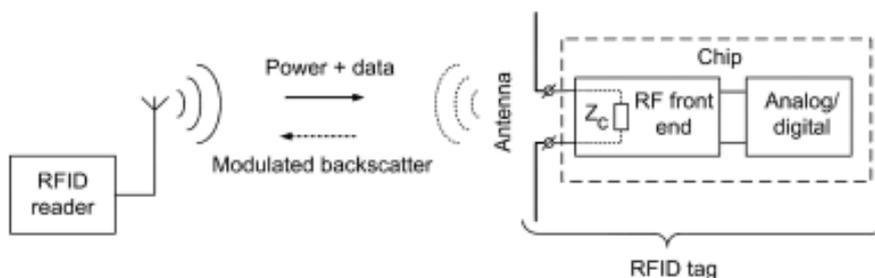


Figura 1.2: Funcionamiento de un sistema RFID pasivo. [8].

Existen diferentes métodos para adaptar la señal entrante de radiofrecuencia de las etiquetas. El objetivo es modificar un parámetro de estas etiquetas, como puede ser la impedancia, y así, de manera inalámbrica, poder detectar ese cambio mediante el lector RFID. Uno de los principales retos que existe en los dispositivos RFID pasivos con chip es que la impedancia de antena RFID coincida con la impedancia del chip [9], es de vital importancia.

Los sistemas RFID tienen asignadas una banda de frecuencia (UHF) dependiendo del país. En el caso de la Unión Europea se usa la banda comprendida entre 866 y 900 MHz, ofreciendo un alcance de 1 m. La aplicación de esta banda de frecuencia es la identificación [11].

1.2.1. Lector del sistema RFID

La parte de lectura en un sistema RFID incluye una antena transmisora que, a través de un componente de control, un microprocesador, emite una señal hacia todas las etiquetas dentro de su alcance. Estas etiquetas, a su vez, envían otra señal que el lector recibe y coordina.

En nuestro caso, el dispositivo lector se compone de un sistema electrónico integrado por una serie de componentes, los cuales son controlados por un microcontrolador ESP32 [12]. El lector es un CAEN Hadron, diseñado para operar en la banda UHF y capaz de alcanzar una potencia máxima de transmisión de 31,5 dBm. Este dispositivo se conecta a una antena lectora modelo Keonn SP-11. Asimismo, el lector está equipado con una pantalla digital que facilita la visualización de información relevante.



Figura 1.3: Antena Lectora Keonn SP-11 [13].

La composición completa del lector se muestra en la Figura 1.4 que ha sido desarrollado en la Universidad Politécnica de Cartagena también como parte del proyecto INN0deAPI.



Figura 1.4: Lector completo RFID. [12].

Capítulo 2

Estado del arte

Los sistemas RFID desde hace años es una tecnología en continua expansión. Gracias a esta tecnología es posible la identificación de un objeto, animal, artículo, ... con un código almacenado en la memoria del circuito integrado conectado a la antena [14]. Para obtener un rango de lectura alta, los principales parámetros que debemos tener en cuenta son: la ganancia de la antena, la eficiencia y una buena adaptación de impedancia de la antena con el chip [15]. Para poder tener la misma impedancia pueden utilizarse elementos agrupados; esto puede producir que el diseño sea de grandes dimensiones. Por lo que, es necesario la exploración de técnicas para poder realizar un diseño lo más compacto posible debido a las dimensiones de la abeja reina, lo que supone todo un desafío.

Tras consultar la bibliografía disponible se ha podido comprobar que la mayoría de los diseños que se emplean habitualmente en los *tags* para aplicaciones RFID en la banda de 868 MHz están basadas en dipolos resonantes de longitud $\lambda/2$ plegados. Esto se debe a la frecuencia de trabajo, pues a 868 MHz, un dipolo resonante presenta una longitud aproximada de 17 cm. Para poder reducir la longitud se opta por doblar los brazos radiantes y de esta manera poder minimizar la longitud total de la antena.

La Figura 2.1 muestra un ejemplo de dipolos resonantes plegados para aplicaciones RFID, presentando una longitud total de $L_s = 14,6$ cm.

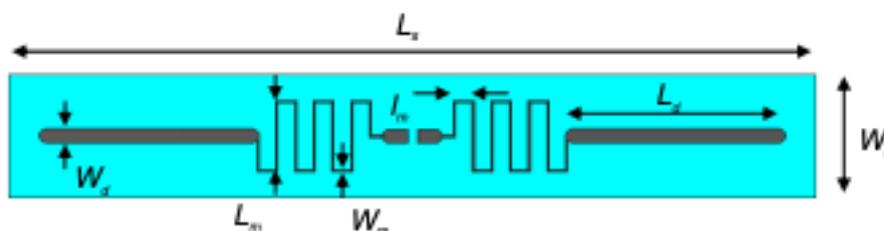


Figura 2.1: Dipolo con brazos plegados para aplicaciones RFID [16].

Como este ejemplo, existen muchos más que se pueden encontrar en diversas bibliografías. El problema es que todos ellos tienen unas dimensiones entre 10 y 15 cm. Debido a su elevado tamaño, se considera la opción de centrarse en otro tipo de diseño que sea viable para el objetivo de este proyecto.

Otra técnica que se utiliza con mayor frecuencia para minimizar el tamaño es la conexión de una

espira rectangular en paralelo con el chip y acoplar electromagnéticamente esta espira a un dipolo resonante con meandros, como se puede observar en la Figura 2.2. Gracias al plegado del dipolo y al acoplamiento inductivo con la espira y al plegado del dipolo

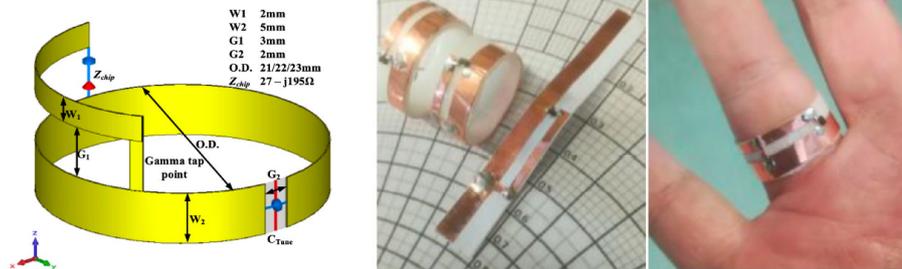


Figura 2.2: Antena RFID integrada en un anillo formada por dipolos acoplados [17].

Podemos comprobar que ninguno de los dos diseños anteriores son lo suficientemente pequeños como para nuestro objetivo; integrar la antena sobre el abdomen de una abeja. Por esta razón, es necesario seguir buscando alternativas como la que se muestra en la Figura 2.3. Se trata de una antena UHF miniaturizada de doble banda diseñada para un sistema de posicionamientos interiores. Trabaja a una banda de 900 MHz y a una segunda banda centrada en 5 GHz [18]. Emplea las dos caras del sustrato sobre el que está fabricada para aprovechar mejor el espacio disponible y así conseguir una solución más compacta, permitiendo una mayor longitud eléctrica en un menor espacio. La antena consta de un pequeño parche semicircular con el que se consigue cubrir la banda alta y dos tiras metálicas en forma de U que recorren las dos caras del sustrato, empleadas para cubrir la banda RFID. Aunque es bastante compacta, no está diseñada para ser conectada directamente con un chip RFID, sino para ser montada sobre una placa de circuito impreso de dimensiones 50×80 mm para proporcionar el comportamiento deseado, por lo que tampoco sería una solución viable.

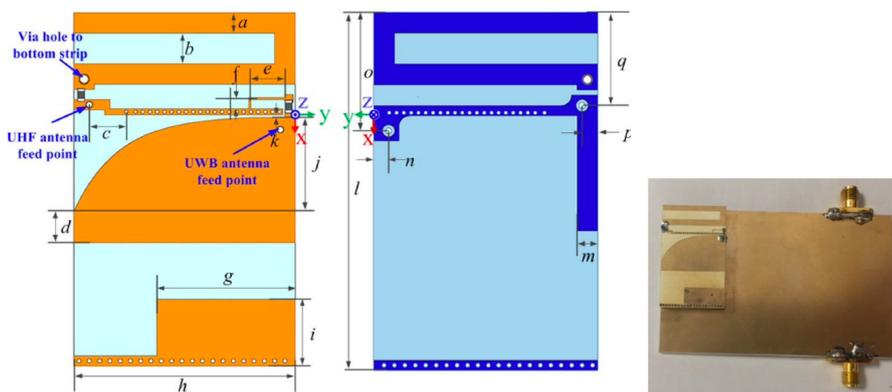


Figura 2.3: Antena RFID con configuración 3D sobre bloque dieléctrico [19].

La antena de la Figura 2.3 emplea las dos caras conductoras de un sustrato para extender las pistas radiantes de la antena y así conseguir un diseño más compacto. De forma similar la antena de la Figura 2.4, recientemente publicada en [19], aprovecha el volumen completo del sustrato dieléctrico para extender sus pistas conductoras en una configuración 3D. El sustrato dieléctrico de permitividad 5,3 ha sido fabricado mediante impresión 3D y las pistas de la antena están dispuestas de forma

que los campos que emiten no se cancelan entre ellos. Las dimensiones de la antena son $2d = 18$ mm, $2h = 10$ mm y $2l = 20$ mm y está preparada para ser integrada con un chip RFID comercial.

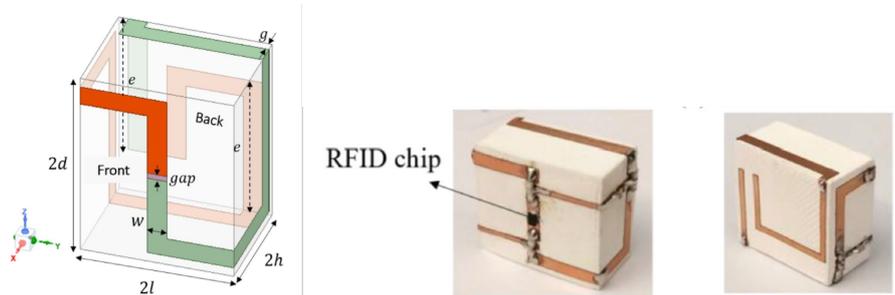


Figura 2.4: Antena de doble banda para aplicaciones de detección en interiores [18].

2.1. Chips comerciales para UHF RFID

En primer lugar, en el proyecto, se valoró la posibilidad de comprar un chip que ya incluyera una antena como el que se explica a continuación.

2.1.1. Chip comercial LXTBKZMCMG-010 para UHF RFID

En la Figura 2.5 se muestra un *tag* comercial LXTBKZMCMG-010 de Murata [20] para UHF RFID y su posible montaje sobre una abeja reina. Este chip comercial de Murata es el más pequeño encontrado en la bibliografía, el cual ya incluye una antena y, por tanto, no es necesario la realización del diseño de esta.

El chip comercial LXTBKZMCMG-010 de Murata analizado presenta las siguientes características:

- Diseño compacto.
- Operación en la banda UHF (865-928 MHz).
- Conforme con el estándar ISO18000-63 / EPC Global Gen2(v2).
- Tamaño $6 \times 2 \times 2,3$ mm.
- Empleo del microchip *Impinj MonzaR6P*.
- Rango de lectura de hasta 150 cm sobre metal (4WEIRP) [20].
- Conforme con RoHS.

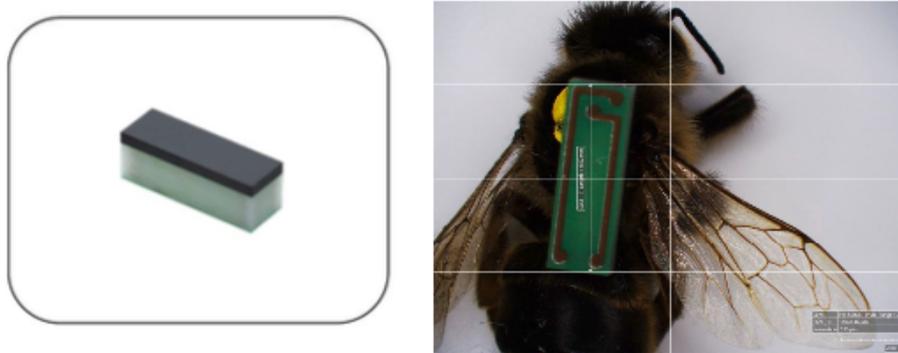


Figura 2.5: Chip comercial LXTBKZMCMG-010 de Murata y montaje del mismo sobre el abdomen de una abeja.

En la Figura 2.6 se muestra el modelo circuital del chip comercial, que incluye una resistencia en paralelo ($RR_{pp} = 1,2kkkkk$) y dos condensadores uno interno del chip ($CC_{pp} = 1,23ppppp$) y otro externo de montaje superficial $CC_{mm} = 0,21ppppp$). La Figura 2.7 muestra el circuito equivalente serie del chip con los valores de sus componentes y la Figura 2.8 el circuito equivalente paralelo del chip que presenta los siguientes valores:

- $RR_{ss} = 13,36$
- $CC_{ss} = 1,456ppppp$
- $ZZ = 13,36 - jj125,9$

El chip presenta a 868 MHz una impedancia compleja de valor real 13,36 Ω y una parte imaginaria capacitiva de $-j125,9 \Omega$. Si queremos que entre el chip y la antena del tag se produzca máxima transferencia de potencia, necesitaremos que la antena presente una impedancia compleja conjugada de valor $13,36 + j125,9 \Omega$.

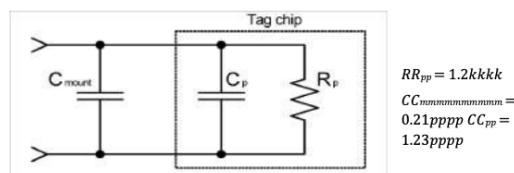


Figura 2.6: Modelo circuital del chip comercial LXTBKZMCMG-010.

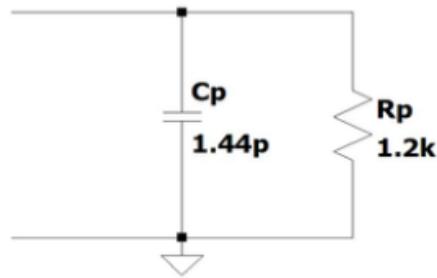


Figura 2.7: Circuito equivalente serie del chip comercial LXTBKZMCMG-010.

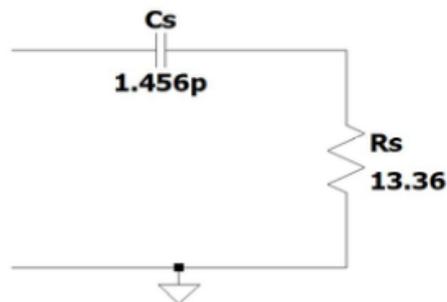


Figura 2.8: Circuito equivalente paralelo del chip comercial LXTBKZMCMG-010.

La Figura 2.9 muestra la antena que integra este chip. Se trata de una antena formada por pistas sobre un sustrato microstrip. Las pistas visibles en la capa superior del sustrato microstrip se conectan a través de vías verticales con otras pistas en la capa inferior, en la que se encuentra ubicado el chip y un condensador de adaptación.

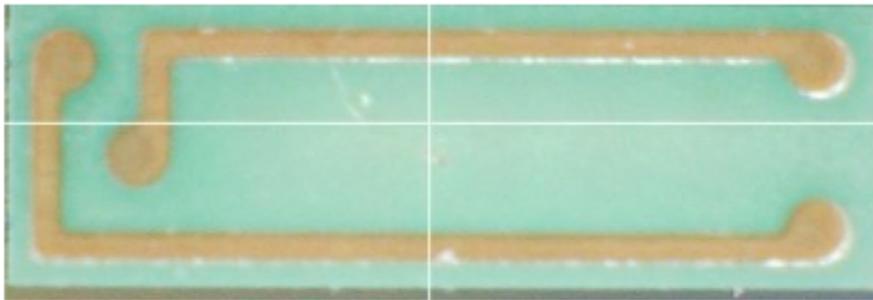


Figura 2.9: Capa superior de la antena impresa sobre sustrato microstrip que integra el chip comercial LXTBKZMCMG-010.

El chip incluye una antena impresa y a pesar de su reducido tamaño, se puede comprobar en la Figura 2.5 que es demasiado grande para ser colocado en el abdomen de la abeja.

No existe ningún chip comercial que incluya una antena lo suficientemente pequeño para nuestra aplicación, por este motivo, es necesario realizar un diseño propio y encontrar un chip lo suficientemente pequeño para poder integrar la antena diseñada con el chip elegido en un *tag* RFID que

colocado sobre una abeja reina permitirá determinar su ubicación dentro de la colmena.

2.1.2. Chip LXMS21ACMD-220 de Murata para UHF RFID

Existen otros tipos de chips para UHF RFID como el chip LXMS21ACMD-220 de Murata [21] el cual presenta una sensibilidad y unas dimensiones adecuadas para ser empleado en el tag que se ubicará sobre la abeja reina. En la Figura 2.10 se muestra una imagen de este chip, que no incluye antena y de los pads metálicos propuestos por el fabricante para conectar el chip con la antena.

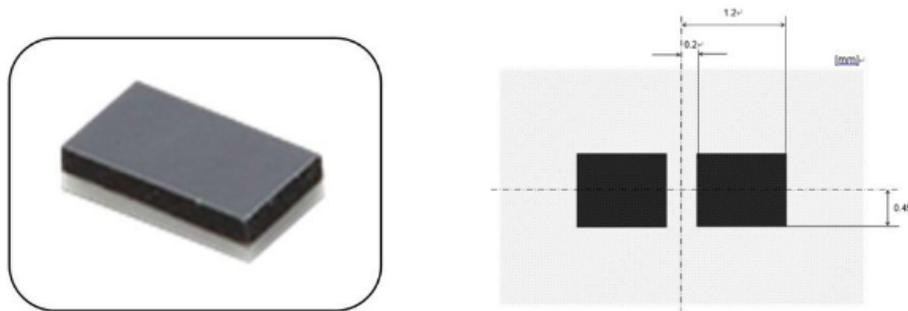


Figura 2.10: Chip comercial LXMS21ACMD-220 de Murata e imagen de los pads metálicos propuestos por el fabricante para conectar el chip a la antena externa.

El chip presenta un equivalente circuital formado por una resistencia $R_s = 16,17 \Omega$ y un condensador $C_s = 1,08 pF$, lo que equivale a una impedancia de entrada de valor $Z_s = 16,17 - j169,8 \Omega$.

El fabricante del chip propone en su catálogo diferentes tipologías de antenas que pueden trabajar con el chip. Para garantizar máxima transferencia de potencia entre el chip y la antena, esta última deberá presentar una impedancia de entrada que sea la compleja conjugada de la impedancia del chip. En la Figura 2.11 muestra una de las antenas propuesta por el fabricante, que se puede comprobar que es una antena que presenta elevadas dimensiones y combinándola con el chip alcanza distancias de lectura de hasta 7 m.

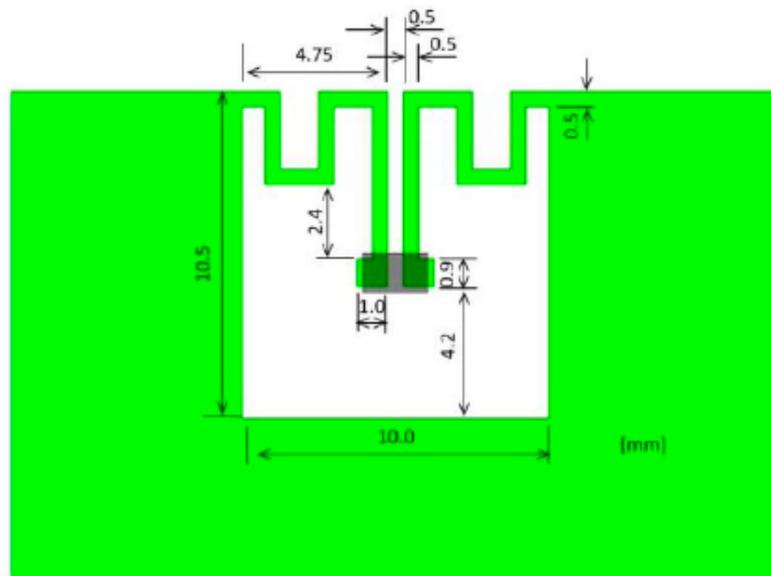


Figura 2.11: Antena externa impresa propuesta por el fabricante para operar con el chip comercial LXMS21ACMD-220.

En la Tabla 2.1 se muestra el coste del chip:

Cantidad	1	10	100	500	1000	2500	5000	10000	25000
Precio unitario (€)	0,7	0,562	0,432	0,381	0,310	0,294	0,272	0,255	0,252

Tabla 2.1: Tabla de cantidades y precios unitarios del chip comercial LXMS21ACMD-220 [22].

Como se ha comprobado, cuando se incrementa el número de chips que se quieren comprar el precio de este disminuye, es decir, cuando la compra es masiva sale más económico el precio/unidad.

2.1.3. Chip LXMS21ACMF-218 de Murata para UHF RFID

Otro tipo de chip comercial para UHF RFID que existe es el chip LXMS21ACMF-218 de Murata [23] que cuenta también con una sensibilidad y unas dimensiones adecuadas como el chip comercial LXMS21ACMD-220. En la Figura 2.12 se puede observar una imagen del chip 218, el cual no lleva incorporado la antena y, también, los pads metálicos propuestos por su fabricante.

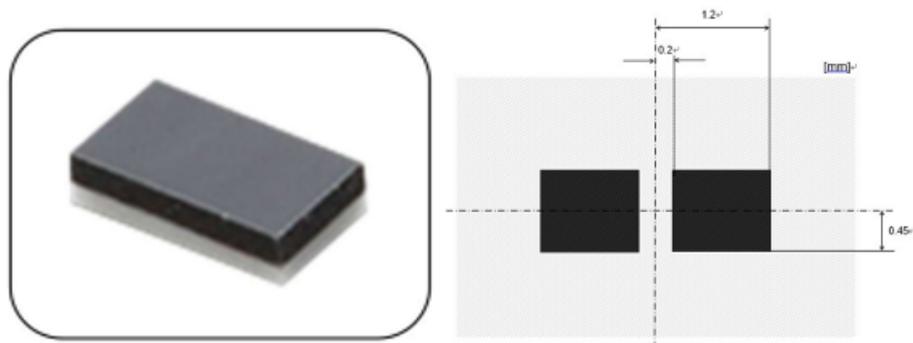


Figura 2.12: Chip comercial LXMS21ACMF-218 de Murata e imagen de los pads metálicos propuestos por el fabricante para conectar el chip a la antena externa.

Este chip presenta una impedancia $R_s = 12,8 + j119 \Omega$. Para que exista una máxima transferencia de potencia entre el chip y la antena, sucede lo mismo que en el caso anterior, la antena deberá presentar una impedancia de entrada que sea la conjugada de la impedancia del chip. El fabricante propone un tipo de antena pero que tiene grandes dimensiones.

