
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Campo Redondo, Ariadna. *Sistema chipless RFID de campo cercano basado en resonadores electromagnéticos*. Treball de Final de Grau (Universitat Autònoma de Barcelona), 2026 (Grau en Enginyeria Electrònica de Telecomunicació)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/336115>

under the terms of the  license.



TREBALL DE FI DE GRAU

GRAU EN ENGINYERIA DE SISTEMES DE TELECOMUNICACIÓ

SISTEMA CHIPLESS RFID DE CAMPO CERCANO BASADO EN RESONADORES ELECTROMAGNÉTICOS

Ariadna Campo Redondo

DIRECTOR/A: Ferran Paredes

DEPARTAMENTO: Area de Electrónica

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Bellaterra, 2026

Abstract

This thesis studies a near-field *chipless RFID* system based on electromagnetic resonators for the passive detection of metallic elements. The proposed approach replaces the integrated circuit used in conventional RFID tags with a low-cost passive electromagnetic structure, significantly reducing both the structural complexity and manufacturing cost of the system.

To this end, a review of the state of the art of RFID technologies is carried out, with particular emphasis on *chipless RFID* systems and, more specifically, on near-field architectures based on electromagnetic resonators. Based on this study, the operating principles governing the interaction between the reader and the tags are analysed, establishing the design criteria employed throughout the development of the system.

Subsequently, the electromagnetic design of a reader based on *slotline* technology is performed, together with the design of several tags encoded through the presence or absence of metallic elements. The behaviour of the proposed system is validated through electromagnetic simulations and, finally, prototypes of both the reader and the tags are fabricated and experimentally characterised.

The obtained results verify the capability of the system to detect the presence of metallic elements and to identify different tag configurations through the variations produced in the reader response. Furthermore, the potential of this technology for identification, proximity sensing and position measurement applications is evaluated, demonstrating the feasibility of near-field *chipless RFID* systems as a low-cost alternative for sensing and identification applications.

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado estudia un sistema *chipless RFID* de campo cercano basado en resonadores electromagnéticos para la detección pasiva de elementos metálicos. La propuesta sustituye el circuito integrado de las etiquetas RFID convencionales por una estructura electromagnética pasiva de bajo coste, permitiendo reducir de forma significativa tanto la complejidad de la estructura como el coste de fabricación.

Para ello, se realiza una revisión del estado del arte de las tecnologías RFID, prestando especial atención a los sistemas *chipless RFID* y, en particular, a las arquitecturas de campo cercano basadas en resonadores electromagnéticos. A partir de este estudio, se analizan los principios de funcionamiento que gobiernan la interacción entre el lector y las etiquetas, estableciendo los criterios de diseño empleados durante el desarrollo del sistema.

Posteriormente, se lleva a cabo el diseño electromagnético de un lector basado en tecnología *slotline*, así como de diferentes etiquetas codificadas mediante la presencia o ausencia de elementos metálicos. El comportamiento del sistema se valida mediante simulaciones electromagnéticas y, finalmente, se fabrican los prototipos del lector y de las etiquetas para su caracterización experimental.

Los resultados obtenidos permiten verificar la capacidad del sistema para detectar la presencia de elementos metálicos e identificar distintas configuraciones de etiquetas a partir de las variaciones producidas en la respuesta del lector. Asimismo, se evalúa el potencial de esta tecnología para aplicaciones de identificación, detección de proximidad y medida de posición, demostrando la viabilidad de los sistemas *chipless RFID* de campo cercano como una alternativa de bajo coste para aplicaciones de sensado e identificación.

Índice general

Abstract	I
Resumen	III
Lista de figuras	X
Lista de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Contexto y aplicaciones de la tecnología RFID	1
1.2. Limitaciones de los sistemas RFID tradicionales	2
1.3. Limitaciones del lector <i>chipless RFID</i> y del <i>tag</i>	3
1.4. Motivación del trabajo	3
1.5. Objetivos del TFG	4
2. Marco teórico	7
2.1. Sistemas RFID	7
2.2. Principios de funcionamiento de RFID	8
2.3. Clasificación de los sistemas RFID	9
2.4. Propagación electromagnética en sistemas RFID	11
2.4.1. Campo cercano	11
2.4.2. Campo lejano	12
2.5. Acoplamiento electromagnético en campo cercano	12

2.6. Sistemas <i>chipless RFID</i>	14
2.7. Sistemas <i>chipless</i> basados en resonadores	15
2.8. Sistemas <i>chipless</i> de campo cercano	15
2.8.1. Comparativa de soluciones existentes	16
2.9. Tecnología planar	17
2.9.1. Resonadores electromagnéticos	20
2.9.2. Principio de resonancia	20
2.9.3. Factor de calidad	20
2.9.4. Tipologías estudiadas	21
2.10. Parámetros de dispersión	24
2.11. Sensibilidad de resonadores frente a perturbaciones externas	25
3. Diseño del prototipo	27
3.1. Arquitectura general del sistema	27
3.2. Parámetros de diseño y requisitos	27
3.2.1. Frecuencia de operación	27
3.2.2. Dimensiones del resonador	27
3.2.3. Separación entre elementos	28
3.2.4. Condiciones de acoplamiento con la etiqueta	28
3.3. Diseño del lector	28
3.3.1. Elección del resonador propuesto mediante estudio de esquemáticos	28
3.3.2. Selección del sustrato	34
3.3.3. Diseño geométrico del lector	35
3.3.4. Optimización geométrica del lector	36
3.4. Diseño de las etiquetas	43
3.5. Resultados de la simulación	44
3.5.1. Etiqueta con codificación 1111111111	44
3.5.2. Etiqueta con codificación 1101111011	45

3.5.3. Comparación entre etiquetas	47
4. Fabricación y validación experimental	49
4.1. Tecnología de fabricación del prototipo	49
4.2. Materiales utilizados	50
4.3. Fabricación del lector	51
4.4. Fabricación de las etiquetas	53
4.5. Montaje experimental	53
4.6. Resultados experimentales	56
5. Conclusiones	61
5.1. Conclusiones principales	61
5.2. Resultados obtenidos	61
5.3. Limitaciones del sistema	62
6. Uso de herramientas de Inteligencia Artificial	65
Bibliografía	67

Índice de figuras

2.1. Representación conceptual del acoplamiento electromagnético entre lector y etiqueta en una configuración de campo cercano.	13
2.2. Distribución de los campos eléctrico (E) y magnético (H) en una estructura tipo microstrip.	18
2.3. Distribución de los campos eléctrico (E) y magnético (H) en una estructura tipo stripline.	18
2.4. Distribución de los campos eléctrico (E) y magnético (H) en una estructura tipo slotline.	19
2.5. Topología SRR.	22
2.6. Equivalente resonador SRR.	22
2.7. Topología ELC.	23
3.1. Esquemático de la topología SRR.	29
3.2. Esquemático de la topología ELC.	30
3.3. Simulación de la topología SRR.	31
3.4. Simulación de la topología ELC.	32
3.5. Simulación coeficiente de unitariedad de la topología SRR y ELC.	33
3.6. Definición del sustrato utilizado en la simulación.	35
3.7. Layout del lector empleado con topología SRR en forma cuadrada.	37
3.8. Desplazamiento frecuencial	37
3.9. Layout Resonador SRR de geometría cuadrada con dos anillos	37
3.10. Desplazamiento frecuencial ante la presencia de un metal	38

3.11. Comparativa entre misma topología con un anillo o con dos anillos	39
3.12. Layout del lector empleado con topología SRR rectangular.	40
3.13. Respuesta del lector en presencia y ausencia de metal	42
3.14. Esquemático empleado para realizar el análisis paramétrico de las etiquetas. . . .	44
3.15. Respuesta obtenida para la etiqueta 1111111111.	45
3.16. Respuesta obtenida para la etiqueta 1101111011.	46
3.17. Comparación entre las respuestas obtenidas para las etiquetas 1101111011 y 1010101010.	47
3.18. Etiquetas seleccionadas para su fabricación y validación experimental.	48
4.1. Layout final del lector utilizado para la generación de los archivos de fabricación.	50
4.2. Prototipo del lector visto por la parte posterior.	52
4.3. Prototipo del lector visto por la parte frontal.	52
4.4. Tags fabricados para la validación del sistema.	53
4.5. Montaje experimental utilizado para la validación del sistema.	54
4.6. Comparativa simulación con fabricación	55
4.7. Adquisición de datos de las tres etiquetas.	56
4.8. Adquisición de datos de las tres etiquetas.	57
4.9. Adquisición de datos de la etiqueta 1010101010	58

Índice de tablas

2.1. Comparativa de las principales tecnologías RFID según su frecuencia de operación.	9
2.2. Comparación entre códigos ópticos, sistemas RFID sin chip y sistemas RFID con chip. Adaptado de [3].	16
3.1. Resumen de propiedades de las topologías estudiadas.	33
3.2. Comparación entre diferentes sustratos utilizados en aplicaciones RF y microondas.	34
3.3. Comparación de las geometrías SRR analizadas.	40
3.4. Parámetros geométricos del lector.	41
4.1. Materiales y equipamiento utilizados durante la fabricación y validación experimental.	51

Capítulo 1

Introducción

La identificación automática de objetos constituye una necesidad fundamental en numerosos sectores industriales y comerciales. Aplicaciones como la gestión de inventarios, la trazabilidad de productos, el control logístico o la automatización industrial requieren sistemas capaces de almacenar y recuperar información de forma rápida, fiable y con una mínima intervención humana.