En la Tabla 2.2 se especifica los precios por unidad del chip.

Cantidad	1	10	100	500	1000	2500	5000
Precio unitario (€)	0,56	0,485	0,372	0,294	0,235	0,221	0,189

Tabla 2.2: Tabla de cantidades y precios unitarios del chip comercial LXMS21ACMF-218 [22].

Tras revisar exhaustivamente las publicaciones más recientes sobre soluciones compactas de antenas para aplicaciones RFID a 868 MHz, se concluye que la técnica más prometedora es aprovechar todas las caras de un sustrato. Sin embargo, ninguna de las antenas comerciales cumple con las especificaciones necesarias para nuestro objetivo. Por lo tanto, se ha optado por desarrollar nuestra propia antena RFID. Esta decisión se basa en la falta de chips que incluyan una antena lo suficientemente pequeña para nuestras necesidades, lo que ha llevado a investigar y adquirir chips comerciales para evaluar su comportamiento.

Capítulo 3

Primeros diseños de la antena

Como se ha comentado anteriormente, nuestro objetivo es diseñar una antena externa que se integrará con el chip elegido en *tag* RFID que colocado sobre una abeja reina permitirá determinar su ubicación dentro de una colmena. Comercialmente existen *tags* RFID de reducido tamaño, como es el chip comercial LXMS21ACMD-220 de Murata y el que será utilizado en este trabajo para operar con la antena externa.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques en la Figura 3.1 donde se muestran los pasos a seguir hasta llegar al diseño final.

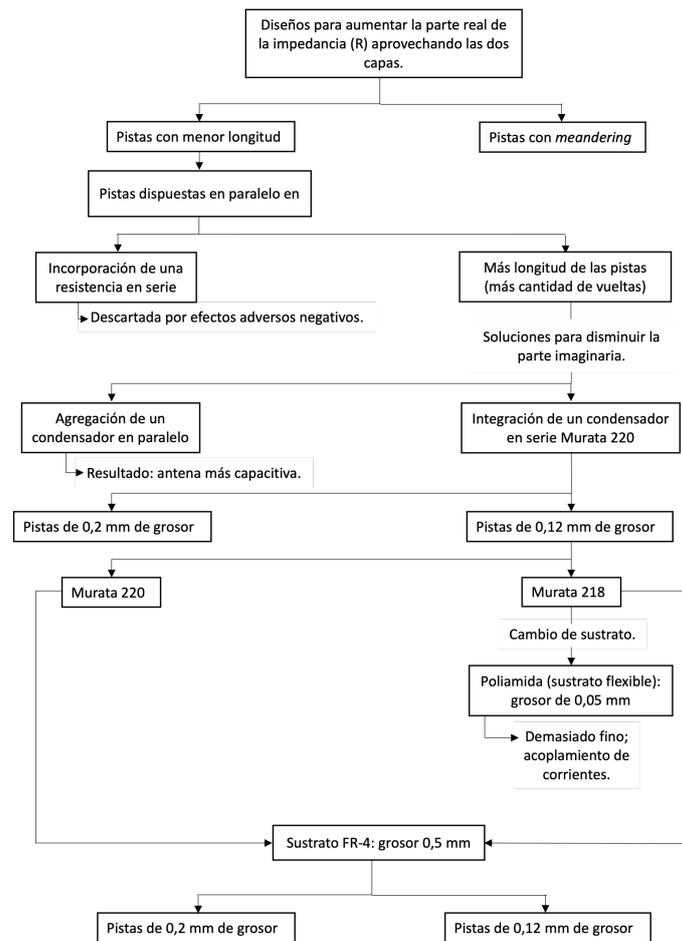
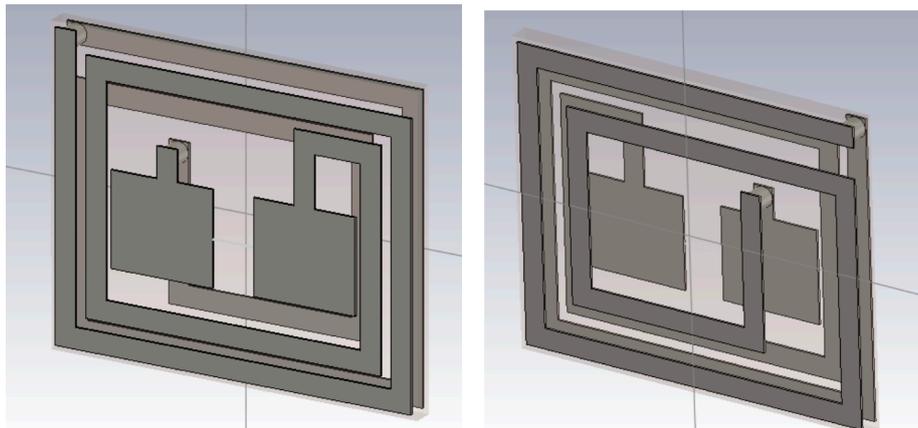


Figura 3.1: Diagrama de bloques con las fases de diseño hasta llegar al prototipo final.

3.1. Diseño inicial con pista de menor longitud

La Figura 3.2 muestra la geometría de la antena propuesta por el APL para operar como antena externa al chip LXMS21ACMD-220. Esta antena opera como una espira de dos vueltas distribuidas en dos capas y esta implementada sobre un sustrato FR-4 de grosor 0,2 mm. Las pistas metálicas de la capa superior, en la que se encuentran los pads sobre los que se soldará el chip, se conectan con las pistas de la capa inferior a través de vías verticales. En la Figura 3.3 se puede ver una vista frontal de la capa superior de la antena, junto con las dimensiones del sustrato empleado (3,6 mm × 3 mm) y de los pads de conexión del chip (1 mm × 0,9 mm).



(a) Vista frontal de la antena propuesta inicialmente por la UPV. (b) Vista trasera de la antena propuesta inicialmente por la UPV.

Figura 3.2: Geometría de la antena por ambos lados propuesta por el APL de la UPV

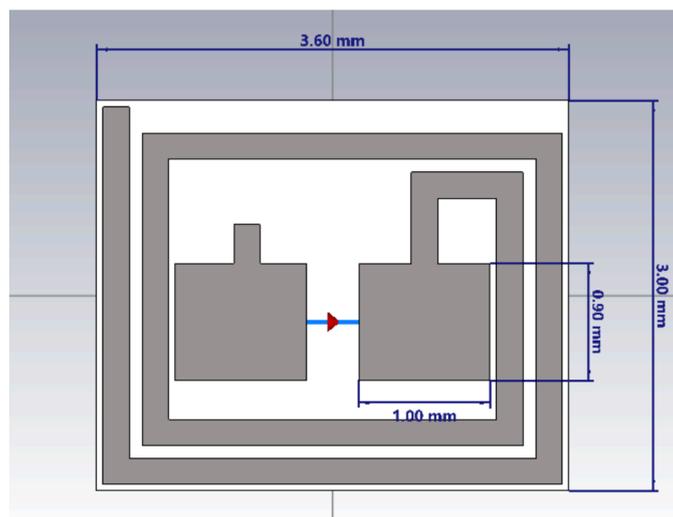


Figura 3.3: Vista frontal de la capa superior de la antena impresa propuesta por la UPV.

La Figura 3.4 muestra el diagrama de radiación de la antena a 868 MHz, que es omnidireccional en el plano XY y presenta un nulo a lo largo del eje Z (eje perpendicular a las caras superior e inferior de la antena).

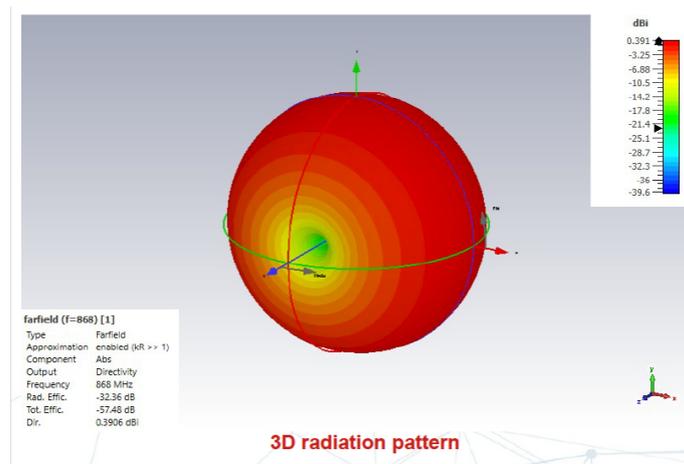


Figura 3.4: Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta por la UPV.

Para que exista una buena adaptación entre el chip y la antena, la impedancia debe estar acoplada, por tanto, se debe conseguir una impedancia de $Z_a = 16,17 + j169,8 \Omega$. En la Figura 3.5 se muestra la impedancia de entrada obtenida con el simulador CST para la antena propuesta. Como se puede comprobar a 868 MHz la antena presenta una parte real de $15,55 \Omega$, que está muy próxima a valor deseado. Sin embargo, la parte imaginaria de la impedancia a 868 MHz es de $519,22 \Omega$, valor que está bastante por encima de los $169,8 \Omega$ buscados. Esto es debido a que la antena en su conjunto es demasiado larga.

Se ha reducido ligeramente su longitud total para desplazar su curva de impedancia hacia la derecha y lograr a 868 MHz valores de reactancia menores. El problema es que una reactancia menor lleva pareja una resistencia de entrada también menor y por tanto, más alejada de los $16,17 \Omega$ deseados. Es decir, reduciendo la longitud total de la antena se reduce la parte imaginaria de su impedancia pero, al mismo tiempo, también su parte real, por lo que se arregla una de las dos componentes, pero se empeora la otra.

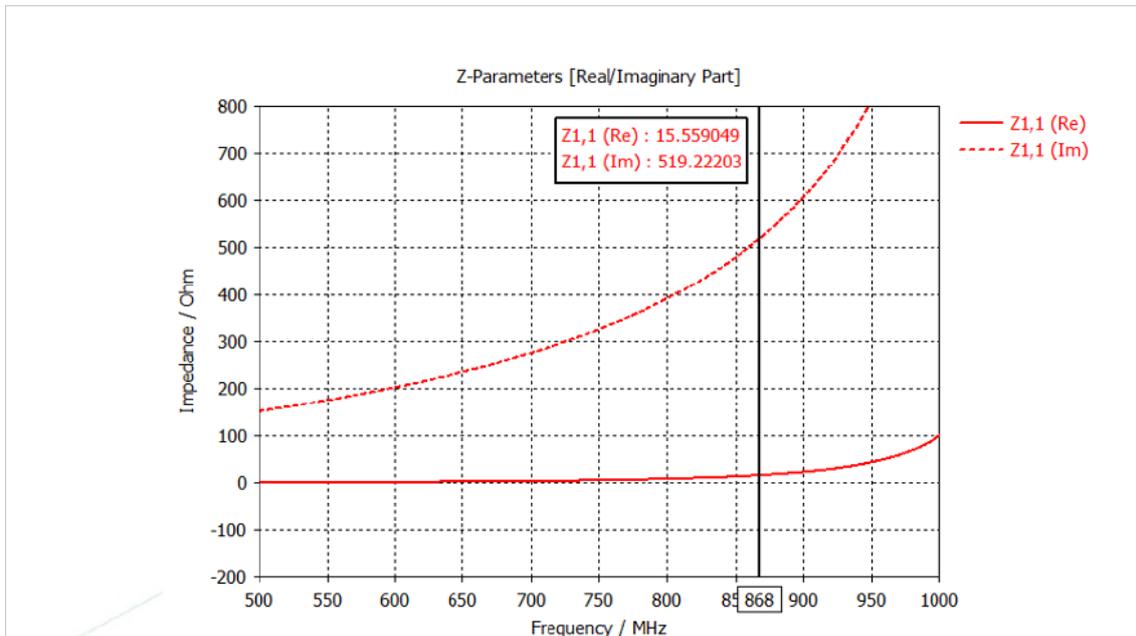


Figura 3.5: Parte real e imaginaria de la antena a la frecuencia 868 MHz.

A la hora de fabricar, uno de los principales problemas del diseño de la antena de Figura 3.2 son las dimensiones de esta, no era un diseño realista; algunas pistas se encontraban demasiado juntas y las vías no eran realizables. Además, el sustrato utilizado no era posible obtenerlo para la fabricación. Se adaptó el diseño realizado en CST para que fuese posible realizarlo de manera real. Para ello se aumentó el grosor del sustrato FR-4 (permitividad: 4,3) a 0,5 mm, se redujo la longitud de la capa superior para disminuir la parte imaginaria de la impedancia y se trabajó con vías y anchuras de pistas realizables. También se añadió coronas a las vías que conectan la capa inferior y la capa superior para realizar la espira en bucle. Estos cambios se pueden observar en la Figura 3.6.

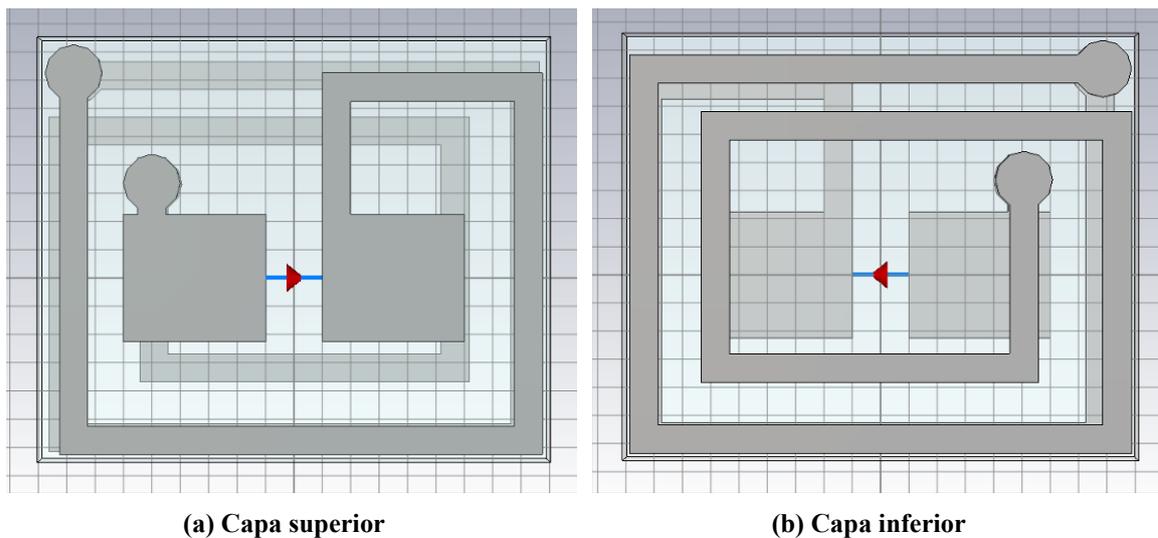


Figura 3.6: Geometría de la antena por ambos lados con pistas de menor longitud.

Al reducir la longitud de la antena, se obtiene un valor de impedancia de: $Z_a = 0,16 + j49,712 \Omega$ tal y como se muestra en la Figura 3.7. Se ha reducido demasiado la longitud de las pistas y ahora tanto la parte real como la imaginaria son demasiado bajas.

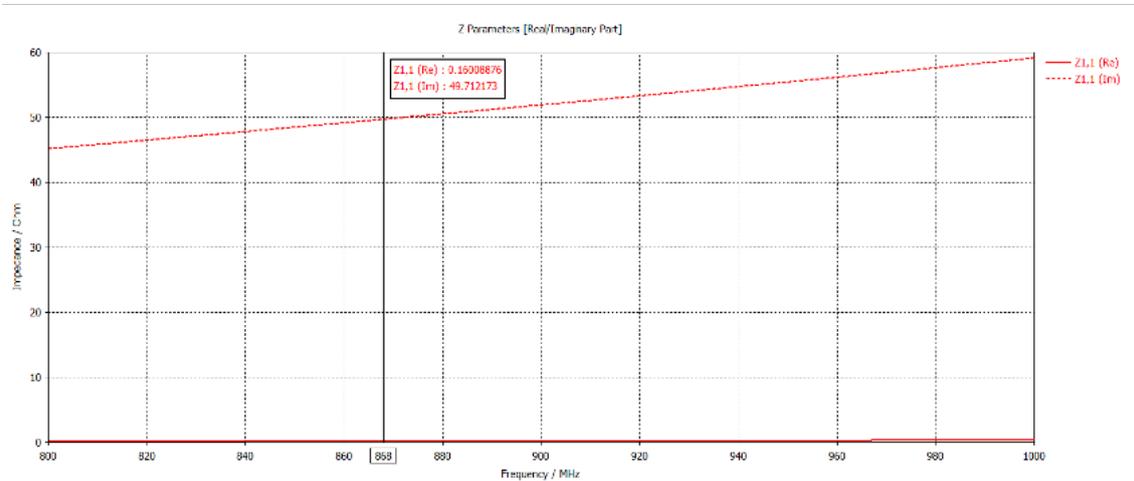


Figura 3.7: Parte real e imaginaria de la antena a la frecuencia 868 MHz con pistas de menor longitud.

3.2. Diseño con *meandering*

Como se ha observado, uno de los límites es el aumento de la parte real de la impedancia. Para poder lograr esto es necesario aumentar la longitud de onda, es decir, aumenta la longitud de las pistas y así poder obtener un valor real más elevado. Por este motivo se decidió alargar la pista de la capa superior y la capa inferior mediante una estrategia de plegado de las pistas llamado *meandering* (ver Figura 3.8) siendo el área total ocupada la misma y con las mismas características del sustrato.

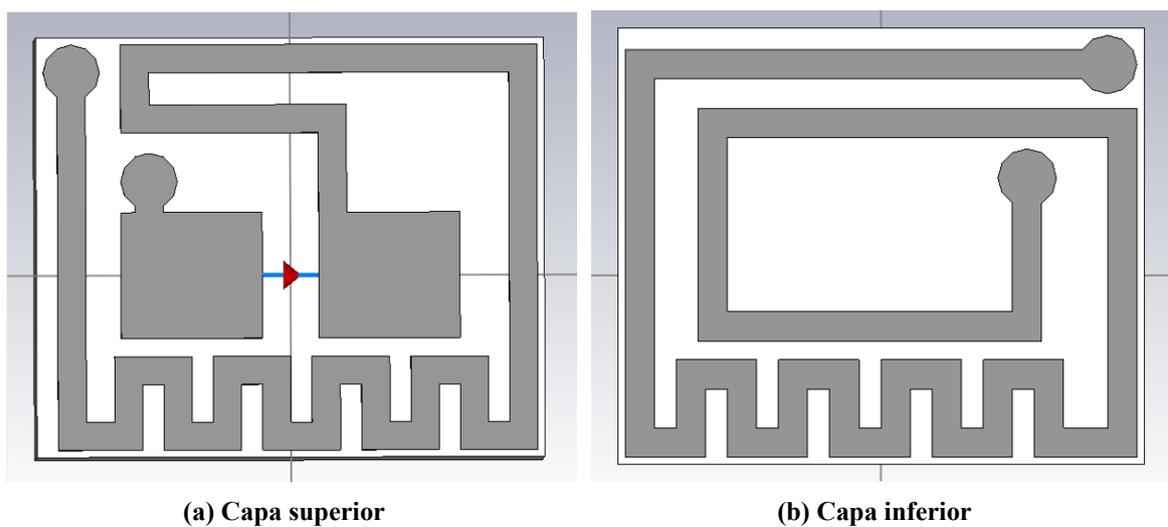


Figura 3.8: Geometría de la antena por ambos lados con meandering.

En la Figura 3.9 se ilustra este efecto al utilizar la estrategia anterior (*meandering*) en las dos capas. En este caso el valor de la impedancia es: $Z_a = 1,03 + j172,82 \Omega$, la impedancia de entrada del chip es: $Z_s = 16,7 - j169,8 \Omega$. Se aproxima muy bien la parte imaginaria pero la parte real sigue siendo muy baja, esto es causado por la aproximación que existe entre las líneas ya que se produce acoplamiento de corrientes y no hace posible el aumento de la parte real de impedancia.

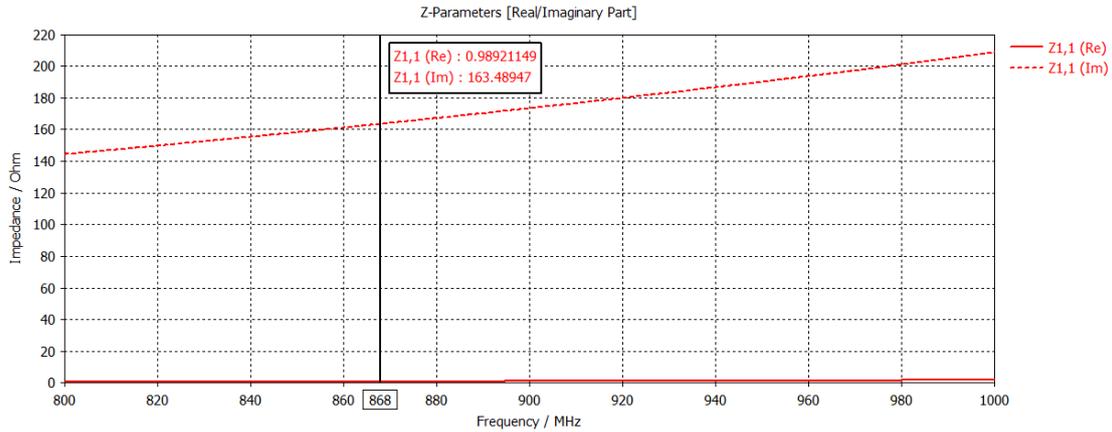


Figura 3.9: Parte real e imaginaria de la antena a la frecuencia 868 MHz con meandering.

3.3. Diseño inicial con pistas paralelas en las dos capas

Como no se conseguía aumentar la parte real de la impedancia de la antena se decidió volver al diseño inicial Figura 3.2 haciendo coincidir las pistas en las dos capas para aumentar la parte real de la impedancia (ver Figura 3.10). También se aumentó la separación entre pistas para hacer posible la fabricación y se redujo el tamaño de los pads, siendo este el mínimo necesario para el chip. El área ocupada se aumentó para aumentar la longitud de la antena (ver Figura 3.11).

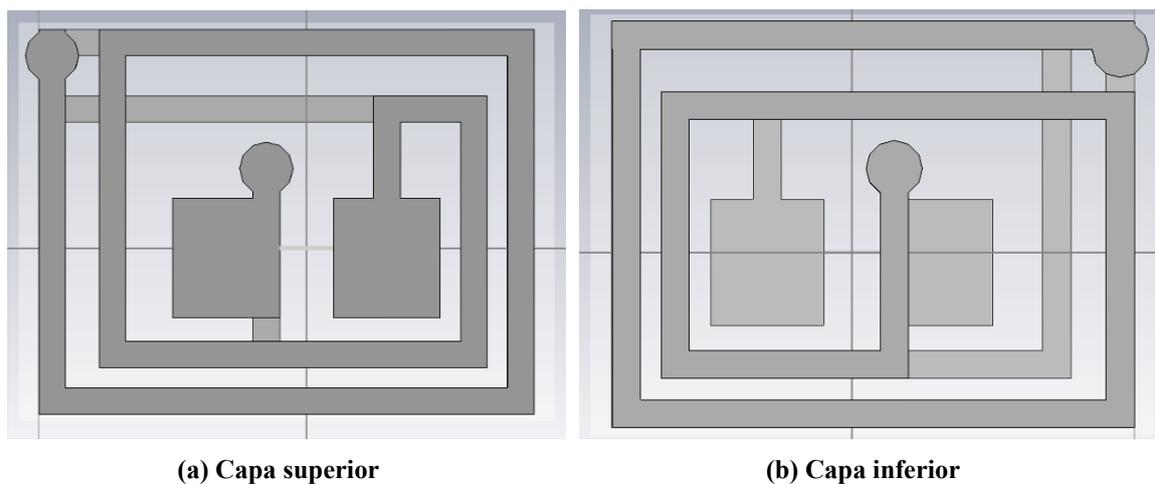


Figura 3.10: Geometría de la antena coincidiendo las pistas por ambos lados.

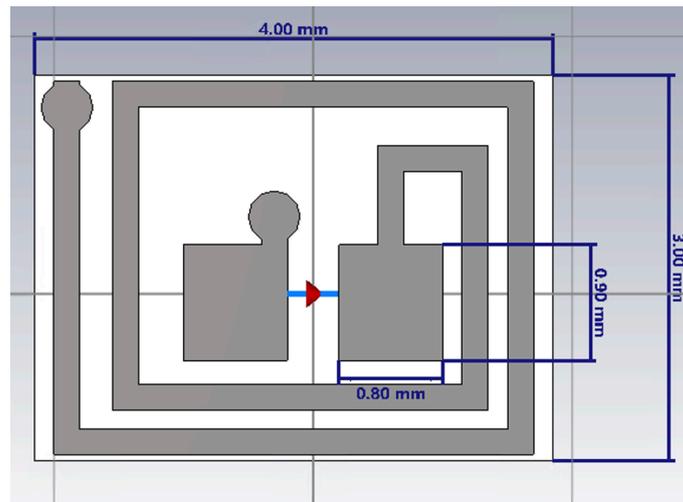


Figura 3.11: Vista frontal de la capa superior de la antena impresa.

Se realizó un estudio de la variación del grosor del sustrato (ver Tabla 3.1) (FR-4: $\epsilon_r = 4,3$) para analizar el efecto que este tenía sobre el valor de la impedancia. Esta variación del grosor se realizó sobre el diseño de la Figura 3.10.

Grosos en mm	Valor de impedancia en Ω
0,2	$Z_a = 29,95 + j701,14$
0,25	$Z_a = 15,73 + j543,72$
0,3	$Z_a = 10,63 + j468,80$

Tabla 3.1: Tabla con diferentes grosos para el material FR-4 y el valor de impedancia correspondiente.

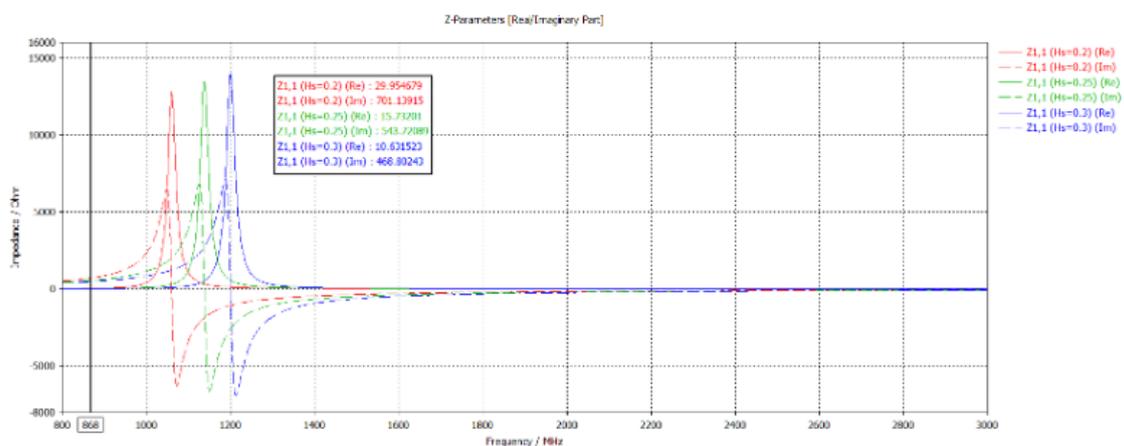


Figura 3.12: Parte real e imaginaria de la antena para diferentes valores del grosor a la frecuencia 868 MHz.

Los valores de la impedancia en relación con el grosor utilizado del sustrato en el diseño se representan en la Figura 3.12. Se obtienen valores más bajos de impedancia tanto en la parte real como en la imaginaria a medida que se aumenta el grosor. Esto se debe a que hay un menor efecto capacitivo.

Finalmente, se decidió optar por la antena de mayor grosor (0,3 mm), ya que la parte real no se alejaba mucho de la deseada y el valor de la parte imaginaria era el más pequeño, acercándose más al valor del chip.

Una vez realizado el análisis, y habiendo seleccionado un grosor de 0,3 mm para el diseño, se llevaron a cabo diversas evaluaciones con la longitud de las líneas con el fin de ajustar el valor de la impedancia de la antena al valor deseado del chip. Con el fin de lograr este objetivo, se decidió reducir ligeramente la longitud de la pista superior para disminuir la parte imaginaria de la impedancia de entrada. Asimismo, para aumentar la parte real de la impedancia, se optó por elevar ligeramente la longitud de la pista superior. Este estudio puede verse en la siguiente tabla:

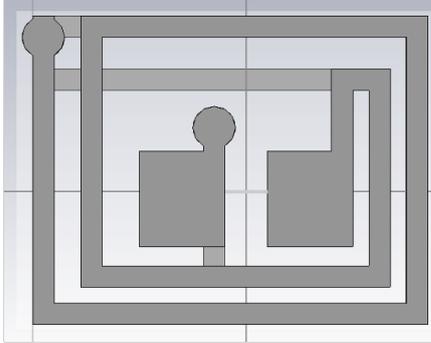
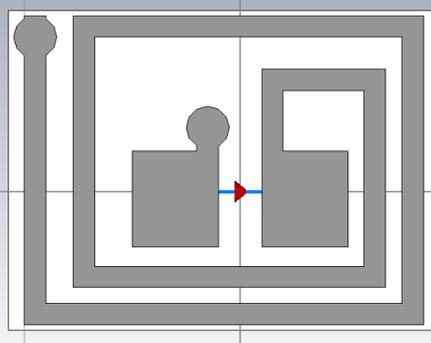
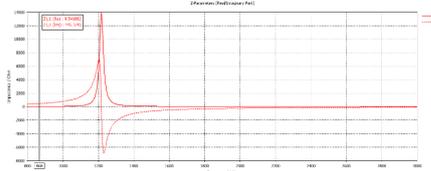
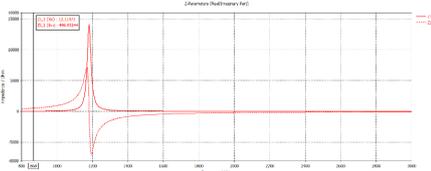
	Menor longitud	Mayor longitud
Diseños		
Valor de impedancia	$Z_a = 9,54 + j445,57 \Omega$ 	$Z_a = 12,11 + j496,93 \Omega$ 

Tabla 3.2: Tabla comparativa de los valores de impedancia para un diseño con una longitud mayor y una longitud menor con un grosor de 0.3mm.

3.4. Diseño fabricable

Se decidió fabricar el diseño de la Figura 3.10 pero cambiando el sustrato por uno de menor permitividad y un grosor de 0,25 mm ya que el anterior sustrato no se encontraba en el laboratorio. Este sustrato es el Netlec con una permitividad de 2,2 (ver Tabla 3.3).

Sustratos	Permitividad (ϵ)	Grosos en mm
FR-4	4,3	0,3
Netlec	2,2	0,25

Tabla 3.3: Tabla de sustratos: sustrato FR-4 utilizado anteriormente y el nuevo sustrato llamado Netlec.

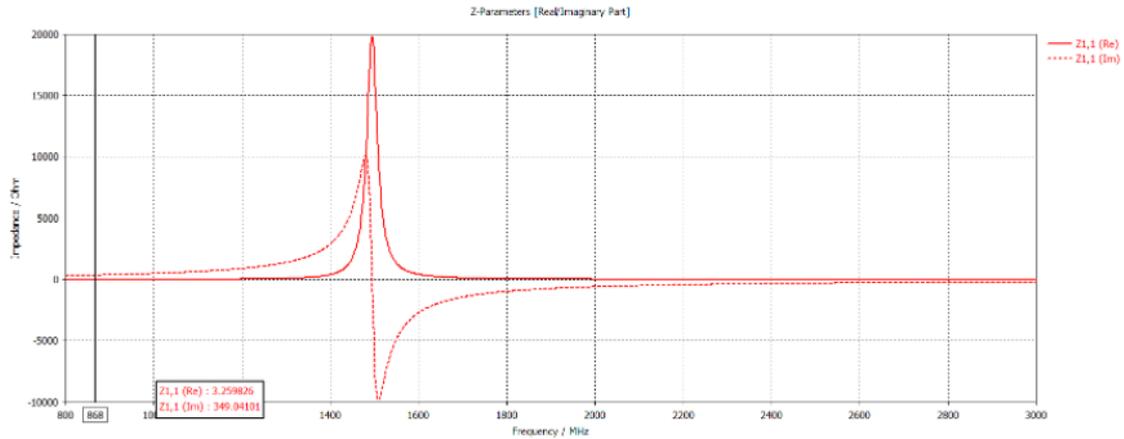


Figura 3.13: Parte real e imaginaria de la antena para el diseño fabricable a la frecuencia 868 MHz.

En la Figura 3.13 se observa que la parte real de la impedancia de entrada es muy pequeña, siendo la impedancia: $Z_a = 3,25 + j349,04 \Omega$. Por lo tanto, se decidió añadir una resistencia para aumentar la parte real de la impedancia.

3.5. Diseño de la antena con la incorporación de un componente electrónico, una resistencia.

Se determinó que la parte real de la impedancia de entrada era insuficiente (como se puede ver en la Figura 3.13), en consecuencia, se tomó la decisión de incluir una resistencia en serie en el diseño de la antena, ubicándola en la capa inferior, con un valor de 10Ω para mejorar la parte real de la impedancia de entrada. Además, se optó por cambiar el sustrato por uno de mayor espesor, de 0,5 milímetros.

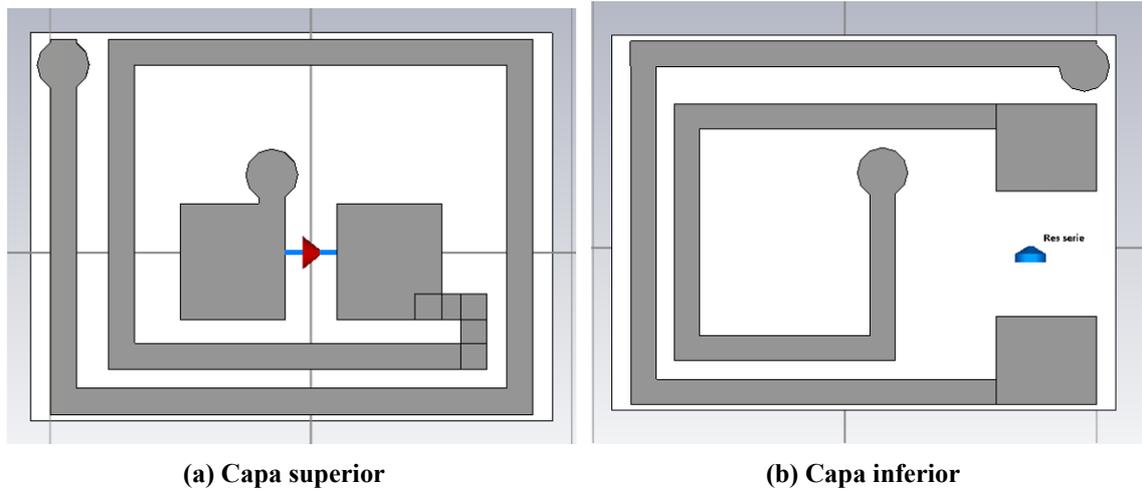


Figura 3.14: Geometría de la antena fabricable con resistencia en serie de 10Ω .

Como resultado de añadir una resistencia en serie y de reducir la longitud de la antena ya que la parte imaginaria resultaba ser elevada ($j349 \Omega$), el nuevo valor de la impedancia de la antena es de $Z_a = 16,8 + j240 \Omega$, y se puede ver en la Figura 3.15. Este valor de impedancia se encuentra muy cerca del objetivo buscado.

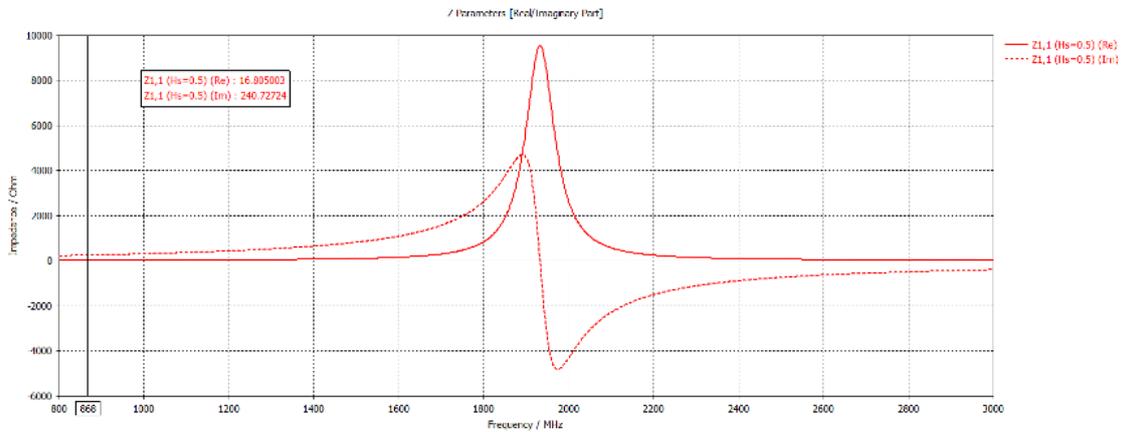


Figura 3.15: Parte real e imaginaria de la antena para el diseño fabricable con una resistencia en serie de 10Ω a 868 MHz.

Siendo el diagrama de radiación del diseño de la Figura 3.14 el siguiente:

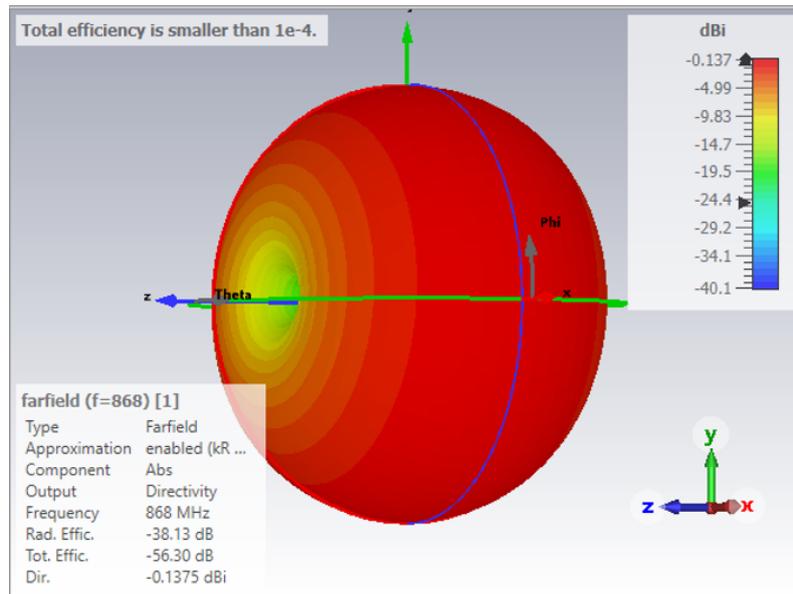


Figura 3.16: Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta con una resistencia añadida.

En el diagrama de radiación de la antena con resistencia en serie (ver Figura 3.16) se puede observar que el valor de la eficiencia de radiación es de -38,13 dB, existen elevadas pérdidas, la antena puede considerarse ineficiente.

3.6. Fabricación del prototipo

Finalmente, gracias a los buenos resultados obtenidos con respecto a la impedancia de la antena con el simulador CST, se decide fabricar la antena anterior con las siguientes características:

Sustrato	Permitividad (ϵ)	Grosor en mm	Resistencia en Ω	Impedancia en Ω
Netlec	2,2	0,5	10	$Z_a = 16,8 + j240$

Tabla 3.4: Tabla de las características de la antena a fabricar.

La fabricación del prototipo es la siguiente:

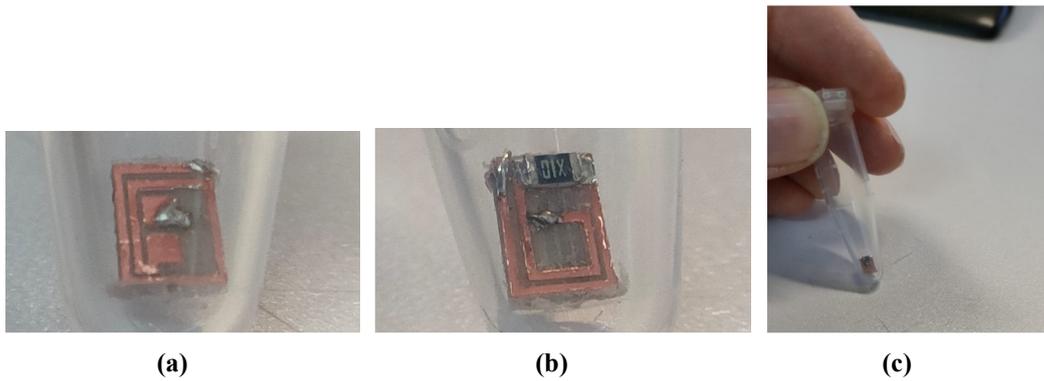


Figura 3.17: Primer prototipo fabricado con resistencia en serie.

Para la medida del prototipo y kit de calibración se fabrico la siguiente punta:

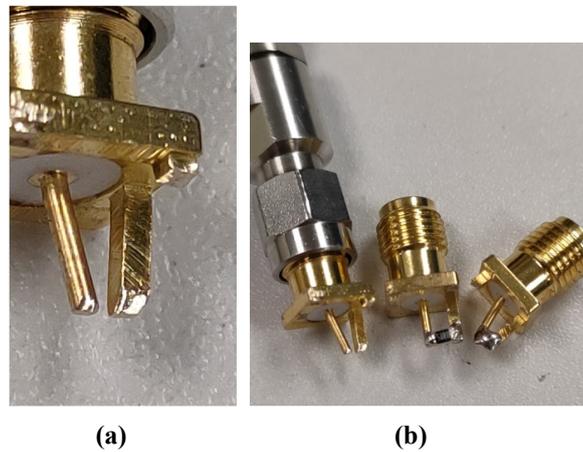


Figura 3.18: Punta fabricada para la medida del prototipo y kit de calibración.

En la medida de la impedancia del prototipo no se obtuvo el mismo resultado que en la simulación con CST. En esta caso la impedancia medida tuvo un valor de: $Z_a = 42,15 + j199,52 \Omega$ (ver Figura 3.19 y la impedancia simulada era: $Z_a = 16,8 + j240 \Omega$).

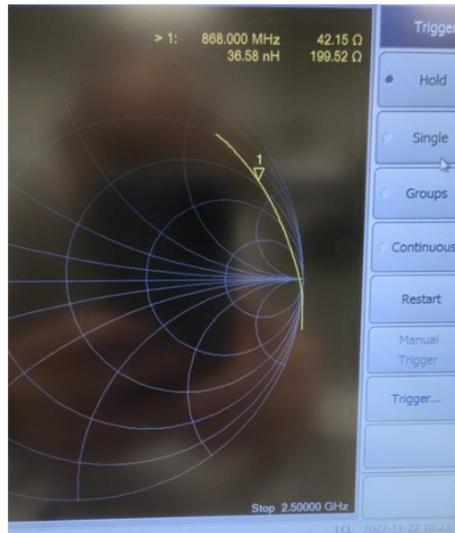


Figura 3.19: Impedancia medida del prototipo.

Se han explorado varios diseños de antenas para poder lograr la adaptación de la impedancia del chip a la antena. Se ha podido observar que el primer diseño presentaba una discrepancia significativa entre las partes real e imaginaria de la impedancia. A pesar de intentar ajustar la longitud de la antena y aplicar técnicas como el *meandering*, los resultados no fueron satisfactorios. Se optó por alinear las pistas de la antena para aumentar la parte real, pero los resultados seguían siendo insuficientes. Se introdujo una resistencia en la parte trasera de la antena para mejorar la parte real, sin embargo, esto resultó en una eficiencia de radiación negativa y una disconformidad entre las simulaciones y las mediciones reales. En general, no es recomendable añadir una resistencia en serie a un diseño de antena debido a pérdidas de eficiencia de radiación y de potencia disipada.

Capítulo 4

Diseño con condensador

Como se ha explicado en el capítulo anterior el empleo de resistencias para elevar la parte real de la impedancia no es aconsejable. Por tanto, en este capítulo vamos a retomar el diseño inicial donde las pistas de la capa superior e inferior estaban alineadas (Figura 3.10), incrementando lo máximo posible la longitud de las líneas, aprovechando todo el sustrato para tratar de aumentar la parte real de la impedancia de entrada. Como se podrá comprobar esta estrategia también contribuye a aumentar la parte imaginaria de la impedancia. Para contrarrestar este efecto se va a añadir un nuevo elemento, un condensador, que ayudará a reducir la parte imaginaria de la impedancia sin afectar significativamente a la parte real.

4.1. Diseño con un condensador en paralelo

Previamente se decidió añadir un condensador en paralelo para poder reducir el valor de la parte imaginaria de la impedancia y de esta manera no influir en el valor de la parte real. Además, también se decidió cambiar el sustrato para obtener mejores resultados. Las características del nuevo diseño son:

Sustrato	Permitividad (ϵ)	Grosor en mm	Pérdidas
FR-4	4,8	0,5	0,018 a 1 MHz

Tabla 4.1: Tabla de características para el diseño con un condensador en paralelo.