Durante las últimas décadas se han desarrollado diferentes tecnologías para satisfacer estas necesidades, entre las que destacan los códigos de barras, los códigos QR y los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID). Cada una de ellas presenta características particulares en términos de coste, capacidad de almacenamiento y distancia de lectura, lo que determina su idoneidad para cada aplicación.

Entre estas tecnologías, RFID ha adquirido una gran relevancia debido a las ventajas que ofrece frente a los sistemas ópticos convencionales. Sin embargo, la necesidad de reducir costes y aumentar la capacidad de implantación en aplicaciones de gran volumen ha impulsado la investigación de nuevas soluciones basadas en etiquetas pasivas de bajo coste, dando lugar al desarrollo de la tecnología *chipless RFID*.

El presente trabajo se centra en el estudio y desarrollo de un sistema RFID sin chip basado en resonadores electromagnéticos de campo cercano, analizando su funcionamiento, diseño y validación experimental como alternativa para aplicaciones de identificación y detección de bajo coste.

1.1. Contexto y aplicaciones de la tecnología RFID

La identificación automática de objetos permite asociar información a elementos físicos de forma sistemática, siendo especialmente relevante en sectores industriales y comerciales. Entre

las tecnologías utilizadas para este propósito destacan los códigos de barras ópticos, los códigos QR y los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID).

Los sistemas RFID permiten almacenar y recuperar información mediante señales electromagnéticas, estableciendo una comunicación inalámbrica entre un lector y una etiqueta asociada al objeto que se desea identificar. A diferencia de los sistemas ópticos convencionales, la tecnología RFID no requiere necesariamente una línea de visión directa entre el lector y la etiqueta, lo que proporciona una mayor flexibilidad de uso en numerosas aplicaciones.

Gracias a esta característica, RFID ha experimentado una amplia implantación en ámbitos como la gestión de inventarios, la trazabilidad de mercancías, el control de acceso, la identificación de activos industriales o los sistemas de transporte inteligente. La posibilidad de automatizar los procesos de identificación y reducir la intervención humana ha contribuido a convertir esta tecnología en una de las soluciones más utilizadas en aplicaciones de seguimiento y localización.

No obstante, la adopción masiva de la tecnología RFID se encuentra condicionada por factores como el coste de fabricación de las etiquetas, la capacidad de almacenamiento de información y las prestaciones del sistema de lectura. Estos aspectos han impulsado el desarrollo de nuevas soluciones orientadas a mantener las ventajas de RFID reduciendo al mismo tiempo su coste de implementación.

1.2. Limitaciones de los sistemas RFID tradicionales

Los sistemas RFID tradicionales basados en chip de silicio presentan como principal limitación el coste de fabricación de las etiquetas. Aunque estos sistemas ofrecen ventajas frente a los códigos ópticos, la incorporación de un circuito integrado incrementa el coste de producción.

Además del propio chip, otros elementos asociados a la etiqueta, como el encapsulado y la antena, también contribuyen al aumento del coste final. Esta limitación dificulta el despliegue masivo de la tecnología RFID convencional en aplicaciones donde se requiere un coste unitario reducido.

Por este motivo, resulta necesario estudiar alternativas que permitan reducir la complejidad de la etiqueta. La tecnología *chipless RFID* aparece como una solución orientada a eliminar el circuito integrado y sustituirlo por una estructura electromagnética pasiva impresa sobre un material de bajo coste.

1.3. Limitaciones del lector *chipless RFID* y del *tag*

Pese a que los lectores *chipless RFID* constituyen una alternativa de bajo coste frente a las etiquetas RFID convencionales, ya que eliminan la necesidad de incorporar un circuito integrado, presentan limitaciones frente al *chipped RFID*.

Una de las principales limitaciones de las etiquetas *chipless RFID* está relacionada con su capacidad de codificación. A diferencia de los sistemas RFID convencionales, en los que la información se almacena en un circuito integrado, las etiquetas *chipless RFID* codifican la información mediante características físicas de su estructura electromagnética, tales como resonancias en frecuencia, variaciones temporales o modificaciones geométricas. Como consecuencia, el número de bits que pueden almacenarse y transmitirse se encuentra directamente condicionado por las dimensiones físicas de la etiqueta y por la capacidad del lector para distinguir de forma fiable entre los diferentes estados codificados.

Con el objetivo de aumentar la densidad de información, una posible estrategia consiste en reducir la separación entre los bits codificados dentro de la etiqueta. Sin embargo, esta reducción del espacio disponible para cada símbolo provoca un mayor acoplamiento entre elementos adyacentes y una disminución de las variaciones electromagnéticas asociadas a cada bit. Como resultado, la amplitud de la señal retrodispersada tiende a reducirse, dificultando la identificación de los cambios de estado durante el proceso de lectura.

Por tanto, existe un compromiso entre la capacidad de almacenamiento de información y la fiabilidad de detección. Aunque una mayor densidad de bits permite incrementar la cantidad de información codificada en una misma superficie, también puede degradar la calidad de la señal recibida y aumentar la probabilidad de errores en la decodificación. En consecuencia, el diseño de etiquetas *chipless RFID* requiere alcanzar un equilibrio adecuado entre tamaño físico, capacidad de codificación y robustez del sistema de lectura.

1.4. Motivación del trabajo

La motivación principal de este trabajo surge de la necesidad de estudiar soluciones de detección pasivas, compactas y de bajo coste. En particular, los resonadores electromagnéticos de campo cercano presentan interés debido a su capacidad para detectar perturbaciones producidas por objetos situados en su entorno.

La presencia de elementos metálicos próximos modifica la distribución del campo electromagnético generado por la estructura resonante. Esta modificación afecta a la respuesta del sistema, permitiendo detectar la presencia de dichos elementos mediante variaciones medibles.

Además, la detección secuencial de múltiples elementos metálicos distribuidos espacialmente

permite plantear aplicaciones de medida de posición o desplazamiento. Este principio presenta similitudes con los códigos de barras electromagnéticos y con los encoders lineales o rotativos.

Por tanto, el trabajo se centra en el desarrollo y estudio de un sistema basado en resonadores electromagnéticos de campo cercano, con el objetivo de evaluar su potencial en aplicaciones industriales y de automatización.

1.5. Objetivos del TFG

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es diseñar, simular, fabricar y validar experimentalmente un sistema de lectura basado en tecnología *chipless RFID* de campo cercano capaz de detectar la presencia o ausencia de elementos metálicos mediante perturbaciones electromagnéticas producidas sobre un resonador. El sistema propuesto se basa en un lector resonante que permite identificar diferentes configuraciones de etiquetas pasivas (*tags*) mediante la detección de patrones metálicos situados en su proximidad.

Además de su aplicación como sistema de identificación, se pretende evaluar el potencial del dispositivo para otras aplicaciones como la detección de proximidad y la medida de posición o desplazamiento mediante el recuento secuencial de elementos metálicos distribuidos espacialmente.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el comportamiento electromagnético de las estructuras resonantes empleadas.
- Analizar la influencia de los parámetros geométricos sobre la frecuencia de resonancia y la sensibilidad del sistema.
- Comparar diferentes topologías de resonadores y seleccionar la más adecuada para la aplicación propuesta.
- Diseñar y simular un lector *chipless RFID* de campo cercano.
- Diseñar diferentes etiquetas basadas en patrones metálicos para la codificación de información.
- Fabricar el prototipo del lector y las etiquetas propuestas.
- Validar experimentalmente el funcionamiento del sistema mediante medidas de laboratorio.
- Evaluar la capacidad del lector para diferenciar correctamente las distintas etiquetas diseñadas.

-
- Analizar el potencial del sistema como detector de presencia metálica, sensor de proximidad y sistema de posicionamiento.
 - Desarrollar una solución de bajo coste susceptible de ser utilizada en aplicaciones industriales y de automatización.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Sistemas RFID

Los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) convencionales, basados en etiquetas con circuito integrado, constituyen actualmente una de las tecnologías más extendidas en aplicaciones de identificación automática. Estos sistemas están formados por un lector, encargado de generar y recibir las señales de radiofrecuencia, y una etiqueta asociada al objeto que se desea identificar. La etiqueta incorpora habitualmente una antena y un circuito integrado encargado de almacenar y gestionar la información transmitida al lector.

Gracias a esta arquitectura, los sistemas RFID con chip ofrecen prestaciones superiores a las de otras tecnologías de identificación, como los códigos de barras o los códigos QR. Entre sus principales ventajas destacan la posibilidad de realizar lecturas sin necesidad de línea de visión directa, la capacidad de almacenar una mayor cantidad de información, la identificación simultánea de múltiples etiquetas y la posibilidad de operar a distancias de lectura relativamente elevadas, especialmente en sistemas que trabajan en las bandas UHF y de microondas.

Estas características han favorecido la implantación de la tecnología RFID en numerosos ámbitos, entre los que se incluyen la gestión logística, el control de inventarios, la trazabilidad de productos, los sistemas de transporte, el control de accesos y la automatización industrial. Como consecuencia, los sistemas RFID con chip se han consolidado como una solución madura y ampliamente utilizada para la identificación automática de objetos.

Sin embargo, diversos autores señalan que el principal factor que limita la expansión de esta tecnología en aplicaciones de muy bajo coste es el precio asociado a la etiqueta [3]. Aunque el coste de los circuitos integrados ha disminuido considerablemente durante las últimas décadas, la fabricación de la etiqueta sigue requiriendo procesos de ensamblaje, encapsulado e integración de la antena, lo que incrementa el coste final del dispositivo.