Para reducir la parte imaginaria de la impedancia, se decidió incluir un condensador en paralelo en el diseño. Para lograr esto, se aumentó el tamaño de los pads, mediante la adición de un segundo pad encima del primero (ver Figura 4.2), lo que permitió tener el espacio necesario para colocar el condensador en paralelo. Además, se eliminó la resistencia en serie y en su lugar se colocó una línea de conexión en la parte trasera, lo que permitió sustituir la resistencia por la línea, ver Figura 4.1b.

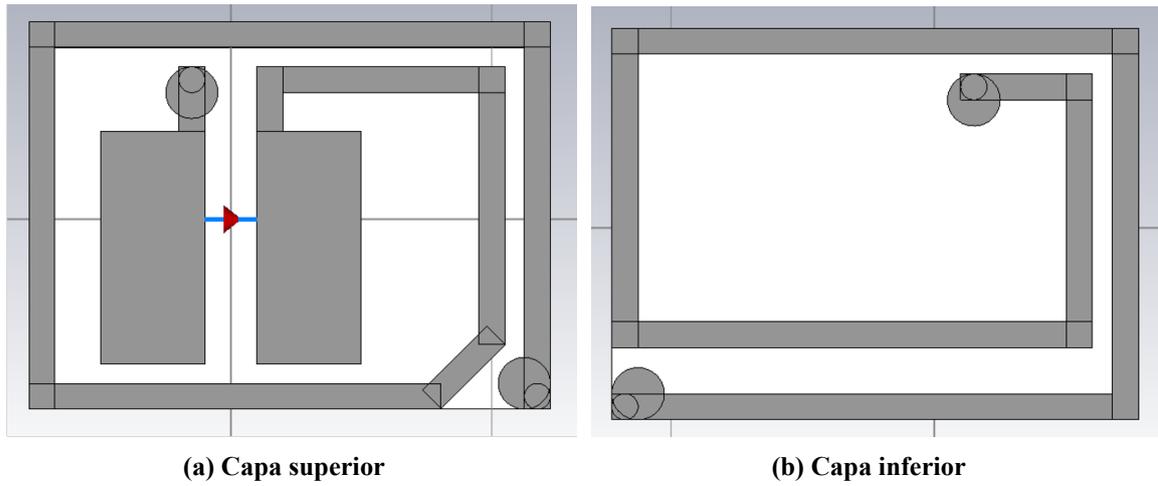


Figura 4.1: Geometría de la antena para añadir un condensador en paralelo.

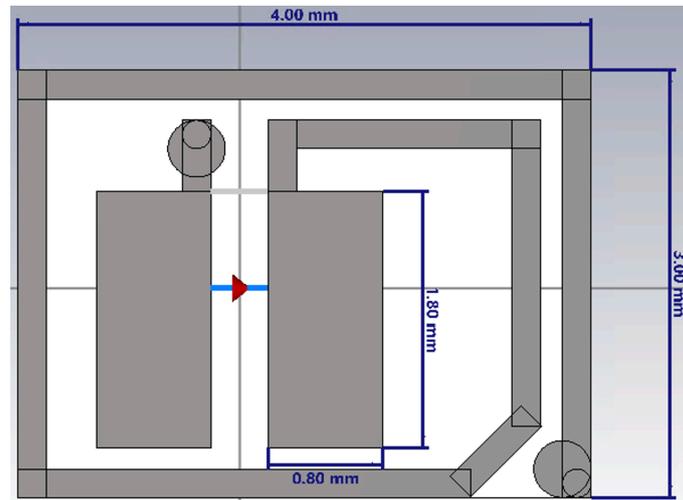


Figura 4.2: Vista frontal de la capa superior con las dimensiones de la antena impresa para añadir un condensador en paralelo.

En el diseño anterior, Figura 3.11, los pads del chip medían 0.8×0.9 mm, en este nuevo diseño, Figura 4.2, los pads tienen una dimensión de 0.8×1.9 mm, el doble de longitud. De esta manera, se podrá introducir el condensador en paralelo en nuestro nuevo diseño de la antena.

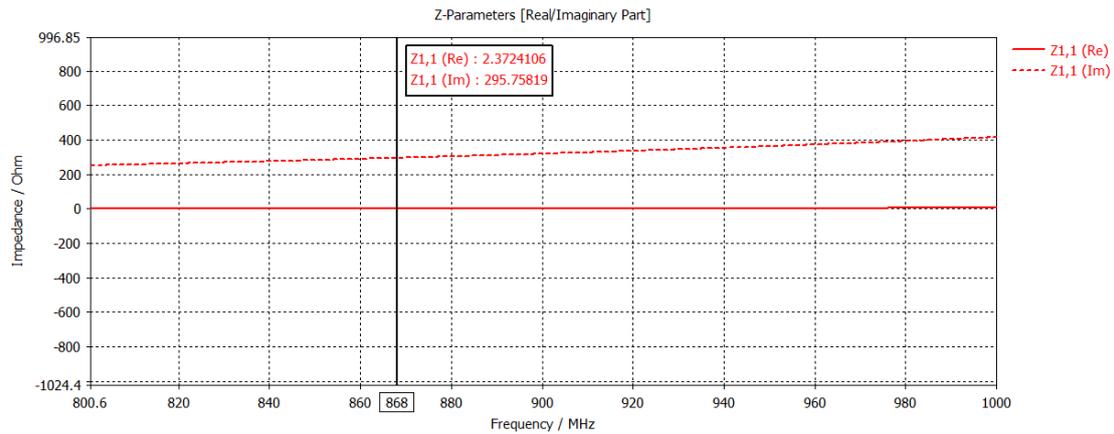


Figura 4.3: Parte real e imaginaria de la antena para la introducción de un condensador en paralelo.

Se puede apreciar en la Figura 4.3 que el valor de la impedancia ha disminuido y es de $Z_a = 2,37 + j259,75 \Omega$, lo que era esperable debido a la eliminación de una vuelta y la sustitución de la resistencia en serie por una línea de conexión. Con el objetivo de aumentar la parte real de la impedancia, se decidió incorporar una placa adicional en la parte trasera que aumente la capacidad. Para ello, se colocó esta placa en paralelo a los dos pads existentes (ver Figura 4.4).

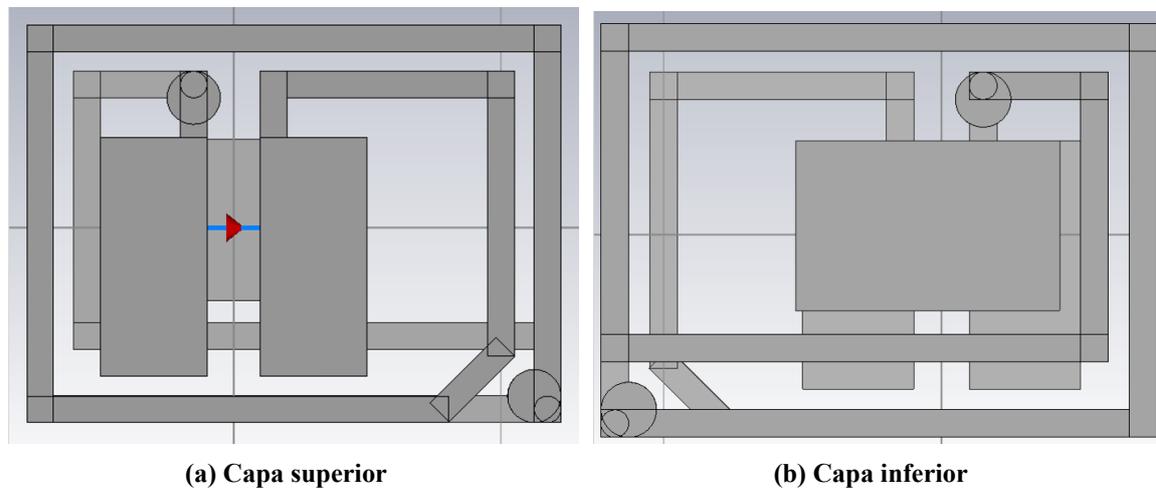


Figura 4.4: Geometría de la antena con placa adicional para añadir un condensador en paralelo.

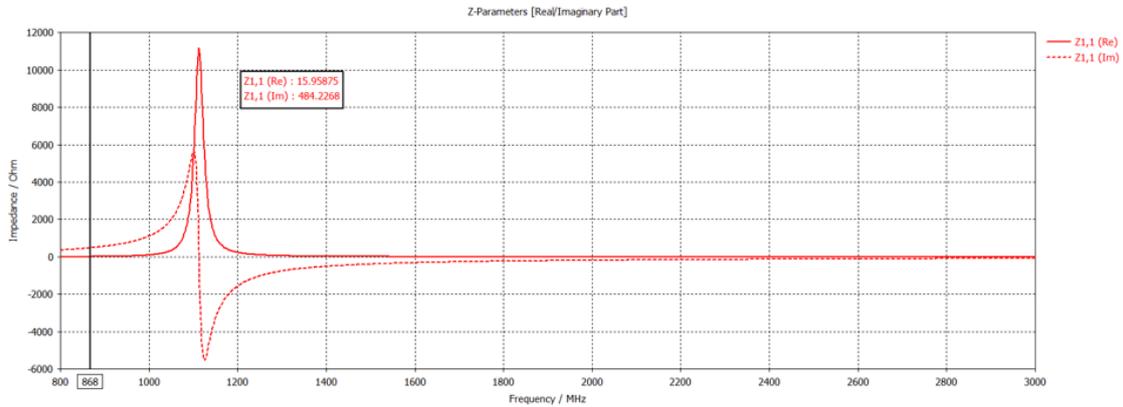


Figura 4.5: Parte real e imaginaria de la antena con placa adicional la introducción de un condensador en paralelo.

En la Figura 4.5 se observa que la parte real aumenta teniendo un valor de 15,98 pero como consecuencia la parte imaginaria también tiene un valor mayor siendo este ahora de $j484,22$. Para disminuir este valor decidimos colocar un condensador en paralelo. Primeramente se realizó un estudio en el esquemático de CST (Figura 4.6) para obtener el valor del condensador. Se obtuvo un valor de $0,374 \text{ pF}$

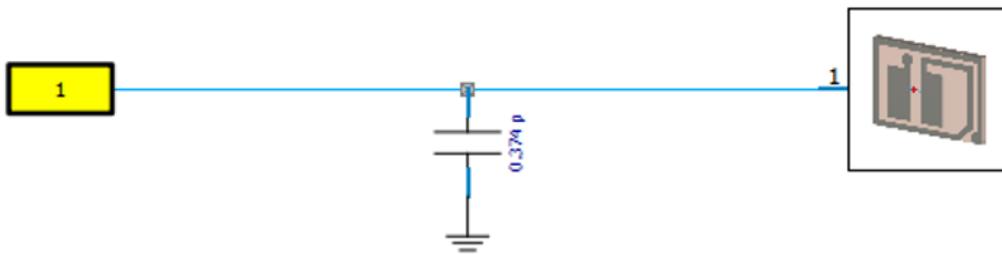


Figura 4.6: Esquemático en CST para obtener el valor del condensador.

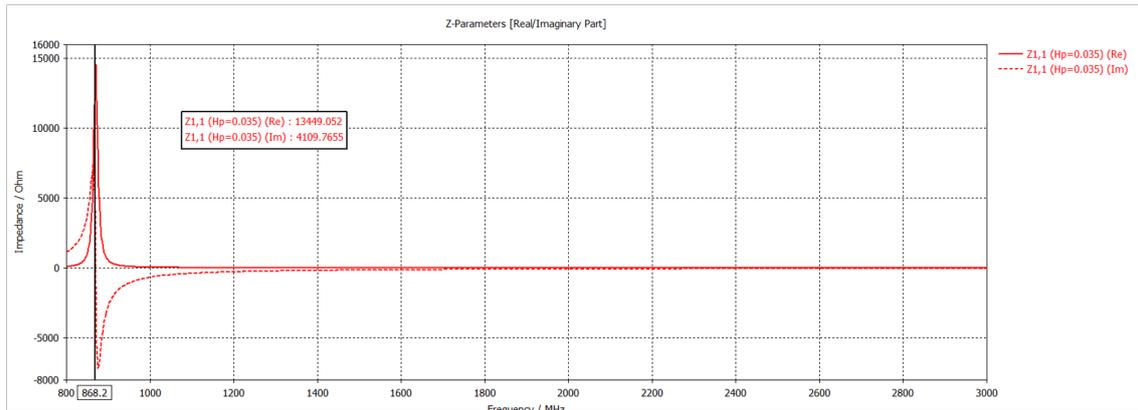


Figura 4.7: Parte real e imaginaria de la antena obtenida con el esquemático de CST con el condensador en paralelo.

El valor de la parte imaginaria en lugar de reducirse aumentó, lo mismo sucedió con la parte real de la impedancia. Esto sucede porque el condensador en paralelo hace la antena más capacitiva de lo deseado.

4.2. Diseño para la integración de un condensador en serie

Tras obtener el resultado de la impedancia de entrada de la antena (Figura 4.7) y dado que no se obtuvieron buenos resultados con un condensador en paralelo, se decidió añadir un condensador en serie. Después de realizar distintas simulaciones. Tal y como se comentó anteriormente, es posible aumentar el valor de la parte real de la impedancia del diseño alineando las pistas de la antenas en las dos capas. En otras palabras, se obtienen mejores resultados en la parte real de la impedancia cuando las pistas de la capa superior coincidieran exactamente en su posición con las pistas de la capa inferior, por eso se parte del diseño de la Figura 3.10.

La Figura 4.8 presenta la nueva configuración de la antena, con las pistas alineadas en las diferentes capas y permitiendo la integración del condensador en serie. Para permitir esta incorporación del condensador en serie se incorporaron pads de soldadura de dimensiones $0,3 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$, con una separación entre ellos de $0,4 \text{ mm}$.

Dado que estaba previsto realizar la fabricación del primer prototipo de antena en el laboratorio del APL en la UPV, empleando una fresadora de control numérico, a la hora de plantear el nuevo diseño con condensador serie, se tuvieron en cuenta una serie de especificaciones y restricciones, impuestas por las características de la fresadora del laboratorio. Entre estas restricciones se encontraba la necesidad de mantener una separación entre vistas de $0,176 \text{ mm}$ y un tamaño mínimo de pistas de $0,2 \text{ mm}$. Estas dos condiciones contribuyen al ligero aumento de las dimensiones de la antena ($4 \times 3,2 \text{ mm}^2$) en comparación con la geometría representada en la Figura 3.3 ($3,6 \times 3 \text{ mm}^2$). La antena está diseñada sobre el sustrato de la Tabla 4.1.

Se llevaron a cabo varios diseños con el fin de poder implementar el condensador en serie y obtener los resultados deseados. En primer lugar, se configuró la geometría de la antena sin la inclusión del condensador (ver Figura 4.8) como se ha comentado anteriormente. En su lugar, se utilizó un trozo de línea para permitir estudiar el diseño y evaluar los resultados en la parte real. Era evidente que

la parte imaginaria seguiría siendo elevada debido a la ausencia del condensador, ya que se añadiría otro trozo de línea y no este.

En la Figura 4.9 se muestra la variación con la frecuencia de la impedancia de entrada de la antena de la Figura 4.8. Como podemos apreciar el valor de la reactancia no ha disminuido, esto se debe a que el condensador no está añadido. Sin embargo, el valor de la parte real de la impedancia se acerca al valor deseado, pero sigue siendo muy elevado. Se debe tener en cuenta que al sustituir el trozo de línea por el condensador, la longitud de las pistas disminuirá al eliminar dicha línea.

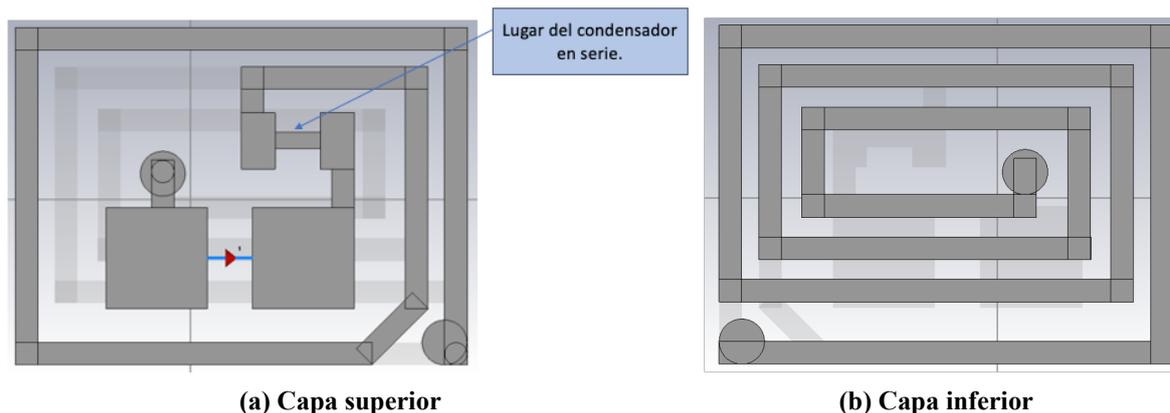


Figura 4.8: Geometría de la antena impresa propuesta para fabricación en el APL de la UPV.

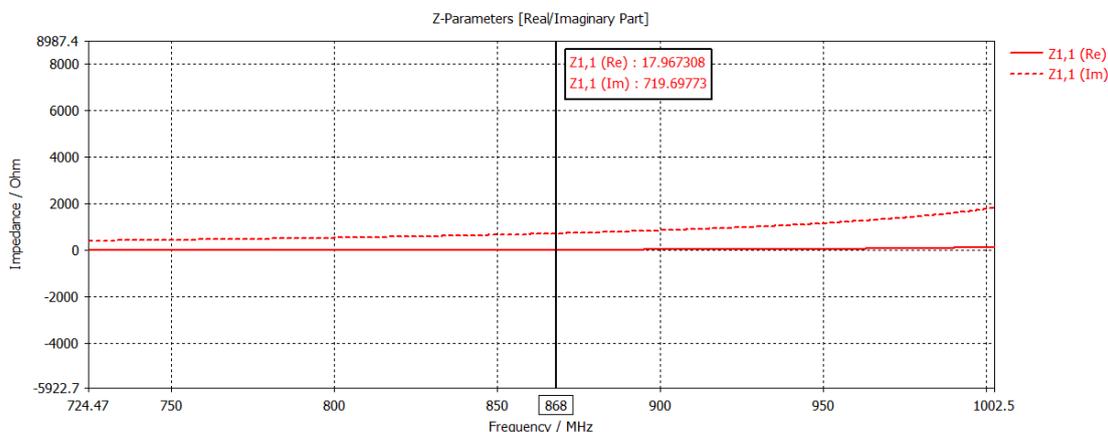


Figura 4.9: Parte real e imaginaria de la antena para añadir un condensador en serie.

4.2.1. Diseño con la incorporación de un condensador en serie.

Finalmente, se reemplazó la conexión entre los pads (tramo de línea) por un condensador en serie. Debido a esta sustitución, la longitud de la antena se redujo, tal y como se había previsto, y fue necesario extender la longitud de la línea (ver Figura 4.10).

Como se puede apreciar en la Figura 4.11, gracias a la inclusión del condensador serie y a la modificación del diseño para poder ajustar lo máximo posible el valor de la impedancia, se logra

reducir la reactancia de la impedancia un poco, pero no lo suficiente, obteniendo un valor de $Z_a = 17,617 + 210,25 \Omega$.

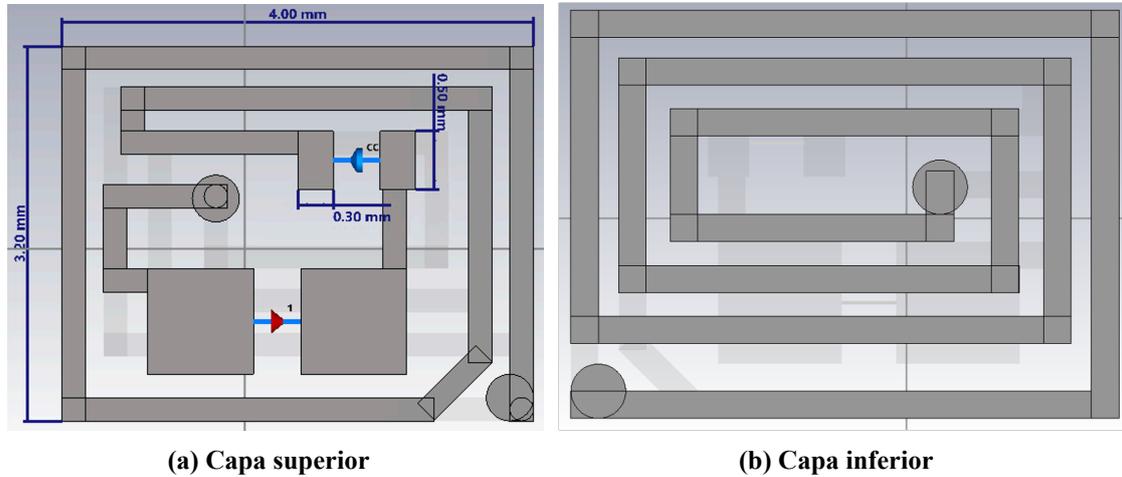


Figura 4.10: Vista frontal y trasera de la capa superior e inferior con las dimensiones de la antena impresa óptima con el condensador en serie.

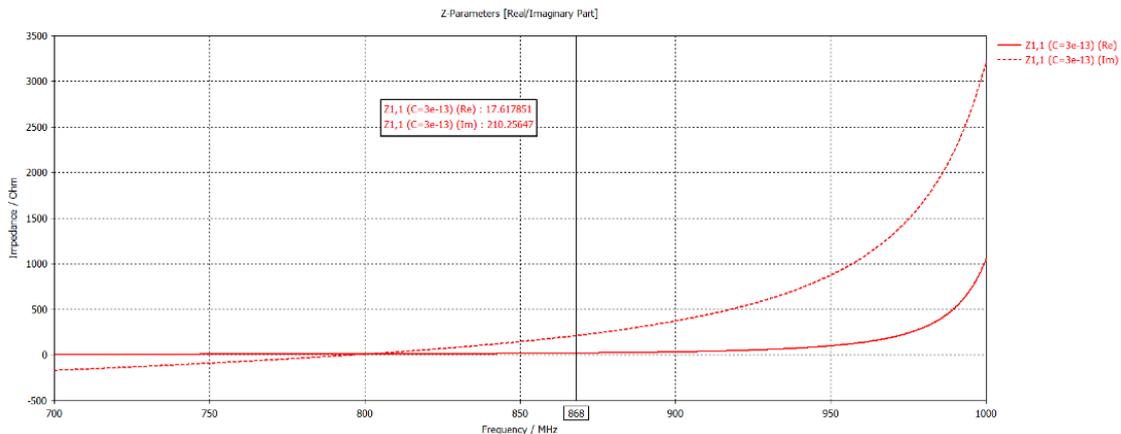


Figura 4.11: Parte real e imaginaria de la antena óptima 1 con un grosor de 3.2 mm.

4.2.2. Diseño fabricable óptimo con condensador en serie.

En virtud de los diseños previos, y debido a que no se logró una adaptación óptima de la antena al chip, se llevó a cabo un estudio paramétrico de las líneas salientes del pad del condensador. Con ello, se permitió analizar el comportamiento de las líneas 1, 2 y 3 (ver Figura 5.1a) en caso de hacerlas más largas o más cortas. El diseño de la capa inferior se mantuvo intacto tal como se muestra en la Figura 5.1b, con un grosor de sustrato de 0,5 mm, una permitividad de 4,8 y una tangente de pérdidas de 0,018.

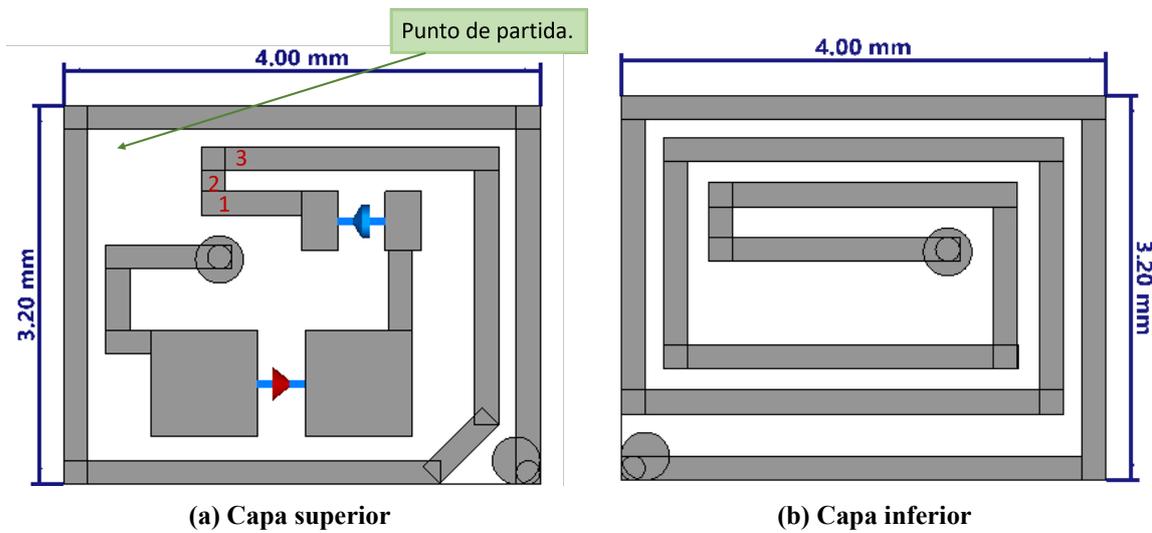


Figura 4.12: Geometría final fabricable de la antena óptima.

Luego, se analizó los resultados obtenidos en el estudio paramétrico realizado en el software CST. Se puede apreciar cómo varían los resultados en relación con la longitud de las tres líneas mencionadas previamente. Dependiendo de la longitud de estas líneas, se obtiene un valor de impedancia u otro. Este efecto se puede ver en el gráfico de la Figura 4.13, donde la variable $B = 0$ indica que las líneas se encuentran en su posición inicial. A medida que la variable B aumenta su valor, las líneas se acercan al centro del eje.

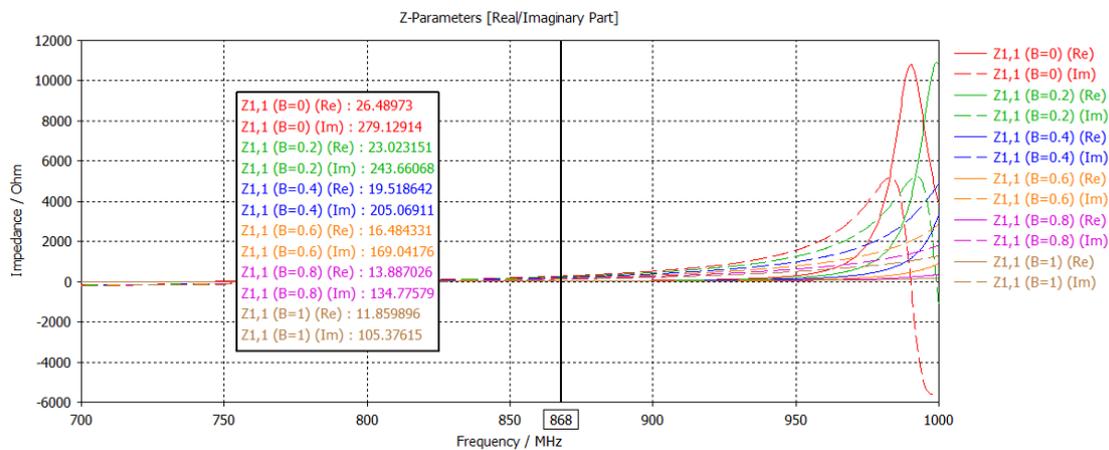


Figura 4.13: Estudio paramétrico de las partes reales e imaginarias de la antena final para diferentes longitudes de líneas.

En el resultado final, se puede apreciar que la impedancia más cercana a la del chip se logró cuando se ajustó la longitud de las tres líneas de la antena con la variable $B = 0,6$ como se muestra en la Figura 4.14. En esta configuración, la impedancia alcanzó un valor de $Z_a = 16,484 + j169,04 \Omega$, mientras que la impedancia del chip es $Z_a = 16,17 - j169,8 \Omega$, esta completamente acoplada. Estos valores fueron obtenidos con un condensador de $0,3 \text{ pF}$.

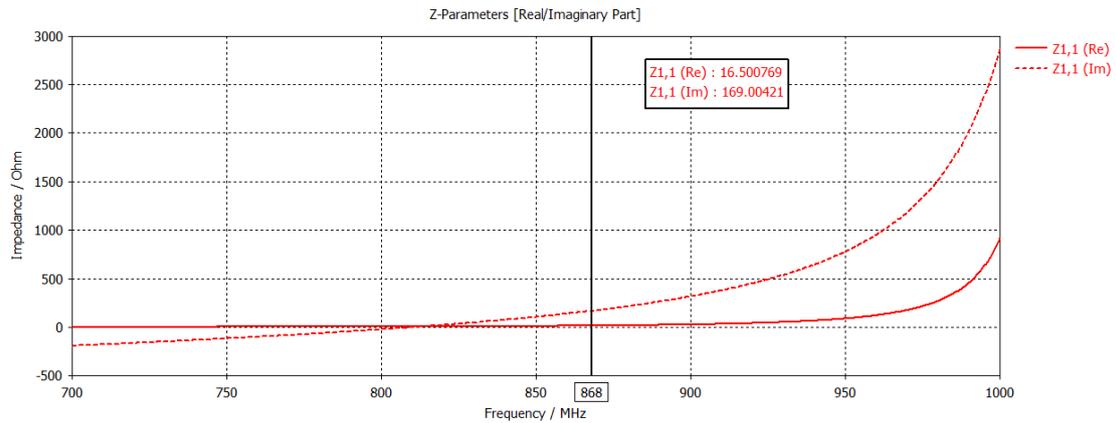


Figura 4.14: Parte real e imaginaria de la antena final tras el estudio paramétrico.

En lo que respecta al diagrama de radiación de la antena mostrada en la Figura 4.15, se puede apreciar que apenas cambia respecto al diseño previo sin condensador, presentando el nuevo diseño una eficiencia de radiación de -30,81 dB.

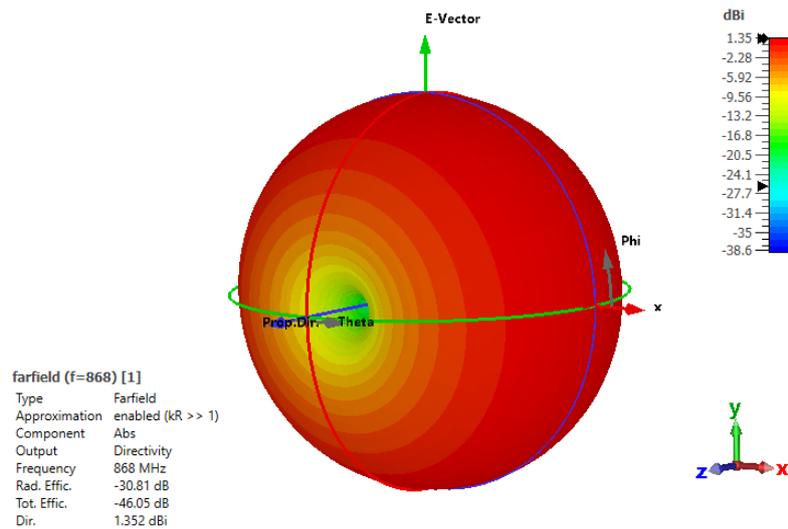


Figura 4.15: Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena acoplada.

Capítulo 5

Integración microantena y microchip

5.1. Fabricación primer prototipo con condensador en serie

Finalmente, dados los buenos resultados obtenidos en la simulación con la inclusión del condensador en serie, se decidió proceder con la fabricación de dicha antena. En la Figura 5.2 se muestran fotografías de la antena ya fabricada y con el condensador y el chip soldados. Dadas las reducidas dimensiones de la antena, las fotografías han sido tomadas empleando lentes de aumento.

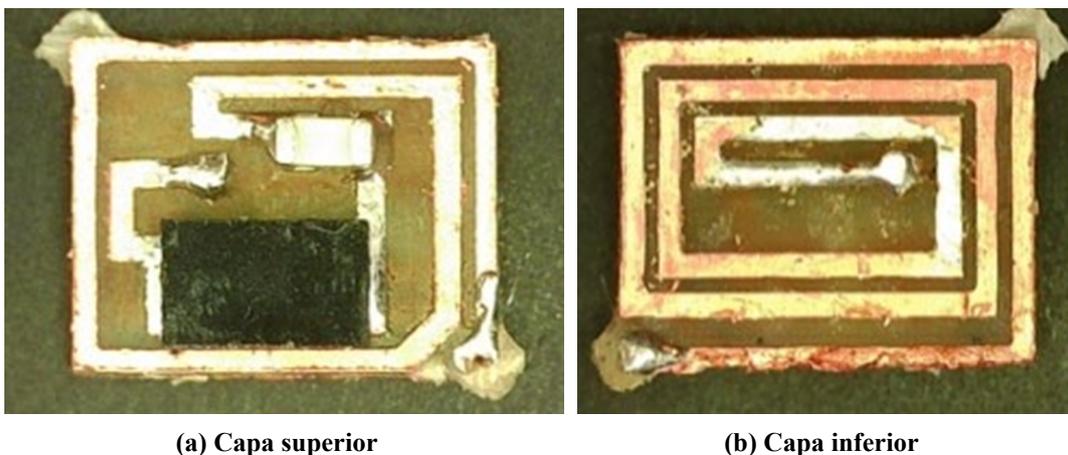
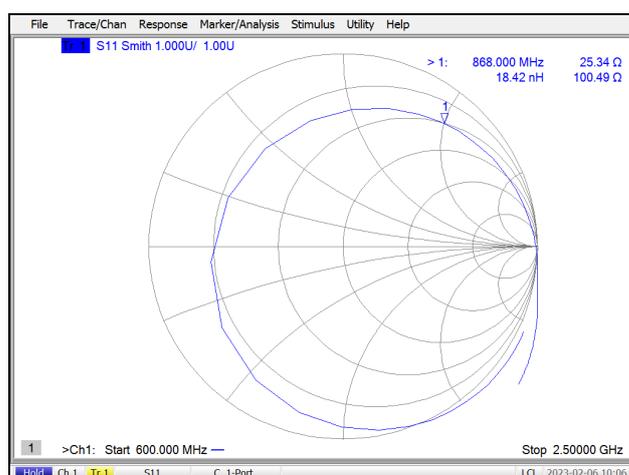


Figura 5.1: Capa superior e inferior de la antena fabricada en el APL de la UPV.

Una vez fabricada la antena, se midió empleando un analizador de redes vectorial la impedancia del prototipo y se comprobó que a 868 MHz el resultado se desviaba un poco del obtenido con la simulación en el software CST. La impedancia medida fue $Z_a = 25,34 + j100,49 \Omega$, como se muestra en la Figura 5.2a. La medida se realizó empleando una punta de contacto obtenida a partir de un conector SMA (ver Figura 5.2b).



(a) Impedancia de entrada.



(b) Punta de contacto.

Figura 5.2: Medida de la impedancia de entrada a 868 MHz de la antena fabricada en el APL y punta de contacto con kit de calibración empleada para realizar medida.

A continuación, se ha realizado una comparación de las medidas obtenidas en la simulación con las medidas realizadas a partir de la fabricación. En la Tabla 5.1 se muestran los valores de la impedancia obtenidos en la simulación y en la medida de la fabricación:

Medidas	Impedancia de la antena (Ω)
Simulación	16,484 - j169,04
Fabricación	25,34 + j100,49

Tabla 5.1: Tabla comparativa del valor obtenido de impedancia en simulación y en fabricación.

Esta desviación, mostrada en la Tabla 5.1, de los valores obtenidos entre la simulación y la medida del prototipo podría ser debida a la caracterización realizada en CST de la permitividad del material FR-4 y de su tangente de pérdidas. También podría deberse a las soldaduras realizadas de forma manual tanto en las vías que conectan las dos capas, como en el condensador en serie. En cualquier caso, las pruebas experimentales de detección realizadas con un lector comercial proporcionaron resultados positivos y fue posible detectar la antena ubicada en distintas posiciones dentro de la colmena.

5.2. Pruebas del sistema completo

Una vez realizada la fabricación de la microantena y tomado las medidas se procedió a evaluar el comportamiento de los distintos prototipos desarrollados en el interior de la cámara anecoica con la que cuenta el *Antennas and Propagation Lab* (APL).

Se han llevado a cabo distintas medidas que han permitido la caracterización de las antenas tanto

del *tag* del lector como del lector y ha sido posible realizar un estudio del comportamiento del sistema completo en condiciones de aislamiento frente a radiaciones interferentes.

Se han realizado medidas de adaptación en el laboratorio empleando el analizador de redes del APL y se han realizado medidas de transmisión en la cámara anecoica (entorno encontrado libre de interferencias) colocando la antena del tag en el interior de una colmena y posicionando el lector a diferentes distancias y con diferentes orientaciones. La Figura 5.3 recoge fotografías tomadas en el interior de la cámara anecoica de la UPV durante el proceso de evaluación del comportamiento del primer prototipo de antena desarrollado. Para intentar evaluar el sistema de la forma más realista posible, tal como se muestra en la Figura 5.4, la antena se adhirió a una abeja, que a su vez se colocó con cinta adhesiva en uno de los paneles de cera de la colmena.



Figura 5.3: Evaluación en el interior de la cámara anecoica de la UPV del comportamiento del primer prototipo de antena desarrollado.



Figura 5.4: Imágenes del primer prototipo de antena colocado sobre la abeja y pegado al panel de cera con cinta adhesiva.

Durante el experimento se pudo comprobar que era posible detectar el *tag* colocando el lector tanto en la parte superior, como en uno de los laterales de la colmena. Se pudo comprobar que los hilos metálicos dispuestos horizontalmente en los paneles de la colmena ayudan a la propagación de la señal en el interior de la misma y favorecen la detección de los *tags*. A pesar de esto, existe una diferencia elevada con los resultados obtenidos en las medidas de la fabricación con respecto a las

simulaciones.

Capítulo 6

Diseño con nuevas características para una fabricación en una empresa externa

Como se ha expuesto en el Capítulo 5, se evidenció una notable discrepancia entre los valores de impedancia obtenidos en la simulación y los resultados experimentales de la fabricación del prototipo inicial. Conscientes de la importancia de alcanzar una concordancia precisa entre ambos enfoques, se ha procedido a un rediseño integral del prototipo.

Para reducir la desviación observada en la medida de la impedancia de entrada, con el fin de aumentar la transferencia de potencia y mejorar el alcance de la detección, se procedió a ajustar los valores de permitividad y tangente de pérdidas empleados en la simulación del dieléctrico a valores más realistas. También se decidió externalizar la fabricación a través de la empresa Lab-Circuits para poder tener un mayor número de prototipos y poder validar la repetitividad de las medidas.

Durante el proceso de envío del diseño para su fabricación externa, algunas características del prototipo inicial se tuvieron que modificar para ser adaptadas a las especificaciones del equipo de fabricación de Lab-Circuits. Estas modificaciones se detallan en la siguiente tabla:

Diseños	Ancho de pistas (mm)	Diámetro de vías (mm)	Diámetro de corona (mm)
APL	0,2	0,2	0,4
Lab-Circuits	0,12	0,15	0,3

Tabla 6.1: Tabla de características generales para la fabricación de la antena en el laboratorio APL y en la empresa Lab-Circuits.

6.1. Prototipo de diseño para fabricar en una empresa externa con nuevas características, con condensador en serie para los chips Murata 218 y 220

Una vez se han esclarecido todas las nuevas características requeridas, se procedió con el diseño del nuevo prototipo. Es importante destacar que las dimensiones de los pads del chip y del condensador en serie permanecen inalteradas, al igual que el valor del condensador. En ambos diseños

detallados a continuación, el condensador mantiene un valor de 0,3 pF. Además, se valora también la posibilidad de emplear otro nuevo chip de Murata, modelo LXMS21ACMF-218 [10], debido a su buena sensibilidad de lectura. El tamaño de este chip es el mismo que el del LXMS21ACMD-220 y las dimensiones de los pads de soldadura también son las mismas. Lo que diferencia los dos chips, son sus niveles de sensibilidad de lectura y escritura y el valor de su impedancia de entrada. La Tabla 6.2 resume las especificaciones más importantes de los dos chips que se pretenden comparar.

Chips	Impedancia del chip (Ω)	Sensibilidad de lectura	Sensibilidad de escritura
Murata 220	16,4848-j169,94	-19,5	-16,7
Murata 218	13,4 - j126	-22,1	-18,8

Tabla 6.2: Especificaciones de los dos chips utilizados de la serie Murata.

En la Figura 6.1, se presenta el diseño del nuevo prototipo utilizando el chip Murata 218 que será sometido posteriormente al proceso de fabricación Lab-Circuits. Se busca asegurar que todas las modificaciones sean implementadas adecuadamente en este nuevo prototipo.

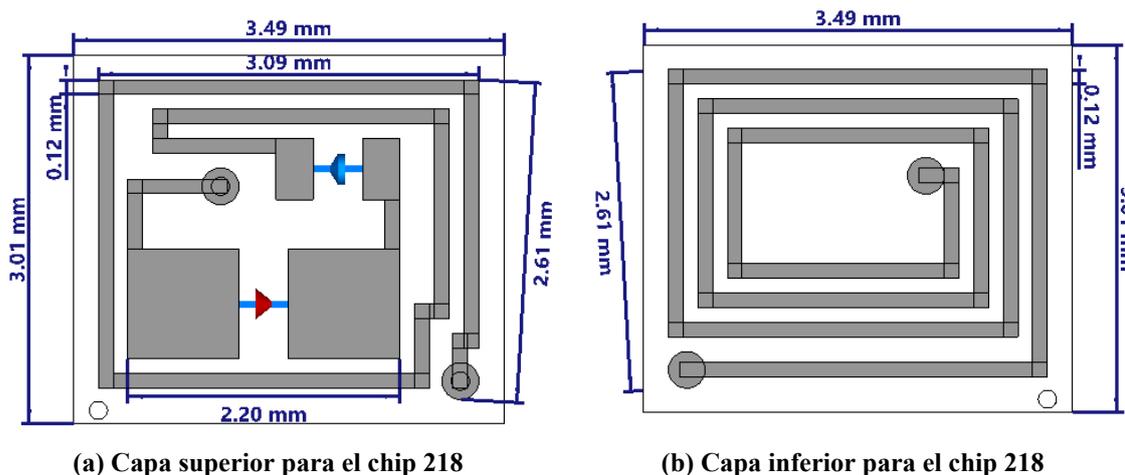


Figura 6.1: Geometría de la antena impresa utilizando el chip Murata 218 propuesta para la fabricación en Lab-Circuits.

Los resultados de la simulación para el diseño que empleará el chip Murata 218 se presentan en la Figura 6.2. Para este chip, su impedancia característica se especifica en la Tabla 6.2, siendo $Z_{chip} = 13,4 - j126\Omega$. En la Figura 6.2 se comprueba que la impedancia obtenida para la antena es $Z_a = 12,8 + j128\Omega$, valor bastante próximo al valor buscado.

6.1. PROTOTIPO DE DISEÑO PARA FABRICAR EN UNA EMPRESA EXTERNA CON NUEVAS CARACTERÍSTICAS, CON CONDENSADOR EN SERIE PARA LOS CHIPS MURATA 218 Y 220

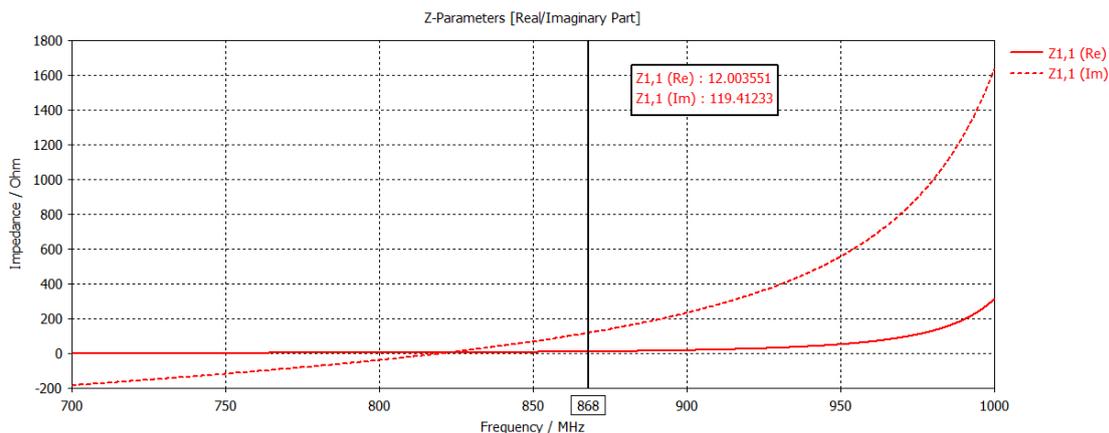


Figura 6.2: . Impedancia de entrada obtenida con CST para la antena propuesta para la fabricación en Lab-Circuits utilizando el chip Murata 218.

El diagrama de radiación de la antena se muestra en la Figura 6.3 y mantiene la forma obtenida en simulaciones anteriores. En este caso, la eficiencia de radiación toma un valor de -33,64 dB.