Por este motivo, durante los últimos años han surgido diferentes líneas de investigación orientadas a reducir la complejidad de las etiquetas RFID convencionales. Entre ellas destaca la tecnología *chipless RFID*, cuyo objetivo es eliminar el circuito integrado y sustituirlo por estructuras electromagnéticas pasivas capaces de almacenar información sin necesidad de componentes electrónicos activos. Esta aproximación permite reducir significativamente el coste de fabricación y constituye una de las principales áreas de investigación dentro del campo de la identificación por radiofrecuencia.

2.2. Principios de funcionamiento de RFID

La identificación por radiofrecuencia (RFID) es una tecnología inalámbrica que permite la identificación automática de objetos mediante señales electromagnéticas. Un sistema RFID típico se compone de tres elementos fundamentales: el lector, encargado de generar y recibir las señales; la etiqueta (*tag*), que contiene la información asociada al objeto; y el sistema de procesamiento de datos, responsable de interpretar y gestionar la información obtenida.

En comparación de los sistemas ópticos, como podrían ser un código de barras o un código QR, la tecnología RFID no requiere una línea de visión directa entre el lector y la etiqueta. Esto permite realizar la lectura aunque la etiqueta se encuentre oculta o situada detrás de otros materiales. Además, es posible leer varias etiquetas de forma simultánea, lo que es ideal para aplicaciones industriales.

El funcionamiento del sistema se basa en la interacción electromagnética entre el lector y la etiqueta. El lector genera una señal de radiofrecuencia (RF) que se irradia al entorno a través de una antena. Cuando esta señal alcanza la etiqueta, se produce un acoplamiento electromagnético que permite tanto la transferencia de energía como el intercambio de información.

En sistemas RFID convencionales con chip, la etiqueta incorpora un circuito integrado que modula la señal incidente y la refleja de vuelta al lector. Este proceso se conoce como retrodispersión (*backscatter*), y consiste en modificar las características de la onda reflejada para codificar la información.

En los sistemas RFID sin chip, la información no se almacena en el circuito integrado, sino que se asocia a la respuesta electromagnética de la estructura resonante. Como consecuencia, la identificación o detección de la etiqueta se realiza mediante el análisis de las variaciones observadas en la señal electromagnética medida por el lector.

2.3. Clasificación de los sistemas RFID

Los sistemas RFID pueden clasificarse en función de varios criterios, como la banda de operación, el mecanismo de alimentación de la etiqueta, la distancia de lectura y el tipo de acoplamiento electromagnético utilizado.

Por un lado, en función de la banda de operación, podemos diferenciar entre diferentes bandas de frecuencia debido a su influencia directa en parámetros como la distancia de lectura, la velocidad de transmisión o la sensibilidad frente al entorno de operación.

En general, a medida que aumenta la frecuencia de operación también aumenta la velocidad de transmisión y la distancia máxima de lectura. Sin embargo, las frecuencias más elevadas suelen verse más afectadas por la presencia de obstáculos o materiales dieléctricos. Por el contrario, las bandas de frecuencia más bajas presentan alcances más reducidos, aunque ofrecen una mayor robustez frente a este tipo de perturbaciones.

La Tabla 2.1 recoge una comparación entre las principales tecnologías RFID utilizadas actualmente según su banda de operación.

Tabla 2.1: Comparativa de las principales tecnologías RFID según su frecuencia de operación.

Tecnología	Frecuencia	Alcance	Velocidad	Aplicaciones típicas
LF	125 kHz	Baja	Baja	Identificación animal, control de acceso
HF	13.56 MHz	Media	Media	Tarjetas inteligentes, NFC y ticketing
UHF	860–960 MHz	Alta	Alta	Logística, trazabilidad e inventariado
Microondas	> 2.45 GHz	Alta	Muy alta	Peajes, localización y aplicaciones específicas

A partir de la Tabla 2.1, puede observarse que los sistemas LF y HF se emplean principalmente en aplicaciones de corto alcance. Aunque presentan velocidades de transmisión reducidas, ofrecen una comunicación robusta y son ampliamente utilizados en sistemas de control de acceso, identificación animal o tarjetas inteligentes.

Por otro lado, los sistemas UHF permiten aumentar considerablemente la distancia de lectura y la velocidad de transmisión, motivo por el cual constituyen actualmente la tecnología más utilizada en aplicaciones de logística e inventariado.

Finalmente, las tecnologías basadas en microondas permiten alcanzar velocidades de trans-

misión todavía mayores y son utilizadas en aplicaciones específicas donde se requiere una elevada capacidad de intercambio de información.

En general, existe un compromiso entre alcance, velocidad de transmisión y complejidad del sistema, por lo que la banda de operación debe seleccionarse en función de los requisitos de cada aplicación.

En función del método de alimentación utilizado, las etiquetas RFID pueden clasificarse en activas, pasivas y semipasivas. Esta clasificación influye directamente en aspectos como la distancia de lectura, el coste de fabricación o la complejidad del propio sistema.

Las etiquetas activas incorporan una batería interna que alimenta los circuitos electrónicos de la etiqueta. Gracias a ello, pueden transmitir señales con mayor potencia y alcanzar distancias de lectura superiores a las de otros tipos de etiquetas. Sin embargo, la utilización de una fuente de alimentación propia aumenta tanto el tamaño como el coste del dispositivo, además de requerir tareas de mantenimiento asociadas a la sustitución de la batería.

Por otro lado, las etiquetas pasivas no disponen de ninguna fuente de alimentación interna, sino que obtienen la energía necesaria para su funcionamiento a partir del campo electromagnético generado por el lector. Esta característica permite fabricar dispositivos de pequeño tamaño y bajo coste, motivo por el cual son ampliamente utilizados en aplicaciones de identificación, trazabilidad y control logístico. Como inconveniente, presentan una distancia de lectura más reducida y unas prestaciones más limitadas.

Finalmente, las etiquetas semipasivas constituyen una solución intermedia entre las dos arquitecturas anteriores. En este caso, la batería se utiliza para alimentar parte de la electrónica interna de la etiqueta, mientras que la comunicación con el lector continúa realizándose mediante retrodispersión. Esto permite mejorar determinadas prestaciones sin llegar a alcanzar la complejidad de los sistemas activos.

En aplicaciones donde se busca minimizar el coste de fabricación, como ocurre en los sistemas chipless RFID, las etiquetas pasivas resultan especialmente interesantes debido a que no requieren elementos de alimentación y pueden implementarse mediante estructuras impresas sobre sustratos de bajo coste.

Para este trabajo, la clasificación más relevante es la que distingue entre sistemas de campo cercano y sistemas de campo lejano, ya que determina el mecanismo físico dominante en la interacción entre lector y etiqueta.

2.4. Propagación electromagnética en sistemas RFID

El mecanismo de comunicación entre el lector y la etiqueta depende en gran medida de la región electromagnética en la que se produce la interacción. En función de ello, los sistemas RFID pueden operar en campo cercano o en campo lejano, presentando características de funcionamiento significativamente diferentes.

2.4.1. Campo cercano

En el caso de campo cercano, corresponde a la región situada en las proximidades de la estructura, por lo general a una distancia inferior a:

$$r < \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.1)$$

En esta zona de trabajo, los campos electromagnéticos permanecen ligados a la fuente que los genera y la energía no se propaga en forma de onda radiada.

Como consecuencia de ello, la interacción entre dos elementos próximos no depende únicamente de la energía transmitida entre ellos, sino también de cómo se modifican los campos electromagnéticos presentes alrededor de la estructura. Esto provoca que la respuesta del sistema sea muy sensible a cualquier cambio que se produzca en las proximidades del resonador.

La presencia de materiales conductores o dieléctricos cerca de la estructura altera la distribución de los campos eléctricos y magnéticos, modificando parámetros como la frecuencia de resonancia, la amplitud de la señal o el factor de calidad. Además, cuanto mayor sea la concentración de campo en una determinada zona, mayor será el efecto que tendrán estas perturbaciones sobre la respuesta medida.

Esta elevada sensibilidad es una de las características más interesantes de los sistemas basados en campo cercano. En este tipo de sistemas, la información no se obtiene a partir de una señal reflejada a larga distancia, sino mediante las variaciones que experimenta una estructura resonante cuando interactúa con elementos situados en su entorno inmediato. De esta forma, es posible detectar cambios locales a través de las modificaciones que aparecen en la respuesta electromagnética del resonador.

En el sistema desarrollado en este trabajo, este principio se emplea para detectar la presencia o ausencia de elementos metálicos sobre la etiqueta chipless RFID. Cuando una de estas zonas metálicas atraviesa la región de máxima sensibilidad del lector, se produce una perturbación de los campos electromagnéticos que altera la respuesta resonante de la estructura. Analizando estas variaciones es posible reconstruir la secuencia binaria asociada a la etiqueta y realizar su identificación.

2.4.2. Campo lejano

El funcionamiento en campo lejano se establece respecto a la estructura transmisora o antena utilizada por el lector. En esta región, los campos eléctricos y magnéticos se desacoplan de la fuente y se propagan conjuntamente en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio.

Su comunicación en este caso se basa en la transmisión y recepción de energía radiada permitiendo alcanzar distancias de lectura elevadas. A medida que aumenta la distancia de lectura, la intensidad de los campos electromagnéticos disminuye, lo que provoca una reducción de la sensibilidad. Por este motivo, las configuraciones basadas en campo lejano no resultan las más adecuadas para el objetivo de este trabajo.

2.5. Acoplamiento electromagnético en campo cercano

Como consecuencia, la interacción entre el lector y la etiqueta se produce mediante mecanismos de acoplamiento electromagnético. En función de la frecuencia de operación y de la geometría del resonador, este acoplamiento puede presentar una componente predominante inductiva o capacitiva.

La Figura 4.1 muestra de forma esquemática la interacción electromagnética existente entre el lector y la etiqueta. Cuando ambos elementos se encuentran dentro de la región de campo cercano, los campos generados por el lector interactúan directamente con la etiqueta, produciendo modificaciones en la respuesta electromagnética del sistema.

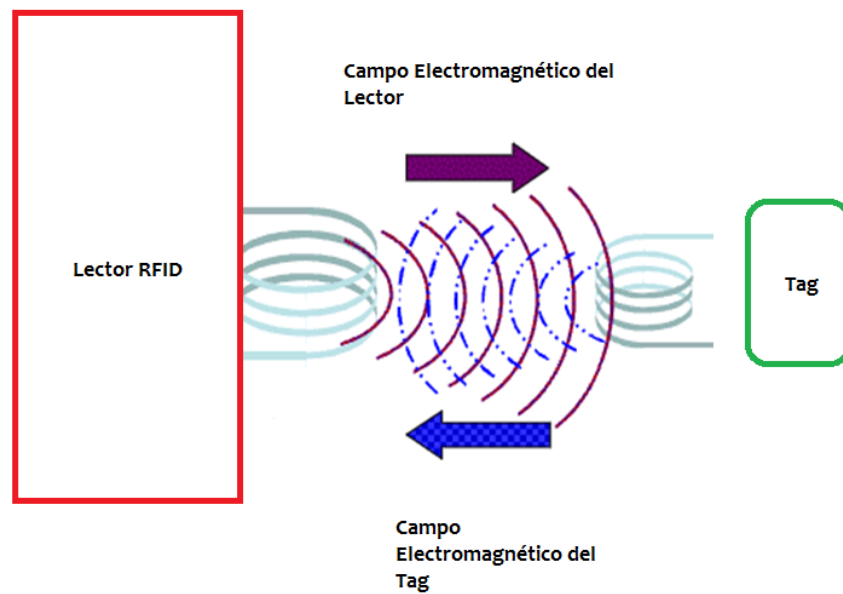


Figura 2.1: Representación conceptual del acoplamiento electromagnético entre lector y etiqueta en una configuración de campo cercano.

Cabe destacar que los sistemas de campo cercano aprovechan la concentración de energía existente de la estructura transmisora, lo que permite que las pequeñas perturbaciones modifiquen significativamente la distribución de los campos electromagnéticos. Estas variaciones se traducen en cambios medibles en parámetros como la frecuencia de resonancia, la amplitud de la respuesta o los parámetros de dispersión del sistema.

En las estructuras resonantes, la presencia de elementos conductores en sus proximidades puede modificar la distribución de corrientes y campos electromagnéticos. Como consecuencia, se producen cambios en parámetros como la frecuencia de resonancia o la amplitud de la señal medida. Este comportamiento es el que permite utilizar resonadores electromagnéticos en aplicaciones de sensado e identificación.

Gracias a esta sensibilidad, las estructuras resonantes de campo cercano pueden emplearse en aplicaciones como la detección de metales, sistemas de proximidad o sistemas de posicionamiento. En el caso de este trabajo, la presencia o ausencia de material metálico sobre la etiqueta chipless RFID produce una perturbación diferente sobre el resonador lector. Analizando los cambios que aparecen en la respuesta del resonador, es posible reconstruir la secuencia binaria asociada a la etiqueta y llevar a cabo su identificación.

2.6. Sistemas *chipless RFID*

Con el objetivo de mitigar las limitaciones financieras asociadas al chip de silicio, se han impulsado el desarrollo de la tecnología RFID sin chip. En esta tecnología se substituye el chip de silicio por un codificador o dispersor (*scatterer*) electromagnético plano integrado directamente sobre un sustrato de bajo coste.

En función del dominio físico empleado para el almacenamiento y lectura de la información, los sistemas *chipless* se clasifican en tres categorías.

La primera categoría correspondería a los sistemas RFID basados en dominio frecuencial, donde la información se codifica mediante resonadores sintonizados a diferentes frecuencias. Cada resonador genera una respuesta específica en la señal electromagnética, de forma que el conjunto de resonancias constituye una firma espectral asociada a la etiqueta. Este enfoque presenta una implementación relativamente sencilla, aunque la capacidad de almacenamiento se encuentra limitada por el ancho de banda necesario para separar correctamente cada resonancia.

La segunda categoría corresponde a los sistemas basados en dominio temporal. En este caso, la información se codifica en función de la posición temporal de determinadas respuestas o reflexiones generadas por la etiqueta. Estos sistemas suelen utilizar líneas de retardo o estructuras distribuidas, permitiendo reducir el ancho de banda requerido respecto a los sistemas frecuenciales. Sin embargo, presentan limitaciones relacionadas con el tamaño físico de las estructuras y con la resolución temporal necesaria para evitar solapamientos entre señales.

Dentro de los sistemas basados en el dominio temporal, se incluyen los sistemas basados en secuencias espaciales de elementos resonantes. En estas configuraciones, la información no se asocia a una frecuencia concreta si no a la posición relativa de los elementos que constituyen la etiqueta.

De esta forma, cuando la etiqueta se desplaza respecto al lector, cada elemento genera una perturbación individual permitiendo obtener un patrón y pudiendo aplicar este principio en aplicaciones de detección de posicionamiento.

Finalmente, existen los sistemas híbridos, que combinan diferentes mecanismos de codificación, como frecuencia, amplitud o fase, con el objetivo de aumentar la capacidad de almacenamiento y mejorar la densidad de información. Aunque estos sistemas permiten obtener mejores prestaciones, también incrementan considerablemente la complejidad tanto del diseño de la etiqueta como del sistema lector.

2.7. Sistemas *chipless* basados en resonadores

Dentro de las diferentes tecnologías *chipless RFID*, los sistemas basados en resonadores electromagnéticos han adquirido una especial relevancia debido a su sencillez de fabricación y a su capacidad para generar respuestas claramente identificables. A diferencia de los sistemas RFID convencionales, en los que la información se almacena en un circuito integrado, los sistemas basados en resonadores permiten codificar información mediante las propiedades electromagnéticas de estructuras pasivas impresas sobre un sustrato dieléctrico [3].

Entre las estructuras más utilizadas destacan los resonadores de anillo partido (*Split Ring Resonators*, SRR) y sus versiones complementarias (*Complementary Split Ring Resonators*, CSRR) cuya respuesta depende de parámetros geométricos y de las propiedades electromagnéticas del entorno.

Una de las principales ventajas de los sistemas basados en resonadores es la posibilidad de utilizar la respuesta resonante como mecanismo de codificación de información. En determinadas arquitecturas, cada resonador se diseña para resonar a una frecuencia concreta, de forma que la presencia o ausencia de una resonancia permite representar un bit de información. Este principio ha dado lugar a numerosas etiquetas *chipless RFID* basadas en firmas espectrales, donde el código se obtiene analizando la respuesta en frecuencia del conjunto de resonadores [3].

Estos resonadores han encontrado aplicación en el desarrollo de sensores electromagnéticos pasivos. La frecuencia de resonancia y la amplitud de la respuesta generada dependen no solo de la geometría de la estructura si no también de las propiedades electromagnéticas del entorno. Como consecuencia de ello, pequeñas perturbaciones de objetos metálicos cercanos, pueden ser detectadas mediante variaciones en la respuesta del resonador.

2.8. Sistemas *chipless* de campo cercano

En los últimos años, han surgido soluciones basadas en acoplamiento electromagnético en campo cercano, donde la interacción entre lector y etiqueta no se basa en la propagación de ondas electromagnéticas a larga distancia, sino en perturbaciones locales generadas por estructuras resonantes situadas en proximidad.

Este enfoque permite utilizar configuraciones de lectura más simples, y en muchos casos, operar a una única frecuencia de interrogación. De esa forma, se reduce la complejidad del sistema reduciendo a su vez los costes.

En este tipo de sistemas, la etiqueta suele estar formada por una secuencia de resonadores distribuidos espacialmente. A medida que la etiqueta se desplaza sobre el lector, cada resonador interactúa de forma individual con la región sensible del sistema, produciendo variaciones en la

señal medida. De esta forma, la información espacial de la etiqueta puede transformarse en una respuesta temporal asociada al paso secuencial de los resonadores.

Este mecanismo permite implementar sistemas de identificación, sistemas de proximidad, detectores de presencia metálica o sistemas de detección de posición o de desplazamiento.

Debido a las ventajas que presentan este tipo de configuraciones en términos de coste, simplicidad y capacidad de codificación, el presente trabajo se centra en el estudio de un sistema *chipless RFID* basado en resonadores electromagnéticos y lectura en campo cercano.

Concretamente, se aborda el diseño tanto del lector como de la etiqueta, buscando minimizar las dimensiones sin comprometer la sensibilidad del sistema.

2.8.1. Comparativa de soluciones existentes

Analizando las principales tecnologías empleadas para la identificación automática de objetos, pueden distinguirse tres grandes grupos: los códigos ópticos, los sistemas *chipless RFID* y los sistemas *chipped RFID*. La Tabla 2.2 recoge una comparación entre estas tecnologías considerando diferentes parámetros de interés.