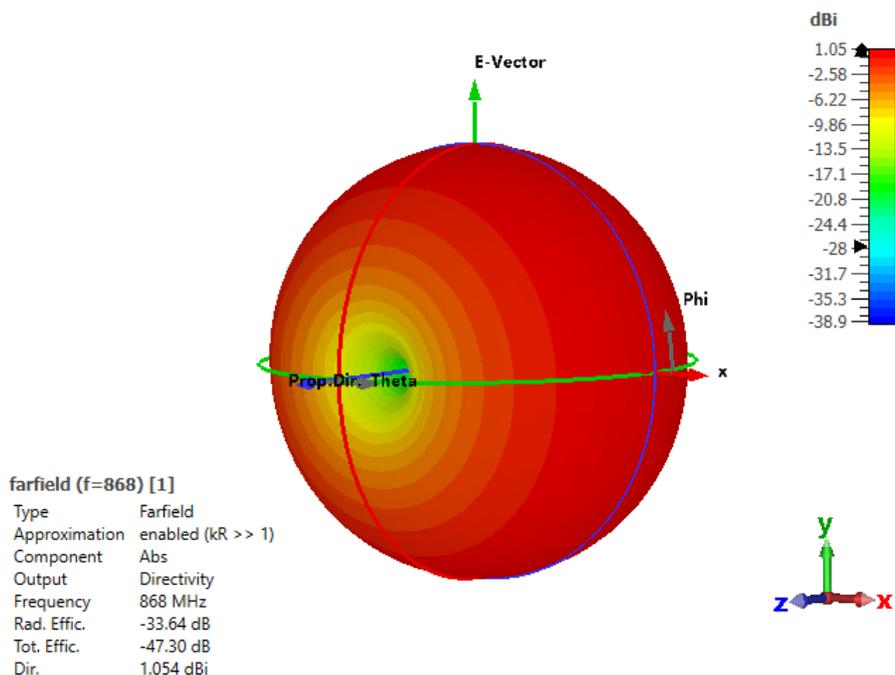


Figura 6.3: Diagrama de radiación a 868 MHz para la antena propuesta a fabricar en Lab-Circuits utilizando el chip Murata 218.

El diseño para la antena que trabajará con el chip Murata 220 es prácticamente idéntico al diseño de la Figura 6.1, tal y como se aprecia en la Figura 6.4:

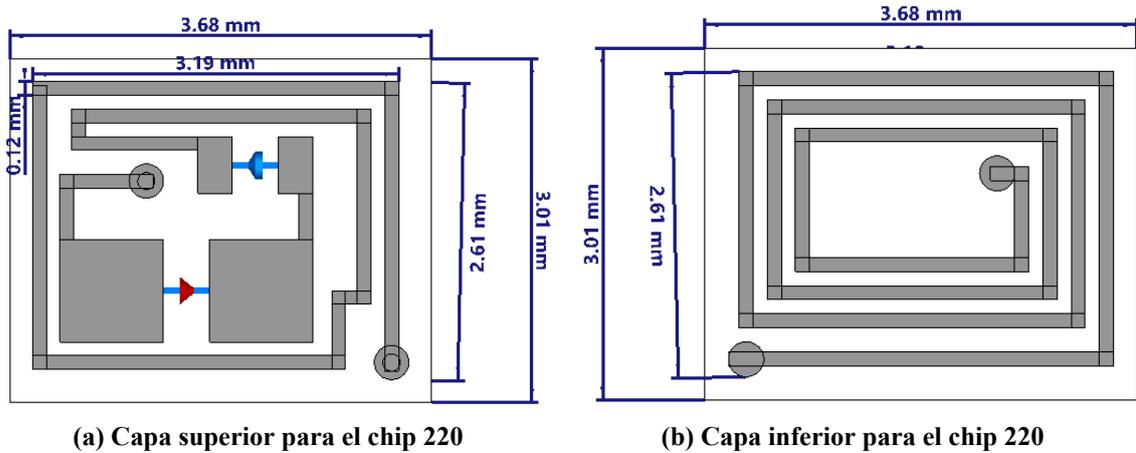


Figura 6.4: Geometría de la antena con chip Murata 220 para fabricarla en empresa externa.

Los resultados de la simulación con respecto la Figura 6.4 se pueden apreciar en la Figura 6.5. Estos resultados son para la antena con chip Murata 220 con una impedancia de $Z_{chip} = 16,484 - j169,04\Omega$. Se observa que en la Figura 6.5, la parte imaginaria de la impedancia no es exactamente igual; siendo la impedancia obtenida de la antena: $Z_a = 16,28 + j183,7\Omega$

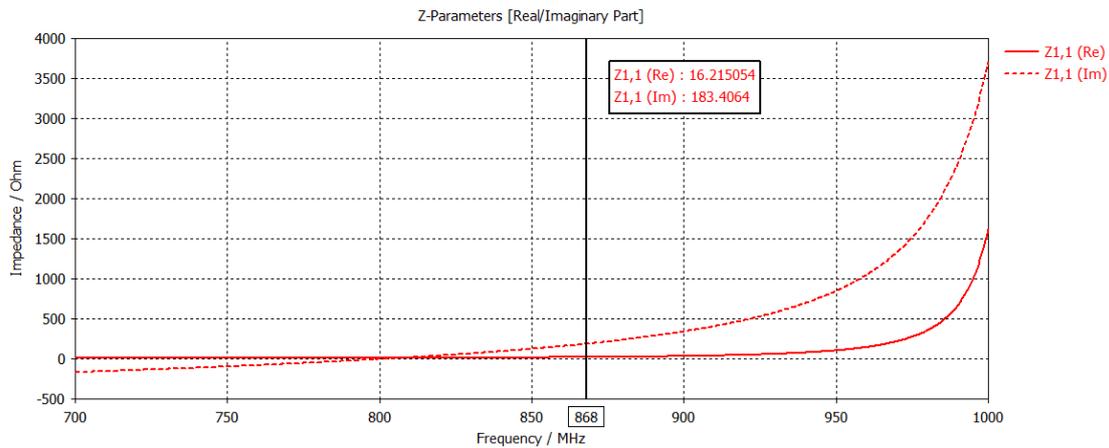


Figura 6.5: Impedancia de entrada obtenida con CST para la antena propuesta para la fabricación en Lab-Circuits utilizando el chip Murata 220

El diagrama de radiación de la antena de la Figura 6.4, se puede apreciar en el gráfico de la Figura 6.6. Su eficiencia de radiación tiene un valor de $-33,63$ dB.

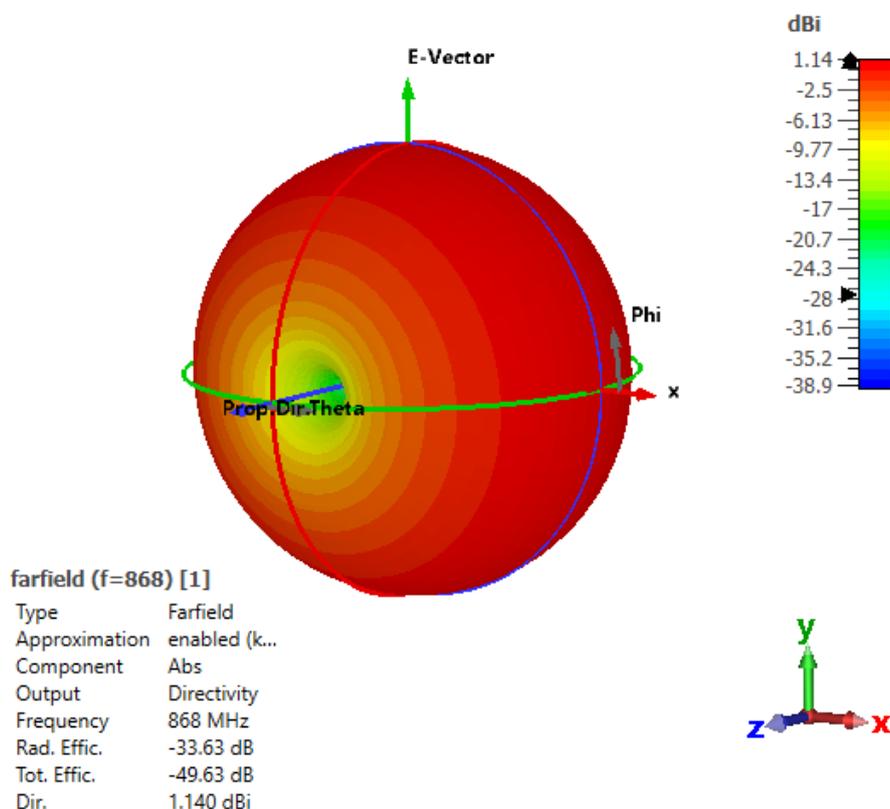


Figura 6.6: Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta a fabricar en Lab-Circuits utilizando el chip Murata 220.

Una vez simuladas las dos antenas y obtenido los valores de impedancia y eficiencia de radiación se procedió a la fabricación externa de dichas antenas. Los resultados obtenidos de las mediciones de las antenas fabricadas se muestran en la Tabla 6.3

Chips	Impedancia en CST (Ω)	Impedancia medida (Ω)	Valor condensador (pF)
Murata 220	16,28 - j183,4	56 + j205	0,3
Murata 218	12,28 + j119	40 + j128	0,3

Tabla 6.3: Comparación de los valores de impedancia en simulación con los obtenidos en las medidas reales.

Las dos configuraciones se probaron dentro de la cámara anecoica del laboratorio APL, en espacio libre y dentro de la colmena. La configuración de la antena para el chip 218, en espacio libre se detectó a unos 10 cm del lector, pero dentro de la colmena no se llegó a detectar. Sin embargo, la configuración para el chip 220 no se detectó ni en espacio libre, ni dentro de la colmena, seguramente debido a la elevada desadaptación de impedancia, ya que la parte real de la impedancia de la antena (56 Ω) es muy superior a la del chip Murata 220 (16,28 Ω).

La antena del chip 218 es la que mejor ha funcionado, pero aun así no está bien adaptada al chip,

lo que conlleva altas pérdidas de potencia por reflexión en el punto de conexión de la antena con el chip. Además, cabe destacar que dicha antena tiene unas dimensiones menores que el prototipo fabricado en la UPV, por lo que tiene menor eficiencia de radiación. La combinación de baja eficiencia de radiación y la mala adaptación disminuyen el rango de alcance de la detección en espacio libre e imposibilitan la detección dentro de la colmena.

Las antenas resultan sumamente frágiles debido a su exposición sin ningún recubrimiento protector, lo que las hace susceptibles a dañarse fácilmente, incluso con la manipulación mínima de los chips, un hecho que pudimos verificar mediante observación microscópica. Por lo tanto, es conveniente manejar las antenas con pinzas y evitar en la medida de lo posible el contacto directo con los dedos, con el fin de preservar la metalización de las pistas. Además, se comprobó que el sustrato FR-4 contiene fibras metálicas y al tratarse de una antena con un tamaño reducido el ϵ cambia dependiendo de la zona de la placa donde se fabrican las antenas.

6.2. Prototipo de diseño con un nuevo sustrato, la Poliamida

Con el objetivo de obtener una antena lo más delgada y ligera posible y de cambiar el sustrato FR-4, se decidió iniciar un nuevo enfoque empleando otro tipo de materiales de fabricación suministrado por la empresa externa. El objetivo era dotar a la antena de mayor flexibilidad y aumentar la protección de la metalización de las pistas, añadiendo capas protectoras tanto en la capa superior como en la inferior. Para lograr este propósito, se optó por emplear un sustrato flexible, como la poliamida. El presente capítulo se enfoca en la descripción detallada de las modificaciones realizadas en el diseño de la antena, las cuales tienen un impacto considerable en los resultados de impedancia. La transición al sustrato de Poliamida implica cambios significativos que afectan al comportamiento de la antena.

En este nuevo diseño, se han conservado las mismas características detalladas en la Tabla 6.1. La Figura 6.7 muestra una vista de perfil del nuevo diseño de antena, incluyendo el detalle de las distintas capas y materiales que integrarían el conjunto. Como se puede comprobar las pistas de la capa superior e inferior de la antena se realizarán con cobre, colocado en la parte superior e inferior de un sustrato central de Poliamida de permitividad 3,4 y grosor 0,05 mm. La capa de cobre de la parte superior irá cubierta por una fina capa de máscara de soldadura de permitividad 4 y grosor 0,012 mm. La capa de cobre inferior irá protegida por una capa de Poliamida de permitividad 3,6 y grosor 0,017 mm.

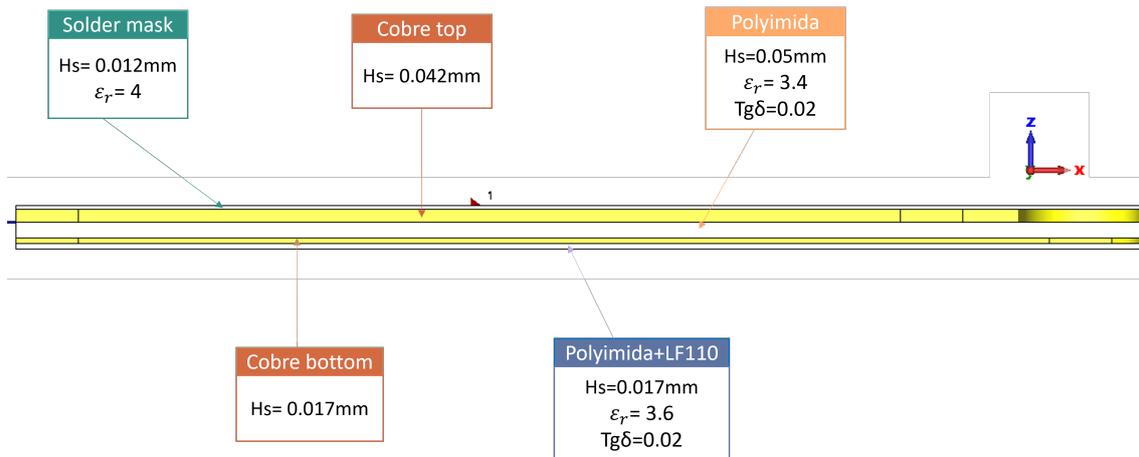


Figura 6.7: Estructura de las diferentes capas que forman la nueva geometría de la antena flexible.

En el diseño presentado en la Figura 6.8, se conservan algunas características, las cuales incluyen un ancho de línea de 0,12 mm, un tamaño de vías de 0,15 mm y un tamaño de corona de 0,3 mm. Estas especificaciones se han mantenido para obtener un diseño lo más compacto posible. El condensador serie utilizado tiene un valor de 0,3 pF, con el objetivo de alcanzar la impedancia específica del chip Murata 218, que es el que ha proporcionado el mejor resultado hasta el momento.

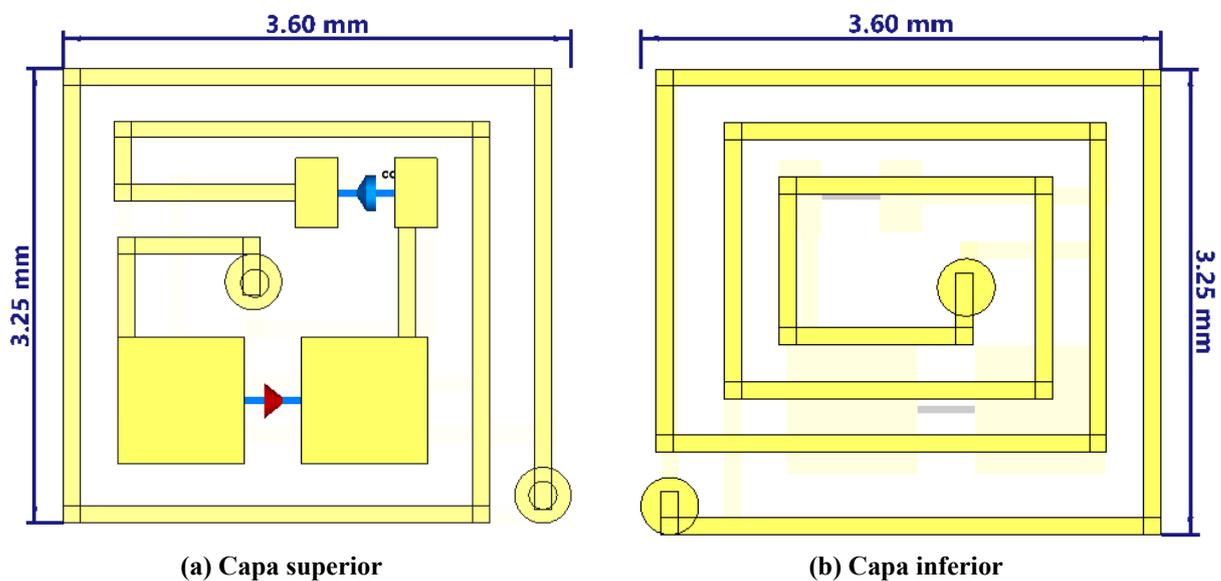


Figura 6.8: Prototipo de antena con las nuevas características para una antena flexible con sustrato Poliamida.

En la Figura 6.9 se muestra la impedancia de entrada obtenida con el simulador CST para la antena de la Figura 6.8. Como se puede comprobar a una frecuencia de 868 MHz la antena presenta una impedancia de $Z_a = 7,68 - j271 \Omega$ mientras que, el valor de impedancia deseado es $Z_{chip} = 12,8 + j119 \Omega$. Por tanto, existe cierta desviación entre ambos valores.

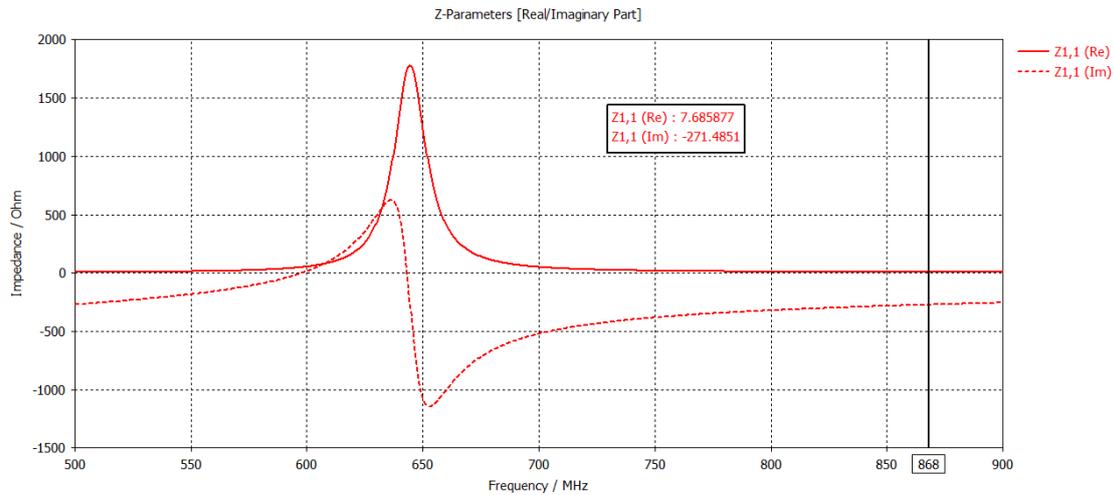


Figura 6.9: Resultado de impedancia para el diseño flexible con Poliamida.

Con el fin de solucionar la desviación en la impedancia y determinar la causa, se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo de las diversas capas incorporadas. Este análisis permitirá determinar el efecto sobre la impedancia de entrada del grosor de las distintas capas de la antena y de la permitividad de los materiales.

6.2.1. Estudio de las diferentes capas del prototipo con Poliamida

Se realizó un estudio de la capa de soldadura *soldermask*, variando su grosor entre los valores 0,012 mm y 0,02 mm, además de eliminar dicha capa en la geometría de la antena. Se observó que el efecto en la obtención del valor de impedancia fue insignificante, ya que se registró variación alguna en la impedancia obtenida en los tres casos. También se realizó un estudio de la capa protectora utilizada en la cara inferior (Poliamida + LF110) eliminándola del prototipo. Sucede lo mismo que en el estudio con la capa protectora de la cara superior, no tiene impacto alguno a la hora de obtener el valor de la impedancia. Seguidamente, se procedió a eliminar las dos capas de recubrimiento, lo cual no mostró ningún cambio significativo en la obtención de la impedancia de la antena. Para concluir, se llevó a cabo un estudio del grosor del sustrato, manteniendo el resto de las capas. La Poliamida tiene un inconveniente y es la limitación en su grosor, ya que solo puede ser fabricada con un espesor de 0,05 mm, siendo este demasiado pequeño. Se decidió aumentar el grosor del sustrato a 0,25 mm y el resultado fue un aumento en el valor de la impedancia tras simularla en CST, mostrado en la Figura 6.10

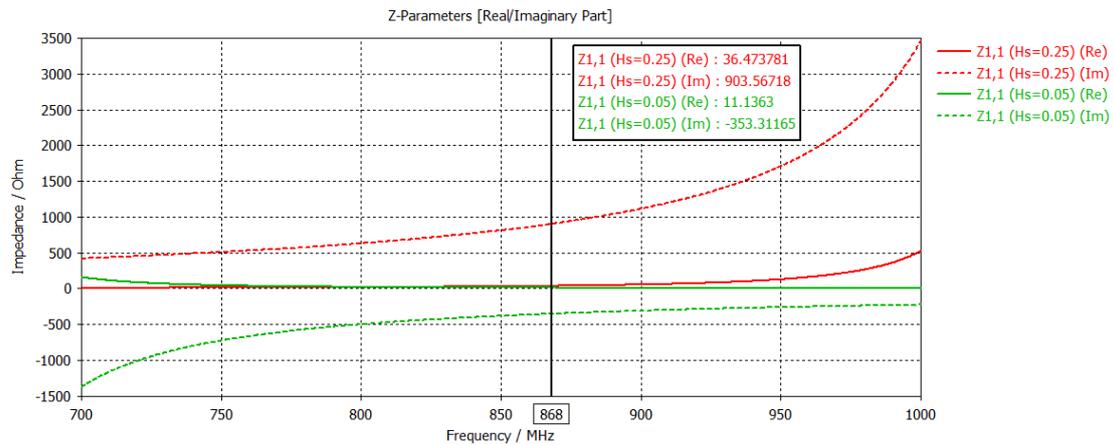


Figura 6.10: Impedancia de entrada obtenida con CST para un grosor de Poliamida de 0,05 mm y 0,25 mm.

Estos resultados ponen de manifiesto que no es posible utilizar Poliamida para la fabricación del prototipo, ya que su grosor es tan reducido que se incrementa la capacitancia por la separación tan pequeña que hay entre las líneas de cobre, lo que a su vez reduce la parte imaginaria de la impedancia, y hace imposible obtener los valores necesarios para conseguir adaptar correctamente a la impedancia de los chips de Murata.

Descartada la opción de trabajar con materiales flexibles basados en Poliamida, se ha optado por retomar el diseño presentado en la Figura 21, con sustrato FR-4 de grosor 0,5 mm. Se ha decidido retomar este primer prototipo y optimizarlo, por ser el que mejores resultados ha proporcionado en las medidas realizadas en el laboratorio.