Tabla 2.2: Comparación entre códigos ópticos, sistemas RFID sin chip y sistemas RFID con chip. Adaptado de [3].

	Optical ID codes	Chipless RFID	Chipped RFID
Cost	Ultra low	Low	Medium
Size	Very small	Large	Medium
Read range	Very small	Small/moderate	High
Data storage	Medium	Medium	High
Simultaneous reading	No	No	Yes
Reprogrammable	No	Yes (with limits)	Yes
Single band operation	Yes	No	Yes
Power level (reader)	–	Low	Moderate
Harsh environment	No	Yes (with limits)	No
Easy to copy	Yes	No	No

A partir de la Tabla 2.2, puede observarse que los códigos ópticos destacan por su reducido coste de fabricación y sus dimensiones reducidas. Sin embargo, presentan limitaciones importantes en cuanto al alcance de lectura y requieren línea de visión directa entre el lector y la

etiqueta, lo que restringe su utilización en determinadas aplicaciones.

Por otro lado, los sistemas *chipped RFID* ofrecen las mejores prestaciones en términos de capacidad de almacenamiento, alcance de lectura y posibilidad de lectura simultánea de múltiples etiquetas. No obstante, la incorporación de un circuito integrado incrementa significativamente el coste de fabricación de cada etiqueta, lo que puede resultar poco adecuado en aplicaciones de bajo coste o de gran volumen.

En este contexto, la tecnología *chipless RFID* surge como una solución intermedia que combina un coste reducido con capacidades moderadas de almacenamiento e identificación. La eliminación del circuito integrado permite simplificar la estructura de la etiqueta y abaratar su fabricación, manteniendo al mismo tiempo la posibilidad de realizar una identificación inalámbrica. Estas características convierten a los sistemas *chipless RFID* en una alternativa atractiva para numerosas aplicaciones donde el coste constituye un factor determinante.

No obstante, esta tecnología también presenta ciertas limitaciones, principalmente relacionadas con la capacidad de almacenamiento, la distancia de lectura y la complejidad de los sistemas de interrogación. Por ello, resulta necesario analizar con mayor detalle sus principios de funcionamiento, ventajas e inconvenientes, aspectos que se abordarán en los apartados siguientes.

2.9. Tecnología planar

Las tecnologías planares constituyen una de las soluciones más utilizadas para la implementación de circuitos de radiofrecuencia y microondas. Su principal ventaja reside en la posibilidad de fabricar estructuras electromagnéticas mediante técnicas convencionales de circuitos impresos, lo que permite obtener dispositivos de reducido coste, dimensiones compactas y fácil integración.

Entre las tecnologías planares más utilizadas destacan las líneas microstrip, las estructuras stripline y las slotlines. Aunque todas ellas permiten guiar señales electromagnéticas, presentan diferencias significativas en la distribución de los campos eléctricos y magnéticos, así como en su interacción con el entorno.

La tecnología microstrip está formada por una pista conductora situada sobre un sustrato dieléctrico, mientras que la cara opuesta del sustrato se encuentra completamente metalizada formando un plano de masa.

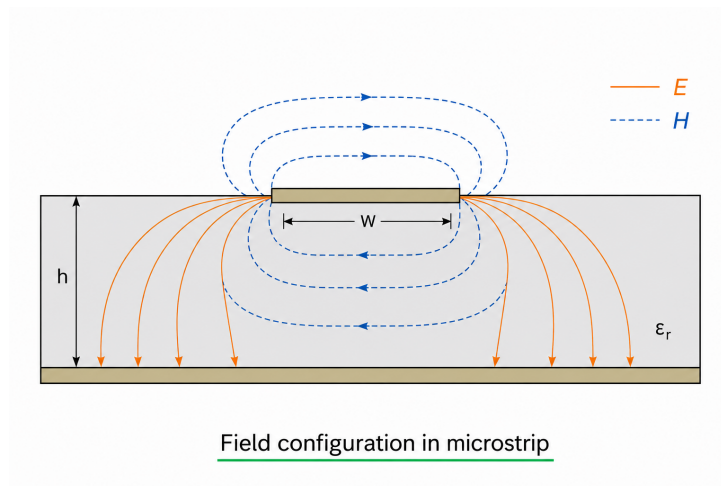


Figura 2.2: Distribución de los campos eléctrico (E) y magnético (H) en una estructura tipo microstrip.

Como puede observarse en la Figura 2.2, las líneas de campo eléctrico se establecen entre la pista conductora y el plano de masa, mientras que el campo magnético rodea al conductor siguiendo trayectorias cerradas. Una característica importante de esta tecnología es que una parte de los campos electromagnéticos se propaga a través del sustrato dieléctrico y otra parte se extiende por el aire circundante. Como consecuencia, la estructura presenta una interacción relativamente elevada con elementos externos situados en sus proximidades.

Por otro lado, las estructuras stripline están formadas por un conductor situado entre dos planos de masa paralelos, quedando completamente embebido en el interior del sustrato dieléctrico.

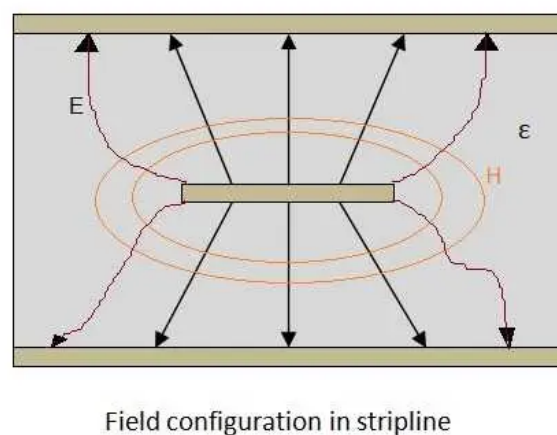


Figura 2.3: Distribución de los campos eléctrico (E) y magnético (H) en una estructura tipo stripline.

En la Figura 2.3 puede observarse que tanto las líneas de campo eléctrico como las de campo magnético permanecen prácticamente confinadas entre los dos planos de masa. Este confinamiento reduce la radiación electromagnética y disminuye la influencia de perturbaciones externas sobre la línea. Sin embargo, también limita la interacción con el entorno, dificultando la detección de objetos situados fuera de la estructura.

Finalmente, las estructuras slotline se basan en una ranura practicada sobre una superficie metálica continua. A diferencia de las tecnologías anteriores, la propagación electromagnética se produce alrededor de dicha ranura.

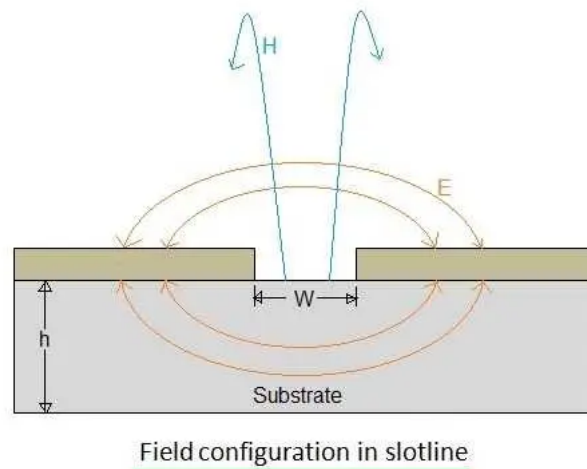


Figura 2.4: Distribución de los campos eléctrico (E) y magnético (H) en una estructura tipo slotline.

Tal y como se muestra en la Figura 2.4, los campos electromagnéticos se concentran principalmente en la región de la ranura. Esta concentración de energía genera una zona especialmente sensible a cualquier perturbación producida en sus proximidades. Como consecuencia, la presencia de materiales conductores o dieléctricos cercanos modifica la distribución de los campos electromagnéticos y altera la respuesta resonante de la estructura.

Comparando las tres tecnologías, puede observarse que las estructuras stripline presentan el mayor confinamiento electromagnético, mientras que las líneas microstrip permiten una interacción moderada con el entorno debido a la existencia de campos que se extienden fuera del sustrato. Por su parte, las estructuras slotline concentran gran parte de la energía electromagnética en regiones localizadas, proporcionando una sensibilidad superior frente a perturbaciones externas.

Dado que el funcionamiento del lector desarrollado en este trabajo se basa en detectar las variaciones producidas por la presencia o ausencia de elementos metálicos en una etiqueta chipless

RFID, resulta necesario maximizar la interacción electromagnética con el entorno próximo. Por este motivo, se ha seleccionado una implementación basada en tecnología microstrip utilizando una estructura resonante tipo slotline. Esta configuración permite concentrar los campos electromagnéticos en zonas concretas del resonador y aumentar la sensibilidad del sistema durante el proceso de lectura e identificación.

2.9.1. Resonadores electromagnéticos

El concepto fundamental de un resonador electromagnético es su capacidad para almacenar energía electromagnética en una banda estrecha de frecuencias. Su funcionamiento se basa en el intercambio periódico de energía entre los campos eléctricos y magnéticos generados en la propia estructura, dando lugar a una resonancia en la frecuencia de resonancia.

Cuando el resonador es excitado mediante señales electromagnéticas próximas a su frecuencia de resonancia, se produce una concentración de energía en determinadas regiones de la estructura. Como consecuencia, se pueden generar cambios apreciables en la respuesta.

2.9.2. Principio de resonancia

El fenómeno de resonancia se produce cuando la energía almacenada en los campos eléctricos y magnéticos de una estructura oscila periódicamente entre ambas formas de almacenamiento. Desde un punto de vista equivalente, muchos resonadores se pueden modelar mediante una inductancia y una capacidad distribuida.

En el diseño, la inductancia representa la energía almacenada en el campo magnético generado por la circulación de corriente, mientras que la capacidad representa la energía almacenada por el campo eléctrico asociado a la diferencia de potencial presente en la estructura. Es en el momento en el que ambas energías que contribuyen se encuentran en equilibrio cuando el sistema presenta una frecuencia de resonancia.

En las proximidades de la frecuencia de resonancia, pequeñas perturbaciones pueden provocar variaciones apreciables en su respuesta, dando lugar a un desplazamiento del cero de transmisión.

2.9.3. Factor de calidad

El factor de calidad es un parámetro que nos permite caracterizar el comportamiento resonante de una estructura electromagnética ya que permite relacionar la energía almacenada en el resonador con la energía disipada durante cada ciclo de oscilación lo cual nos permite proporcionar una medida de selectividad de nuestra resonancia.

Cuando un resonador presenta un factor de calidad elevado, nos permite obtener unas reso-

nancias más estrechas y definidas. Mientras que cuando tenemos un factor de calidad reducido, obtenemos unas resonancias más anchas y menos selectivas.

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (2.2)$$

Esta propiedad se determina a través de la frecuencia de resonancia (f_0) y del ancho de banda (BW) obtenido entre los puntos correspondientes a una caída de 3dB. Como podemos ver en la relación, cuanto menor sea el ancho de banda, mayor factor de calidad obtendremos.

La importancia del factor de calidad en sistemas RFID radica en que determina la capacidad del lector o de la etiqueta para discriminar cambios en su respuesta electromagnética. En sistemas RFID chipless, la información se obtiene a partir de las perturbaciones que la etiqueta produce sobre la respuesta resonante del lector. Por ello, resonancias más definidas permiten identificar con mayor precisión dichas perturbaciones, mejorando la sensibilidad y la fiabilidad del proceso de lectura.

Además, el factor de calidad constituye un indicador directo del rendimiento de los resonadores empleados tanto en el lector como en la etiqueta. Un valor elevado de (Q) suele traducirse en una mayor resolución espectral y en una mejor capacidad para distinguir entre diferentes estados o códigos de la etiqueta. Sin embargo, un factor de calidad excesivamente alto puede aumentar la sensibilidad frente a tolerancias de fabricación, desalineamientos mecánicos o variaciones ambientales, dificultando la robustez del sistema en condiciones reales de operación.

2.9.4. Tipologías estudiadas

Por un lado, tenemos los resonadores de anillo partido o *Split Ring Resonators* (SRR). Esta topología constituye una de las más empleadas en aplicaciones de microondas. Su geometría está formada habitualmente por uno o varios anillos metálicos concéntricos que presentan una abertura en su recorrido, denominada *gap*.

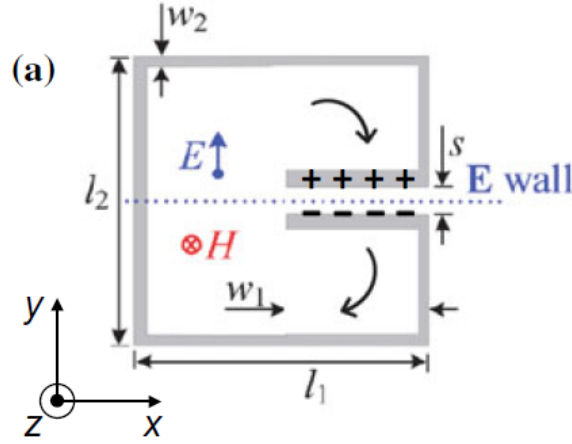


Figura 2.5: Topología SRR.

La circulación de la corriente a lo largo del *gap* genera un campo magnético asociado y en el *gap* se genera una acumulación de cargas que forman un campo eléctrico.

Podemos observar en la Figura 2.5 que la presencia del *gap* proporciona un plano simétrico que actúa como pared eléctrica (*E-wall*) en la frecuencia de resonancia. Eso implica que la componente tangencial del campo eléctrico se anula sobre el plano de simetría y, como consecuencia, la energía magnética queda asociada a la corriente y la energía eléctrica se acumula en el *gap*.

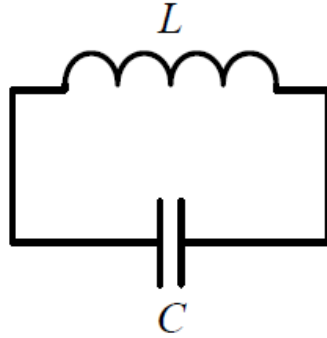


Figura 2.6: Equivalente resonador SRR.

Como consecuencia, la estructura genera un comportamiento resonante similar al de un circuito LC, caracterizado por una frecuencia de resonancia determinada por los valores equivalentes de inductancia y capacidad. Siendo L la inductancia equivalente del anillo y C la capacidad asociada a la discontinuidad.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

donde f_0 representa la frecuencia de resonancia, L la inductancia equivalente del anillo y C la capacidad asociada a la discontinuidad del resonador.

Cuando el resonador es excitado a una frecuencia próxima a su frecuencia de resonancia, se produce una concentración de energía electromagnética en las proximidades del *gap*.

Por otra parte, los resonadores *Electric-LC* (ELC) están diseñados para ser excitados principalmente por el campo eléctrico incidente. Su geometría presenta simultáneamente dos planos de simetría con distinta naturaleza electromagnética: una pared eléctrica (*E-wall*), asociada a la distribución de cargas, y una pared magnética (*H-wall*), relacionada con la distribución de corrientes.

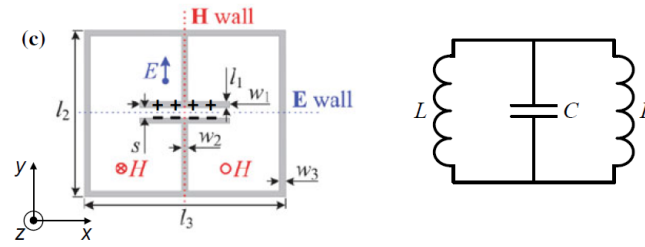


Figura 2.7: Topología ELC.

La pared eléctrica obliga a que la energía eléctrica quede concentrada en la región capacitiva central de la estructura. Por su parte, la pared magnética impone una distribución simétrica de las corrientes en ambas ramas laterales del resonador. Como consecuencia, el comportamiento electromagnético puede justificarse mediante un circuito equivalente formado por un condensador central y dos inductancias equivalentes asociadas a cada una de las trayectorias de corriente.

Esta doble simetría proporciona una elevada interacción con el campo eléctrico incidente, característica que hace especialmente atractivos a los resonadores ELC en aplicaciones de sensado dieléctrico y detección de perturbaciones ambientales. Sin embargo, su respuesta frente a perturbaciones metálicas suele ser inferior a la obtenida mediante resonadores excitados predominantemente por acoplamiento magnético.

La selección de una topología resonante determinada depende de los requisitos específicos de cada aplicación. Factores como la sensibilidad electromagnética, el nivel de miniaturización, la complejidad geométrica y la facilidad de fabricación deben ser considerados durante el proceso de diseño.

Por este motivo, en el capítulo siguiente se realizará un análisis comparativo de las diferentes alternativas estudiadas con el objetivo de seleccionar la configuración más adecuada para el sistema propuesto.

2.10. Parámetros de dispersión

Los parámetros de dispersión o parámetros (S) constituyen una herramienta fundamental para la caracterización de dispositivos de radiofrecuencia y microondas. Estos parámetros permiten describir cómo interactúa una señal electromagnética con una estructura, de tal forma que nos permite cuantificar la energía reflejada y transmitida entre sus diferentes puertos.

En el caso de los sistemas chipless RFID, el análisis de los parámetros de dispersión se centra principalmente en los parámetros S_{11} y S_{21} . Estos parámetros permiten estudiar tanto la respuesta resonante del lector como las perturbaciones producidas por la presencia de los elementos metálicos de la etiqueta. Por este motivo, a continuación se describen las características y la información que proporciona cada uno de ellos.

Por un lado, el parámetro S_{11} representa la relación entre la señal reflejada y la señal incidente en el puerto de entrada del dispositivo. Este parámetro proporciona información sobre el grado de adaptación de la estructura y sobre la energía que retorna hacia la fuente debido a las reflexiones producidas en el sistema.

En aplicaciones RFID chipless, el análisis de S_{11} permite identificar las frecuencias de resonancia del lector, ya que en dichas frecuencias la estructura absorbe energía de forma más eficiente. Asimismo, variaciones significativas de este parámetro pueden indicar la aparición de resonancias no deseadas, desadaptaciones de impedancia o cambios en la distribución de los campos electromagnéticos provocados por elementos próximos a la región sensible del lector.

Por otro lado, el parámetro S_{21} representa la transmisión de potencia entre el puerto de entrada y el puerto de salida de una estructura de dos puertos. Este parámetro indica qué fracción de la señal incidente consigue propagarse a través del dispositivo.

En sistemas RFID chipless de campo cercano, el parámetro S_{21} constituye habitualmente la principal magnitud de análisis. Cuando un elemento metálico de la etiqueta interactúa con el resonador del lector, se produce una perturbación en la distribución de los campos electromagnéticos que modifica la transmisión de la señal. Como consecuencia, aparecen variaciones en la amplitud de S_{21} , permitiendo detectar la presencia, posición o secuencia de elementos que codifican la información de la etiqueta.