Capítulo 7

Prototipo de diseño a fabricar utilizando sustrato FR4

Conforme a los resultados poco satisfactorios obtenidos en los diseños presentados en los capítulos anteriores durante la fase de fabricación, se ha optado por retomar el diseño presentado en el ???. Este diseño destacó por ser el que más se asemejó al comportamiento de la antena simulada en CST una vez obtenidas las medidas después de su fabricación.

En la Figura 7.1 se presenta un esquema de las capas empleadas en los diseños finales que se han fabricado externamente en la empresa Lab-Circuits. Se puede observar que el sustrato central es FR4 de grosor 0,5 mm y permitividad relativa 4, y que sobre las capas de cobre que constituyen las pistas radiantes de la antena se colocará una capa protectora de máscara de soldadura de grosor 0,012 mm y permitividad relativa 4, en combinación con el chip Murata 218.

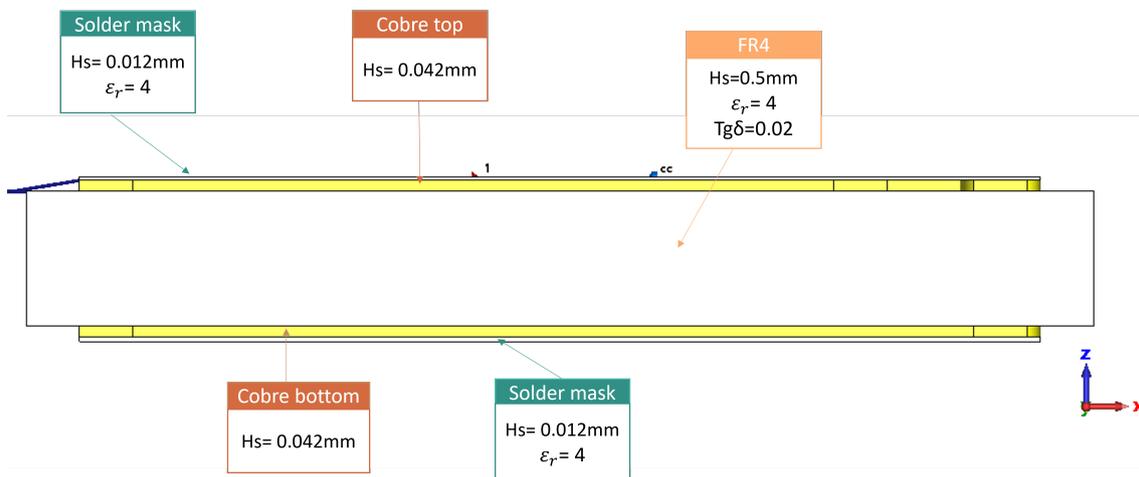
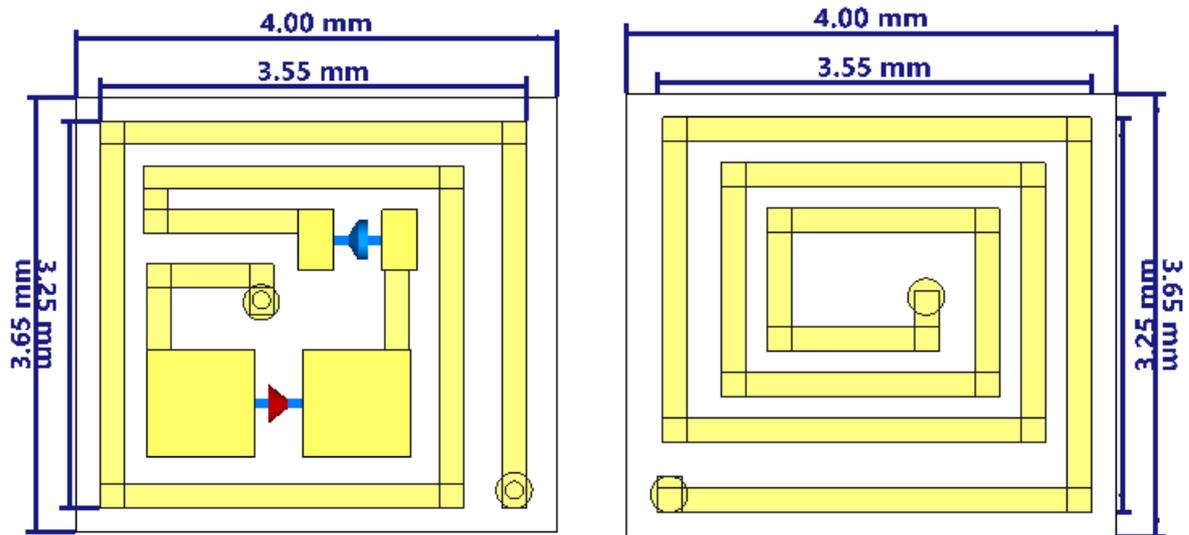


Figura 7.1: Estructura de las diferentes capas que forman la antena utilizando el sustrato FR4.

7.1. Prototipo con un grosor de línea de 0,2 mm

Se comienza diseñando el prototipo con un grosor de línea de 0,2 mm, en combinación con un condensador de valor 0,6 pF. En la Figura 7.2 se muestra el diseño definitivo con sus dimensiones. La impedancia de entrada de este diseño está optimizada para trabajar con el chip Murata 218. Se ha elegido este chip porque presenta una sensibilidad de lectura mejor que la del chip Murata 220.



(a) Capa superior con un grosor de línea de 0,2 mm (b) Capa inferior con un grosor de línea de 0,2 mm

Figura 7.2: Geometría de la antena para chip Murata 218 con un ancho de pista de 0,2 mm para la fabricación en la empresa Lab-Circuits.

En la Figura 7.3 se muestran los resultados de la impedancia obtenida tras la simulación, donde podemos observar que el resultado se acerca mucho a la impedancia del chip requerida, siendo la impedancia obtenida: $Z_a = 12,6 + j166,53 \Omega$.

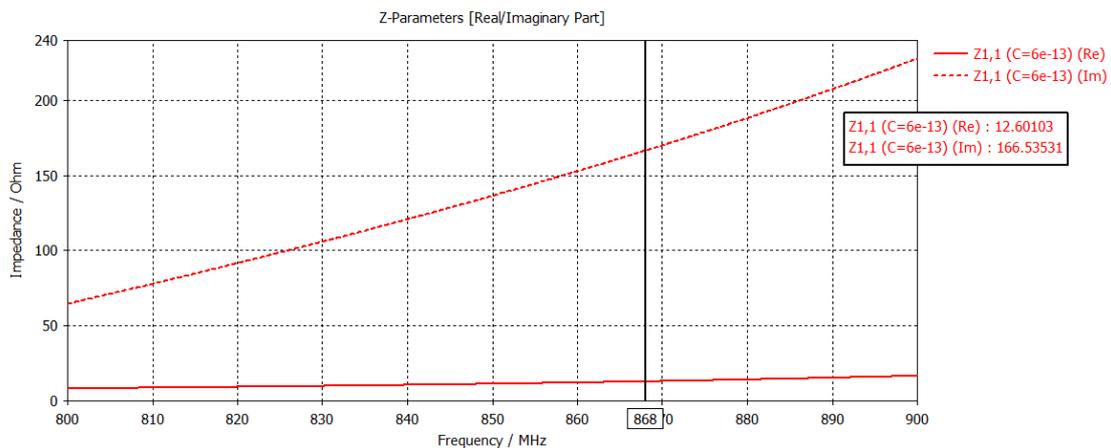


Figura 7.3: Impedancia de entrada obtenida con CST para un ancho de pista de 0,2 mm y un sustrato FR4.

En la Figura 7.4 se presenta el diagrama de radiación para la antena de la Figura 37. Como se puede comprobar, se consigue una eficiencia de radiación con un valor de $-33,61$ dB.

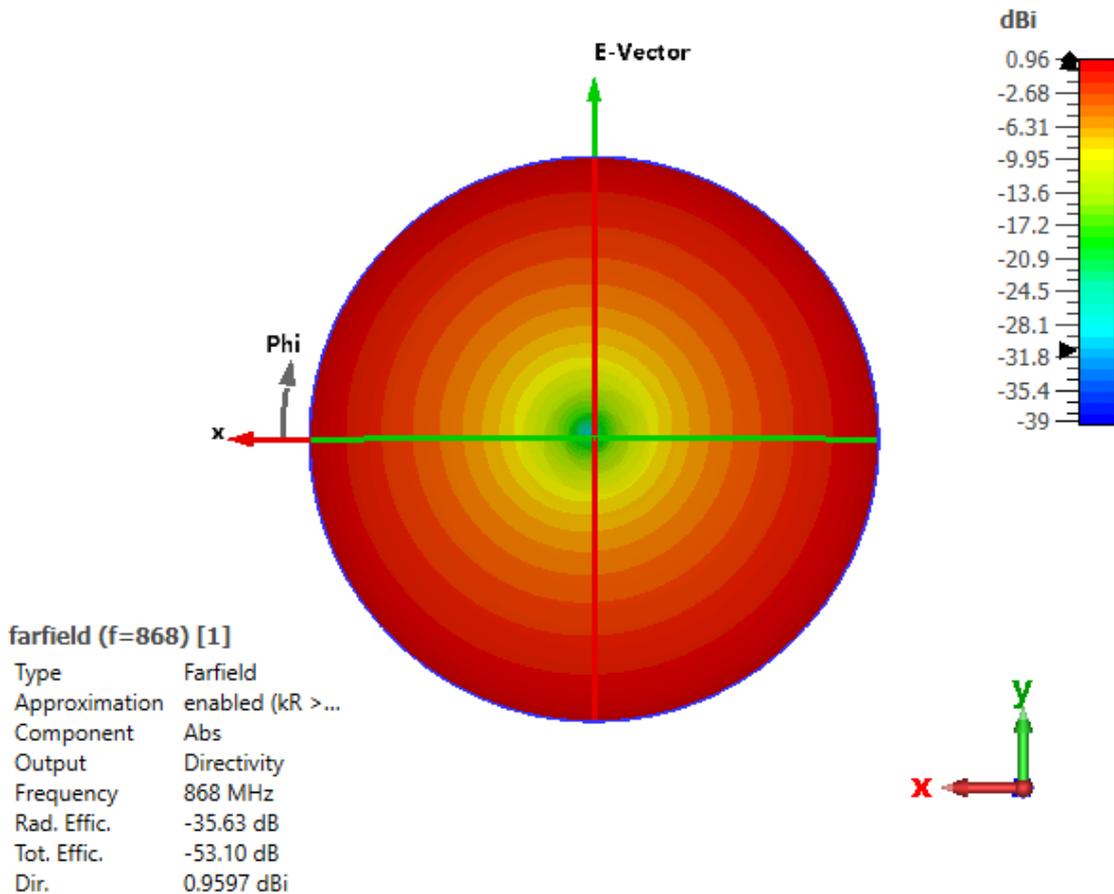
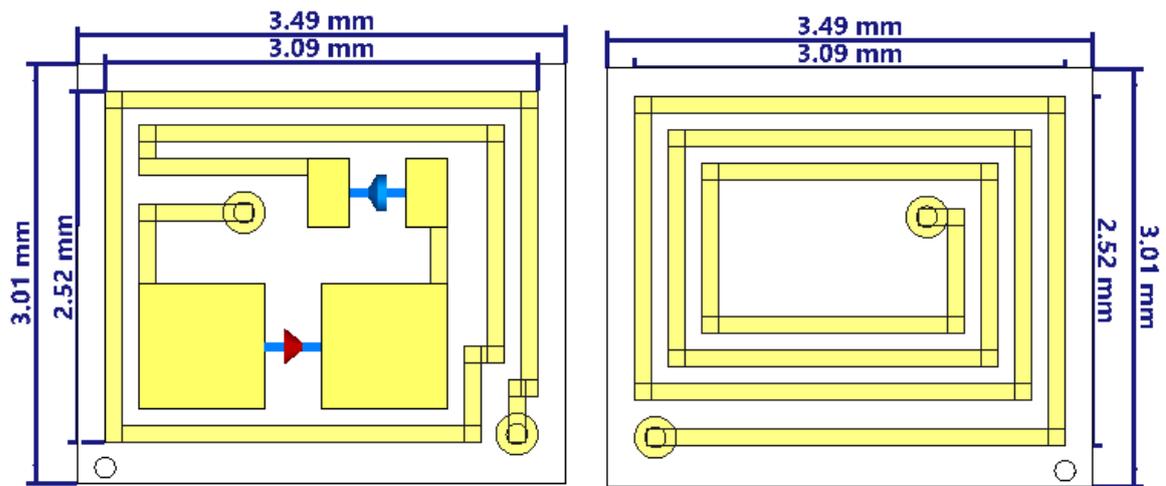


Figura 7.4: Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta a fabricar en Lab-Circuits con un ancho de pista de 0,2 mm.

7.2. Prototipo con un grosor de línea de 0,12 mm

También se optimiza también el diseño mostrado en la Figura 7.5, con las mismas características que el prototipo anterior, pero con un grosor de pista diferente. En este último diseño, se trabaja con pistas más finas, de grosor 0,12 mm y con un condensador de 0,5 pF. De esta manera se consigue una antena de dimensiones ligeramente inferiores ($3,49 \times 3$) a la presentada en la Figura 7.2.



(a) Capa superior con un grosor de línea de 0,12 mm (b) Capa inferior con un grosor de línea de 0,12 mm

Figura 7.5: Geometría de la antena con chip Murata 218 para fabricarla en empresa externa con grosor de línea de 0,12 mm.

En la Figura 7.6 se pueden observar los resultados del valor de impedancia obtenida tras la simulación de dicho diseño. Se obtiene un valor de impedancia de $Z_a = 12,17 + j144,12 \Omega$, que es bastante similar al valor de la impedancia del chip $Z_c = 13,4 - j126 \Omega$.

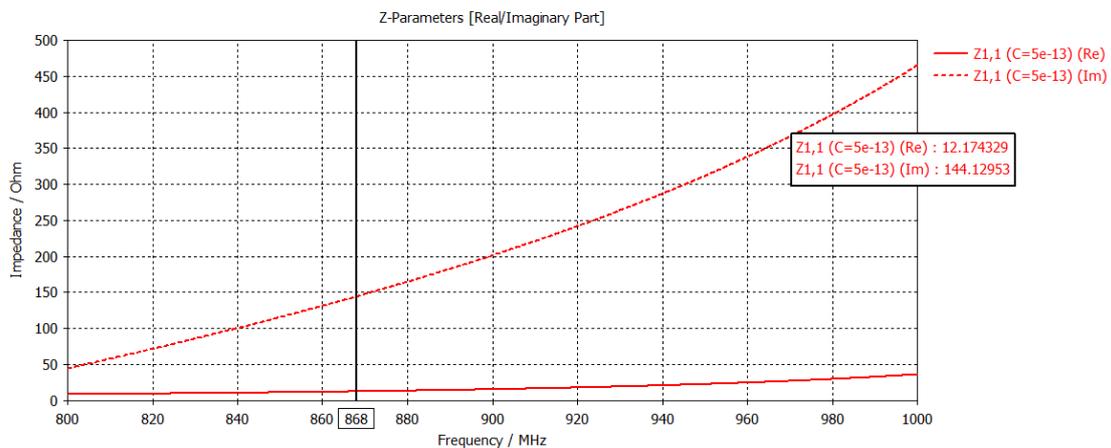


Figura 7.6: Valor de impedancia del diseño con líneas de 0.12 mm.

Tal y como se muestra en la Figura 7.7, con este último diseño obtenemos una eficiencia de radiación de valor $-35,63$ dB. El valor es 2 dB inferior al obtenido en la Figura 39, debido a que esta segunda antena tiene menores dimensiones

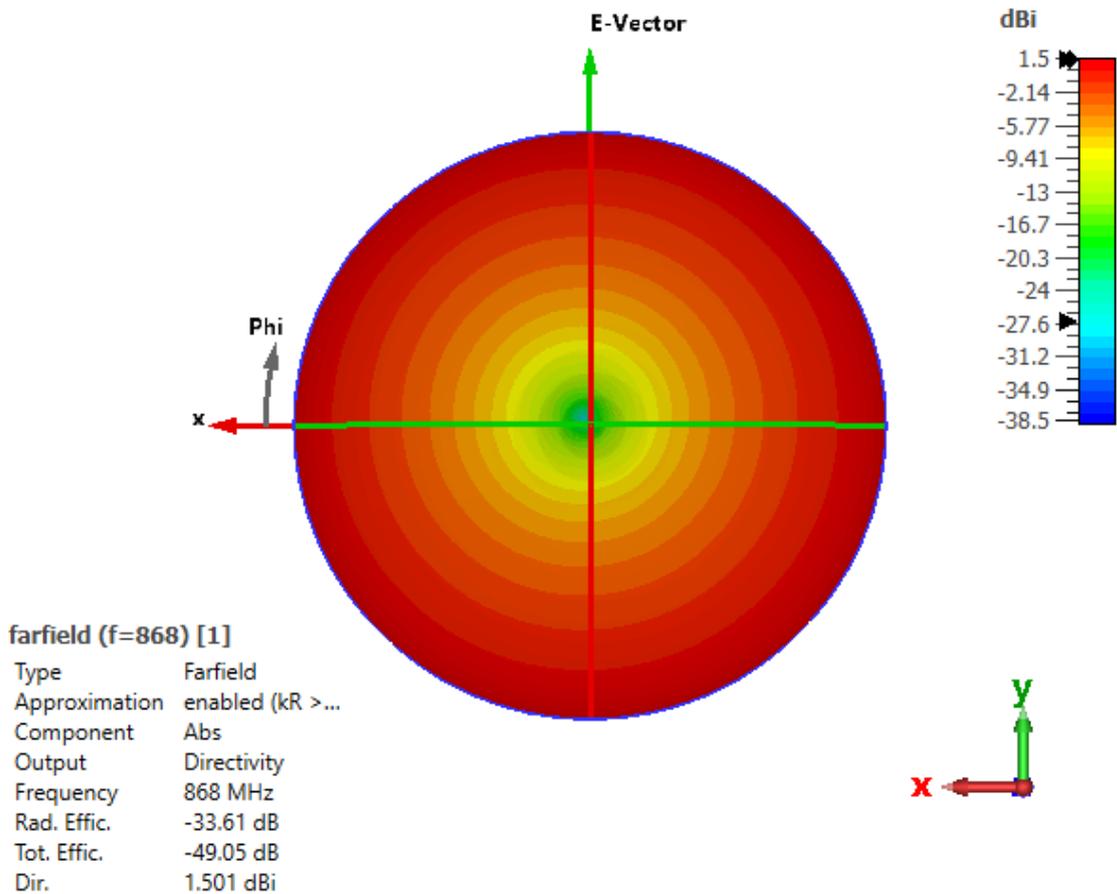


Figura 7.7: Diagrama de radiación a 868 MHz obtenido para la antena propuesta a fabricar en Lab-Circuits con un ancho de pista de 0,12mm.

7.3. Prototipos fabricados en una empresa externa

Finalmente, la Figura 7.8 muestra imágenes de las caras superior e inferior de los prototipos fabricados en Lab-Circuits, correspondientes a los diseños definitivos. En estos prototipos ya está soldado el chip Murata 218 y los correspondientes condensadores. Como se puede comprobar, la antena de la derecha presenta un tamaño ligeramente inferior a la de la izquierda.

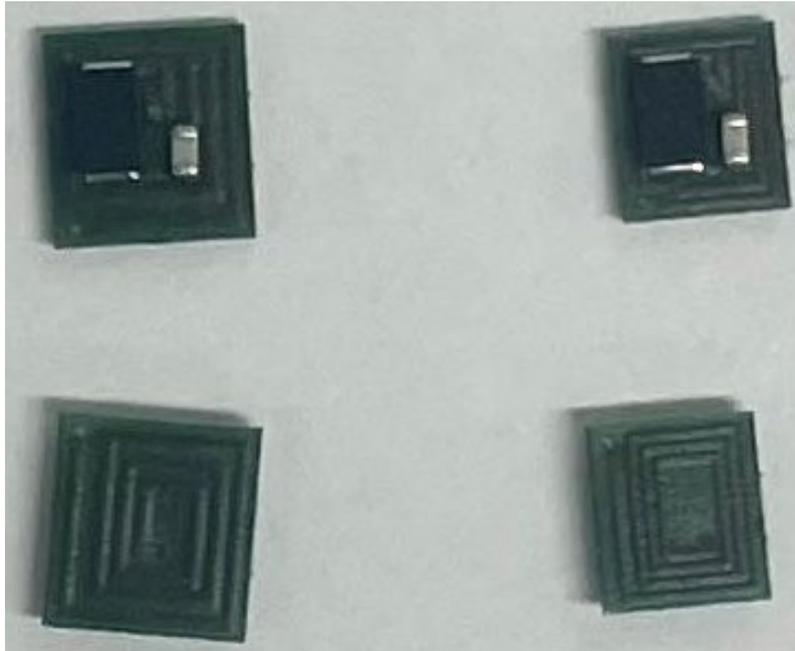


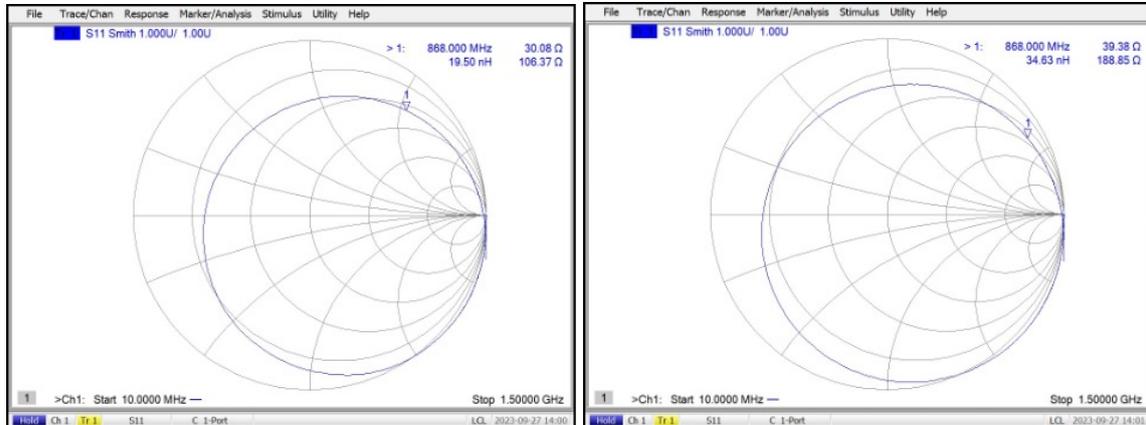
Figura 7.8: Prototipos finales de antena fabricados por Lab-Circuits sobre sustrato FR-4 y con protección de las pistas, incluyendo condensadores serie de adaptación y el chip Murata 218.

Además, también se ha medido y caracterizado el sistema final completo, con los prototipos de antenas definitivas fabricadas por Lab-Circuits y con el diseño final del lector. La Figura 7.9 muestra una imagen que permite comprobar el reducido tamaño del *tag* final y es espacio que ocupa una vez incorporado sobre el tórax de la abeja reina. Hay que destacar que los resultados obtenidos con el sistema final completo han sido muy positivos y ha sido posible detectar en el interior de la colmena tanto los *tags* más grandes, como los más pequeños.



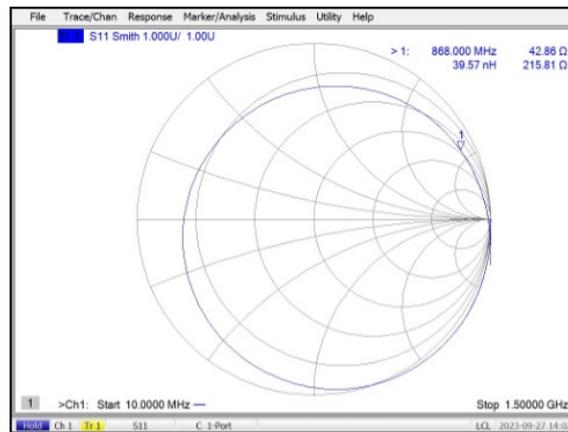
Figura 7.9: Integración del diseño de *tag* definitivo sobre una abeja reina.

A continuación, en la Figura 7.10 se muestran las medidas realizadas en el APL de la UPV para los *tags* grandes, es decir, el prototipo con dimensiones de $4 \times 3,65$.



(a) Condensador de 0,3 pF

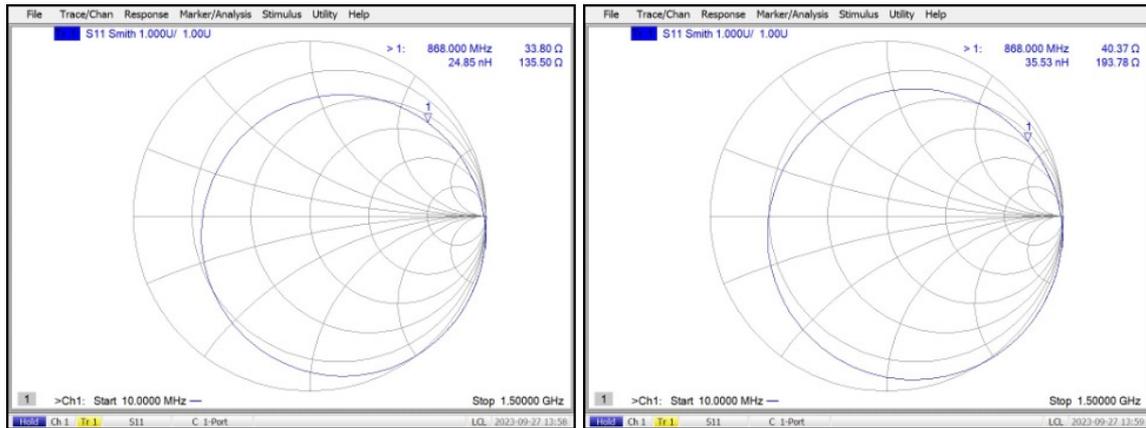
(b) Condensador de 0,4 pF



(c) Condensador de 0,5 pF

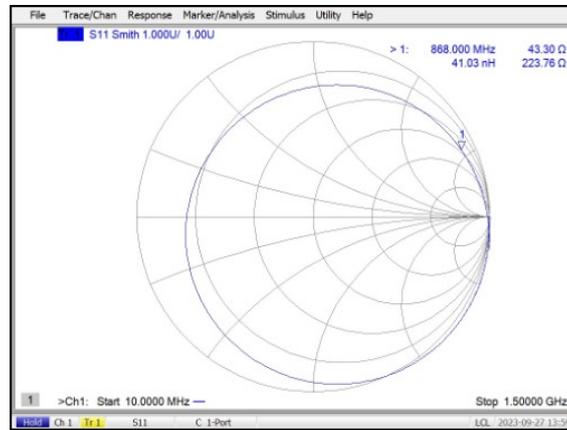
Figura 7.10: Resultados de impedancia con cartas de Smith para los *tags* grandes con tres valores diferentes de condensador.

En la Figura 7.11 se pueden observar las medidas de los *tags* pequeños.



(a) Condensador de 0,3 pF

(b) Condensador de 0,4 pF



(c) Condensador de 0,5 pF

Figura 7.11: Resultados de impedancia con cartas de Smith para los *tags* pequeños con tres valores diferentes de condensador.

Podemos observar en la siguiente Tabla 7.1 un resumen de todos los valores de impedancia medidas de los prototipos.

Tamaño del <i>tag</i>	Condensador (pF)	Impedancia de la antena (Ω) medida en real
4 × 3,65	0,3	30,08 + j106,37
4 × 3,65	0,4	39,38 + j188,85
4 × 3,65	0,5	42,86 + j215,81
3,49 × 3	0,3	33,80 + j135,50
3,49 × 3	0,4	40,37 + j193,78
3,49 × 3	0,5	43,30 + j223,76

Tabla 7.1: Tabla de valores de impedancia de la antena en simulación con CST y en medida real para ambos tipos de *tags*, con una variedad de valores de condensadores.

Tras realizar medidas en el laboratorio soldando condensadores de distintas capacidades, se ha comprobado que con la microantena más grande, la mayor cobertura se consigue con el condensador de 0,36 pF y para la microantena pequeña, con el condensador de 0,3 pF. Además, se comprueba que la parte imaginaria sí que se ajusta al valor deseado, sin embargo, la parte real es muy superior a los resultados obtenidos en el simulador CST.

7.3.1. Estudio de la cobertura

Se realizó un estudio de distancia máxima de lectura en dos entornos diferentes: en espacio libre y dentro de la colmena.

En el entorno de espacio libre se han tomado medidas de cobertura colocando la antena encima del panal. Para ello se ha utilizado el lector RFID descrito en la introducción. Este panal tiene unas dimensiones de 24×42 cm y se puede observar en la Figura 7.12

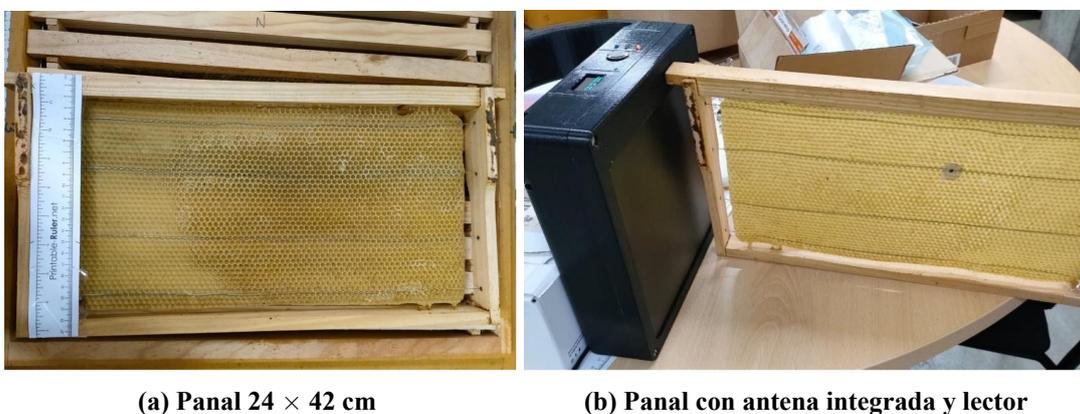


Figura 7.12: Panal y sus dimensiones y panal con la antena integrada, junto con el lector en el lateral para evaluar el alcance en espacio libre.

Después de realizar las mediciones, se obtienen valores en el panal para ambos tipos de *tags*: el grande de 0,36 pF y el pequeño de 0,3 pF. En la Figura 7.13a se puede comprobar que la antena está añadida entre los alambres, mientras que en la Figura 7.13b el *tag* está sobre uno de los alambres. Estos valores hacen referencia al indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI) en función de la distancia.

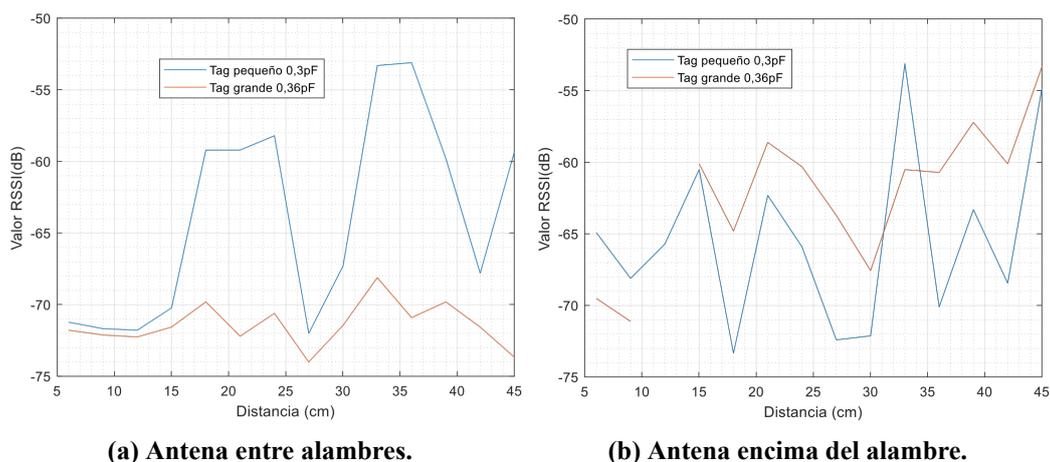


Figura 7.13: Valores de RSSI en función de la distancia, considerando la colmena completa en espacio libre.

Los resultados obtenidos, con la antena encima de un alambre, de distancias se pueden visualizar también en la siguiente Tabla 7.2:

Tamaño del tag	Condensador (pF)	Distancia máxima (cm)
$4 \times 3,65$	0,36	23
$3,49 \times 3$	0,3	17

Tabla 7.2: Resultados de distancias máximas de lectura para *tag* grande y pequeño en espacio libre.

En una colmena de 10 paneles se realizó un grupo de mediciones dentro de una cámara anecoica. El lector se colocó de cara a un lateral de la colmena y la microantena se colocó en distintas posiciones perpendicularmente al lector (ver Figura 7.14).

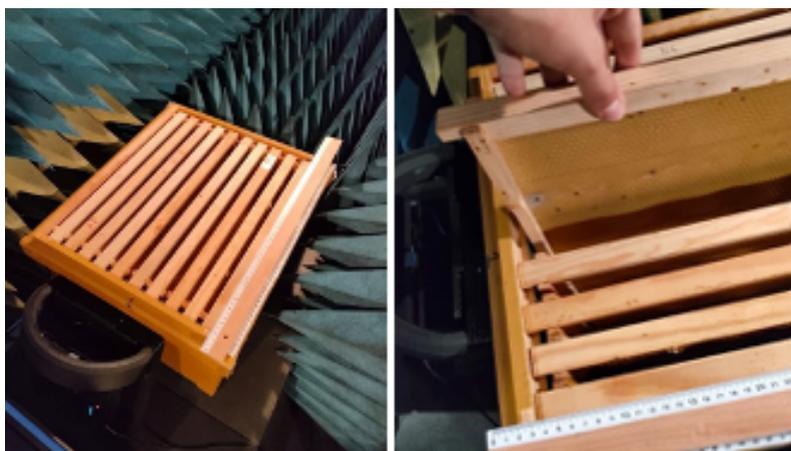


Figura 7.14: Colmena y colocación de la antena compacta dentro de un panel.

Se puede observar en la Figura 7.15 que existe un aumento significativo para el *tag* pequeño, esto se debe a que el chip pequeño esta mejor adaptado en impedancia. Además, dentro de la colmena existen cables metálicos que producen un mejor acoplamiento.

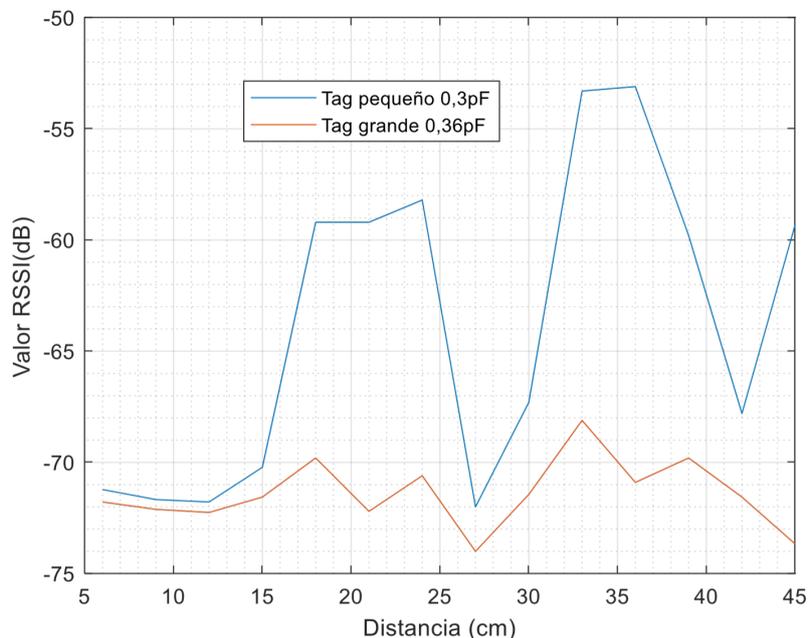


Figura 7.15: Valores RSSI obtenidos en una colmena con antena grande y con la pequeña dependiendo de la distancia.

Finalmente, se evidencia que la lectura de la distancia del *tag* llega hasta los 45 cm cuando se encuentra dentro del panal, lo cual se atribuye al efecto de incremento de cobertura que se logra al introducir estructuras con cables metálicos paralelos a la dirección de propagación de la señal RFID. La presencia de estos cables facilita el acoplamiento de la señal, permitiendo que viaje a lo largo de los hilos. El entorno de la colmena ayuda significativamente a la propagación eficiente de la señal.

Capítulo 8

Conclusiones y líneas futuras

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que se ha realizado un estudio exhaustivo sobre el diseño de una antena RFID para UHF con importantes limitaciones. Al no haber sido posible encontrar a nivel comercial un chip RFID que incluya la antena y tenga unas dimensiones lo suficientemente pequeñas como para ser implantado sobre una abeja, ha sido necesaria la realización de un diseño de antena plana a medida.

Se ha podido comprobar que con una topología de antena 3D con unas dimensiones de 3,5 mm x 3 mm, basada en una espira de dos vueltas distribuida a lo largo de la capa superior e inferior de un sustrato, se puede obtener una solución de antena compacta y con diagrama de radiación omnidireccional que es válida para la aplicación de localización de una abeja reina. Se debe tener en cuenta que este tipo de antenas presenta una impedancia de entrada de tipo inductivo y es necesario ajustar la longitud total de las pistas para poder conseguir el valor de inductancia buscado. Además, para maximizar la transferencia de potencia entre la antena y el chip de RF, es necesario que la antena presente una impedancia de entrada que sea compleja conjugada de la del chip.

Es un gran reto conseguir adaptación con este tipo de antenas, ya que cualquier modificación de la longitud de la espira afecta tanto a la parte real como a la parte imaginaria de la impedancia. Se ha podido comprobar que la adaptación de la antena se puede conseguir añadiendo un condensador en serie con la antena, siendo un inconveniente del espacio ocupado por el mismo, siendo solventado este problema gracias al rediseño de la geometría de la antena. Con esto se ha podido comprobar que es posible la inclusión de un condensador en serie en la misma geometría de la antena, favoreciendo la parte imaginaria de esta para conseguir el valor de la impedancia deseado.

Se han realizado diseños específicos para dos chips comerciales del fabricante Murata, u se ha comprobado que con la serie Murata 218 el alcance obtenido es mayor.

El principal problema corroborado son las dimensiones de la antena, ya que estas limitan la capacidad de radiación y es complicado, dado el volumen, obtener eficiencias de radiación por encima de -30 dBm.

Se ha corroborado que para obtener una eficiencia de radiación aceptable, las líneas de cobre deben tener un grosor de 0,2 mm aproximadamente, no menor, para que exista una mayor cobertura. Se debe tener en cuenta que cuando se compacta la antena y se reduce su tamaño, la eficiencia de radiación baja, no obstante, esta puede ser detectada dentro de la colmena con valores de eficiencia de radiación en torno a -33 dB como se ha podido analizar.

Asimismo, se puede deducir que si se emplean sustratos de grosor muy fino es imposible conseguir una buena adaptación de impedancia con los chips de Murata. La proximidad entre las capas de cobre superior e inferior hace que la antena se comporte de manera capacitiva en la banda de frecuencia de interés y por tanto, no es posible obtener una impedancia que sea la compleja conjugada de la del chip. Por este motivo, se ha destacado fabricar la antena sobre un sustrato flexible tipo poliamida.

Con respecto a las mediciones de lectura, se ha demostrado que en una colmena el dando de distancia de lectura aumentó a 45 cm. Se puede concluir, que la cobertura de etiquetas en un sistema RFID se puede aumentar cuando se colocan en estructuras que contienen cables metálicos paralelos a la dirección de propagación, como sucede cuando el *tag* se encuentra dentro de la colmena.

En relación con las futuras propuestas, es necesario la realización de un estudio exhaustivo del material utilizado para acoplar la antena a la abeja y evaluar su impacto a la hora de obtener resultados. Asimismo, resulta necesario realizar un análisis del efecto que tendría la presencia de la miel dentro de la colmena y su influencia en la detección. También, es importante evaluar el tamaño de la antena para mejorar la eficiencia de radiación. Se ha tenido la oportunidad de poder realizar varios prototipos reales, pero cabe destacar que el objetivo final radica en probar el funcionamiento de la antena dentro de la colmena, considerando todos los aspectos implicados en este proceso como son los hilos metálicos.

Tras un periodo de año y medio, y gracias a la subvención de prácticas que me han permitido dedicar tiempo completo a la contribución en este trabajo, se han logrado obtener diversas soluciones factibles para un proyecto innovador y de vital importancia para la apicultura, así como para la población.

Finalmente, me gustaría expresar mi gratitud por todo lo aprendido durante estos dieciocho meses y, por supuesto, por la colaboración y compromiso de mis tutores. También quiero agradecer a todo el equipo del APL, cuya colaboración fue fundamental para la fabricación de uno de los prototipos. Igualmente, agradezco a la Universidad de Cartagena por su participación en el proyecto. Gracias a este trabajo, se han generado diversos artículos aceptados en distintos congresos, entre ellos la URSI, EuCAP y el APS, donde he tenido el honor de ser primera autora en dos de ellos y presentar en el congreso de la URSI.

Bibliografía

- [1] Universidad de Córdoba. “Documento sin título”. En: *uco.es* (2024).
- [2] Fundación Aquae. “La importancia de las abejas en el mundo”. En: *Aquae Fundación* (2022).
- [3] Annie. “How to Mark a Queen Bee in 4 Simple Steps”. En: *beekeeping101.com* (2022).
- [4] L. Pérez-Beltrán et al. “Antena compacta basada en RFID de 868 MHz para la identificación y ubicación de abejas reinas”. En: *Unión Científica de Radio (URSI)* (2023).
- [5] L. Pérez-Beltrán et al. “Compact 868 MHz RFID-Baser Antenna for Queen Bee Identification and Location inside Hives”. En: *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (2024).
- [6] J. Lorenzo-López et al. “Coverage analysis of an RFID system for the identification and localization of a queen bee in a hive”. En: *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and ITNC-USNC-URSI Radio (APS)* (2024).
- [7] R. Bansal. “Coming soon to a Wal-Mart near you”. En: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 45.6 (2003), págs. 105-106. DOI: 10.1109/MAP.2003.1282186.
- [8] K.V.S. Rao, P.V. Nikitin y S.F. Lam. “Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 53.12 (2005), págs. 3870-3876. DOI: 10.1109/TAP.2005.859919.
- [9] Asimina Kiourti. “RFID Antennas for Body-Area Applications: From Wearables to Implants”. En: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 60.5 (2018), págs. 14-25. DOI: 10.1109/MAP.2018.2859167.
- [10] Universidad de Sevilla. “1. Introducción”. En: *biblus.us.es* (2024).
- [11] André G. Santiago, Carlos A. Fernandes y Jorge R. Costa. “Broadband UHF RFID passive tag antenna for near-body operation”. En: *2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*. 2012, págs. 271-274. DOI: 10.1109/RFID-TA.2012.6404528.
- [12] José Lorenzo Lopez. “Cobertura radioeléctrica en una colmena de un sistema RFID en la banda de UHF”. En: *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena* (2023).
- [13] Keonn. *Advantenna-SP11: High gain wide beam antenna*. 2024. URL: <https://keonn.com/components-product/advantenna-sp11/#>.
- [14] G. Manzi. “Use of transmission lines as near field antenna in UHF RFID”. En: *2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*. 2012, págs. 319-322. DOI: 10.1109/RFID-TA.2012.6404538.

- [15] Takafumi Fujimoto, Naoto Otsuka y Chai-Eu Guan. “A Compact and Broadband Circularly Polarized Printed Monopole Antenna for UHF RFID”. En: *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*. 2021, págs. 74-76. DOI: 10.1109/RFID-TA53372.2021.9617318.
- [16] A. Ghiotto, T. P. Vuong y K. Wu. “Novel design strategy for passive UHF RFID tags”. En: *2010 14th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the American Electromagnetics Conference*. 2010, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ANTEM.2010.5552539.
- [17] Paul S. Taylor y John C. Batchelor. “Finger-Worn UHF Far-Field RFID Tag Antenna”. En: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 18.12 (2019), págs. 2513-2517. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2941731.
- [18] Xiaoyong Shan y Zhongxiang Shen. “Miniaturized UHF/UWB Tag Antenna for Indoor Positioning Systems”. En: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 18.12 (2019), págs. 2453-2457. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2938808.
- [19] Zulma Y. Lopez, Zubair Akhter y Atif Shamim. “3D Printed RFID Tag Antenna Miniaturized Through Volumetric Folding and Slow-Wave Structures”. En: *IEEE Journal of Radio Frequency Identification* 6 (2022), págs. 164-175. DOI: 10.1109/JRFID.2022.3150873.
- [20] Murata. *lxtbkzmcmg-010*. 2023. URL: https://www.murata.com/~media/webrenewal/products/rfid/rfid/pdf/lxtbkzmcmg-010_datasheet_190716.ashx?la=en.
- [21] Murata. *lxms21acdm-220*. 2023. URL: <https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/rfid/rfid/pdf/lxms21acdm-220-datasheet.ashx?la=en&cvid=20221110040000000000>.
- [22] mouser. *lxms21acdm-220*. 2023. URL: <https://www.mouser.es/ProductDetail/Murata-Electronics/LXMS21ACMD-220?qs=hd1VzrDQEGjIk%252Ba52Yi0qw%3D%3D>.
- [23] Murata. *lxms21acdf-218*. 2023. URL: <https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/rfid/rfid/pdf/lxms21acmf-218-datasheet.ashx?la=en-gb&cvid=20221110040000000000>.