Por este motivo, el seguimiento temporal de las variaciones del parámetro S_{21} resulta especialmente útil en sistemas chipless RFID basados en lectura secuencial, donde la información se obtiene a partir de la interacción sucesiva entre los elementos de la etiqueta y la región sensible del lector.

A partir de los parámetros S_{11} y S_{21} es posible evaluar cómo se reparte la potencia incidente entre la energía reflejada y la energía transmitida. Este análisis resulta especialmente útil en

estructuras resonantes, ya que permite comparar diferentes diseños y determinar cuáles presentan un comportamiento más eficiente desde el punto de vista electromagnético.

En una estructura ideal sin pérdidas, toda la potencia incidente debe repartirse entre la potencia reflejada y la potencia transmitida. Para una red pasiva de dos puertos, esta condición puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1 \quad (2.4)$$

donde ($|S_{11}|^2$) representa la potencia reflejada y ($|S_{21}|^2$) la potencia transmitida.

Idealmente, la suma de ambas contribuciones debería ser igual a la unidad, lo que implicaría que toda la potencia incidente se conserva dentro del sistema. Sin embargo, en estructuras reales siempre existen pérdidas asociadas a los conductores, al sustrato dieléctrico o a fenómenos de radiación. Como consecuencia, la suma de las potencias reflejada y transmitida suele ser inferior a la potencia incidente.

Cuanto más se aleje una estructura de esta condición ideal, mayores serán las pérdidas presentes en el sistema. Por este motivo, el análisis de la unitariedad constituye una herramienta útil para comparar diferentes topologías resonantes y evaluar su eficiencia electromagnética. En este trabajo, dicho criterio se empleará junto con el factor de calidad para analizar el comportamiento de los resonadores estudiados y seleccionar la topología más adecuada para el desarrollo del lector chipless RFID.

2.11. Sensibilidad de resonadores frente a perturbaciones externas

Los resonadores electromagnéticos presentan sensibilidad frente a perturbaciones externas debido a que su respuesta depende de la distribución de los campos eléctricos y magnéticos generados en la estructura.

En las proximidades de la frecuencia de resonancia, pequeñas perturbaciones pueden provocar variaciones apreciables en su respuesta, dando lugar a un desplazamiento del cero de transmisión.

En el caso de estructuras resonantes de campo cercano, esta sensibilidad permite detectar perturbaciones producidas por elementos metálicos próximos. La presencia de estos elementos modifica significativamente la distribución de los campos electromagnéticos, generando cambios medibles en la frecuencia de resonancia, la amplitud de la respuesta o los parámetros de dispersión del sistema.

Esta propiedad permite utilizar este tipo de estructuras en aplicaciones como la detección

de metales, los detectores de proximidad y los sistemas de posicionamiento.

Capítulo 3

Diseño del prototipo

3.1. Arquitectura general del sistema

El sistema propuesto se basa en un lector resonante implementado en tecnología microstrip y en etiquetas pasivas formadas por secuencias de parches metálicos. La lectura se realiza en campo cercano, de modo que el lector no identifica la etiqueta mediante una firma espectral de largo alcance, sino mediante las perturbaciones locales producidas cuando cada zona de la etiqueta atraviesa la región sensible del resonador.

La información se codifica espacialmente. Cada posición de la etiqueta puede contener un parche metálico o únicamente sustrato dieléctrico. La presencia de metal representa un valor lógico 1, mientras que la ausencia de metal representa un valor lógico 0. Al realizar una lectura secuencial de la etiqueta sobre el lector, la variación de amplitud de la señal permite reconstruir la secuencia binaria.

3.2. Parámetros de diseño y requisitos

3.2.1. Frecuencia de operación

La frecuencia de operación se ajustó alrededor de 2.4 GHz, de acuerdo con las especificaciones de diseño planteadas en la fase de simulación. La elección de esta frecuencia permite trabajar en una banda habitual de radiofrecuencia y facilita la utilización de instrumentación de laboratorio.

3.2.2. Dimensiones del resonador

Las dimensiones del resonador se ajustaron para obtener una respuesta resonante definida y compatible con las limitaciones de fabricación. El diseño final busca un equilibrio entre

compactación geométrica, sensibilidad electromagnética y robustez del prototipo.

3.2.3. Separación entre elementos

La separación entre los elementos metálicos de la etiqueta se fijó en 4 mm, dando lugar a posiciones binarias de 8 mm. Esta distancia se seleccionó para que la respuesta de cada bit pudiera diferenciarse durante el desplazamiento del *tag* sin generar solapamientos excesivos entre detecciones consecutivas.

3.2.4. Condiciones de acoplamiento con la etiqueta

El sistema trabaja en campo cercano, por lo que la distancia entre lector y etiqueta es un parámetro crítico. La capa de aire de 0,5 mm introducida en el modelo permite representar la separación durante la lectura y estudiar la perturbación producida por cada parche metálico sobre la región sensible del lector.

3.3. Diseño del lector

Para determinar qué tipo de estructura podía proporcionar una mayor sensibilidad sin comprometer la medición, se realizó inicialmente un estudio empleando el software Advanced Design System (ADS).

En esta parte del proyecto se realizaron dos estudios, por un lado se realizó un estudio empleando los equivalentes circuitales de las diferentes topologías de resonadores para poder evaluar su ancho de banda fraccional y su factor de calidad para poder hacer un estudio preliminar de que tipo de topología podría ser la más adecuada para este trabajo.

Una vez obtenida esa conclusión, se realizó un estudio mediante la herramienta disponible en el software empleado para poder realizar un estudio de las diferentes geometrías partiendo de la conclusión del apartado anterior.

El objetivo es obtener un diseño que permita obtener un desplazamiento frecuencial alto que se traduce en una mayor sensibilidad ante perturbaciones y cumpliendo los parámetros de diseño mencionados anteriormente.

3.3.1. Elección del resonador propuesto mediante estudio de esquemáticos

En este apartado se analizará el estudio de las topologías propuestas. Las topologías estudiadas fueron SRR, y S-SRR. Cada una se representó mediante su modelo equivalente en esquemático, ajustando los valores de inductancia y capacidad para aproximar la frecuencia de

resonancia al entorno de 2.4 GHz.

Para obtener una primera aproximación del resonador, se partió del modelo equivalente (LC) en paralelo. En este modelo, la capacidad (C) está asociada principalmente a la discontinuidad o *gap* del resonador, mientras que la inductancia (L) depende del recorrido efectivo de corriente de la estructura.

Dado que el *gap* del resonador se encuentra condicionado por las limitaciones de fabricación y por la separación mínima que puede mecanizar la fresadora, se fijó inicialmente un valor de capacidad equivalente de $C = 1,48$ pF

A partir de este valor, se calculó la inductancia necesaria para obtener una frecuencia de resonancia próxima a 2.4 GHz. La frecuencia de resonancia de un circuito (LC) viene dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Despejando la inductancia:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C} \quad (3.2)$$

Sustituyendo ($f_0 = 2,4$,GHz) y ($C = 1,48$,pF), se obtiene:

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 2,4 \cdot 10^9)^2 \cdot 1,48 \cdot 10^{-12}} \quad (3.3)$$

$$L \approx 2,97, \text{ nH} \quad (3.4)$$

Por tanto, fijando una capacidad equivalente de (1.48,pF), la inductancia necesaria para obtener una frecuencia de resonancia de aproximadamente (2.4,GHz) es (2.97,nH). Estos valores se emplearon como punto de partida para el diseño del resonador antes de realizar la optimización electromagnética completa. Que corresponderían a los valores C_1 y L_1 de la Figura 3.1.

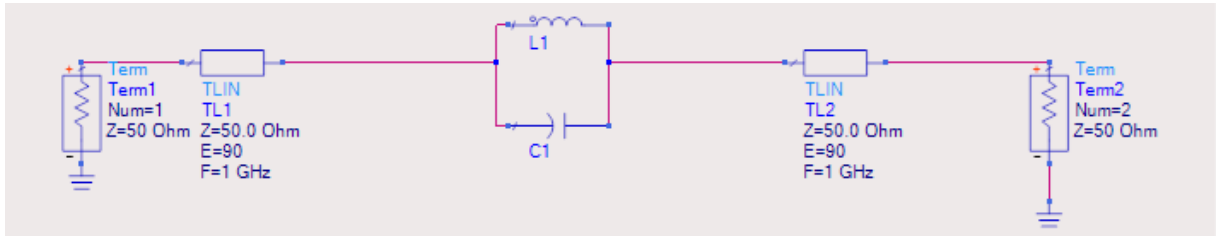


Figura 3.1: Esquemático de la topología SRR.

Para definir el modelo equivalente de la topología ELC, se fijó inicialmente el valor de la capacidad equivalente, ya que esta se encuentra principalmente asociada a la región central del resonador, donde se produce la acumulación de carga entre los conductores enfrentados. Esta zona capacitiva depende de la separación entre conductores y de la geometría central de la estructura, por lo que resulta adecuado tomarla como parámetro inicial de diseño.

En este caso, se seleccionó una capacidad equivalente de $C = 5,865$ pF. A partir de este valor y empleando la relación de resonancia indicada anteriormente en la Ecuación 3.1, se calcularon las inductancias necesarias para obtener una frecuencia de resonancia próxima a 2,4 GHz.

Dado que el modelo equivalente del resonador ELC presenta dos ramas inductivas simétricas, el valor obtenido se reparte entre ambas inductancias, resultando:

$$L_1 = L_2 = 1,498 \text{ nH} \quad (3.5)$$

De esta forma, la capacidad central y las dos inductancias laterales permiten representar el comportamiento resonante de la estructura ELC en torno a la frecuencia objetivo de 2,4 GHz.

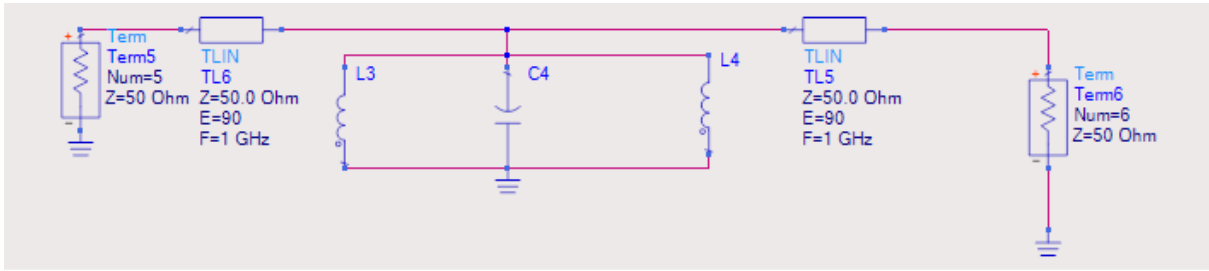


Figura 3.2: Esquemático de la topología ELC.

Una vez definidos los modelos equivalentes, se realizaron simulaciones para comparar la respuesta de cada topología.

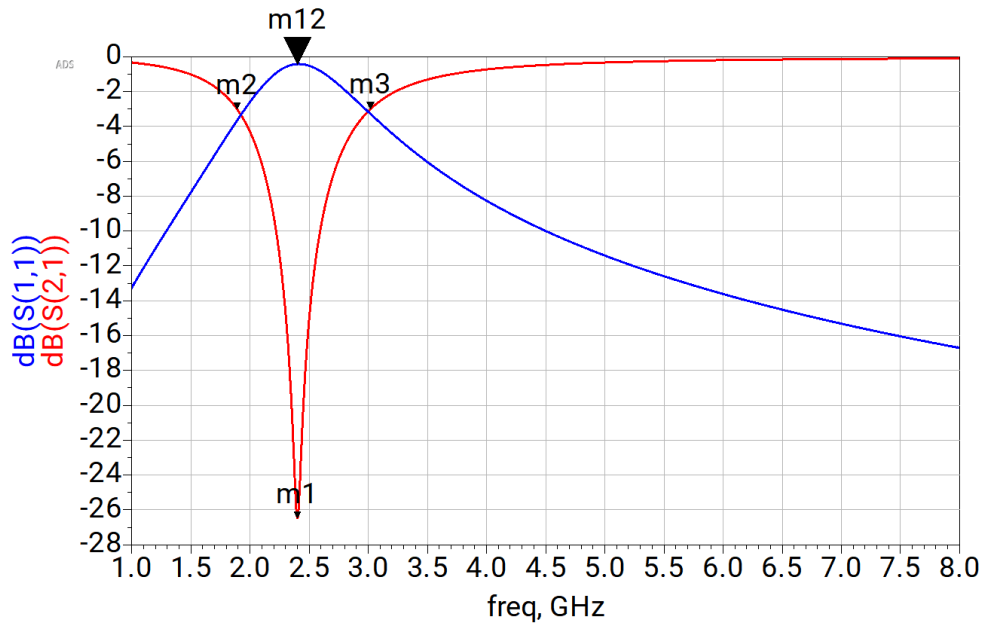


Figura 3.3: Simulación de la topología SRR.

Como puede observarse en la Figura 3.3, el marcador m_1 permite identificar la frecuencia de resonancia de la estructura, situada en 2.401 GHz. Los marcadores m_2 y m_3 corresponden a los puntos de -3 dB empleados para determinar el ancho de banda de la resonancia, comprendido entre 1.890 GHz y 3.019 GHz. Con el marcador m_{12} podemos observar en la frecuencia de resonancia, el parámetro S_{11} . Dicho valor presenta un valor de $-0,422$ dB, lo que indica que hay una adecuada adaptación.

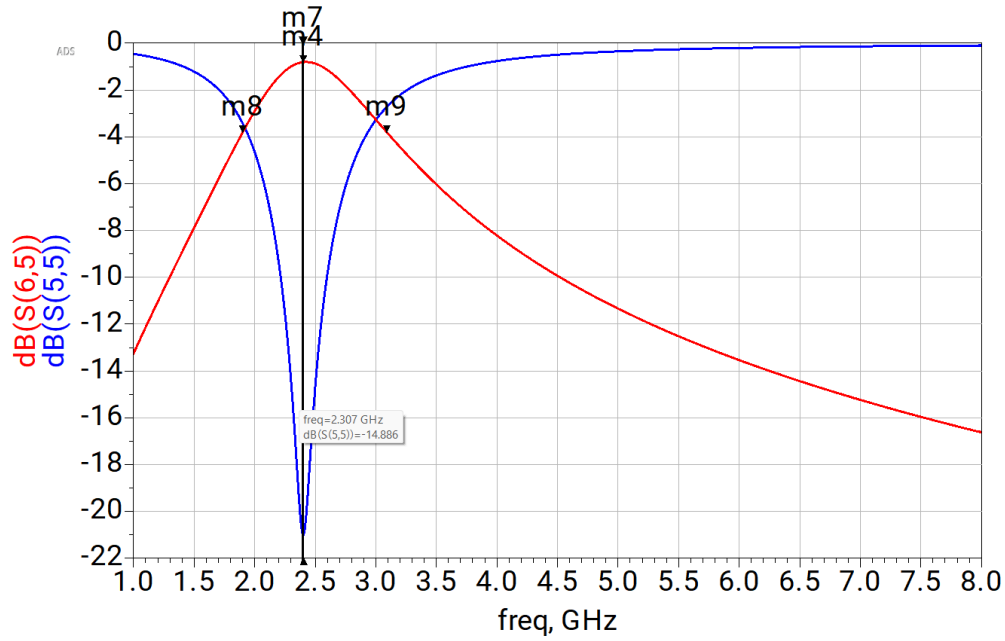


Figura 3.4: Simulación de la topología ELC.

Para el caso de la topología ELC, puede observarse en la Figura 3.4 que el marcador m_7 permite identificar la frecuencia de resonancia de la estructura, situada en 2.400 GHz, a partir del mínimo del coeficiente de reflexión $S_{5,5}$. Por su parte, los marcadores m_8 y m_9 corresponden a los puntos de -3 dB del coeficiente de transmisión $S_{6,5}$, empleados para determinar el ancho de banda de la respuesta, comprendido entre 1.901 GHz y 3.090 GHz. Asimismo, el marcador m_4 indica que, en la frecuencia de resonancia, el coeficiente de transmisión presenta un valor de $-0,810$ dB.

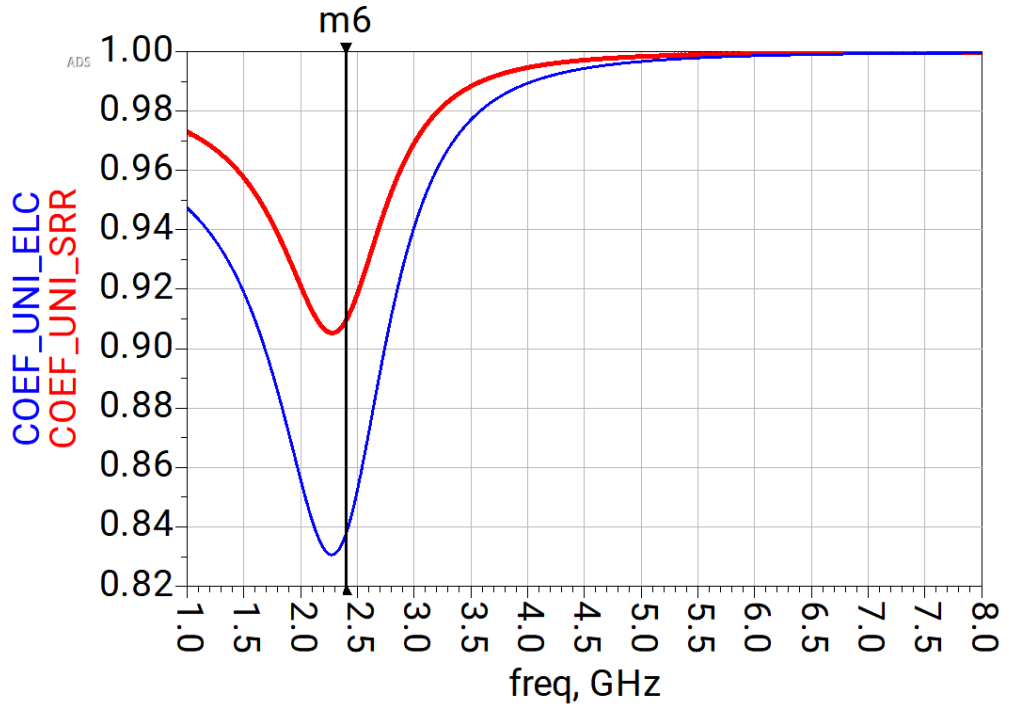


Figura 3.5: Simulación coeficiente de unitariedad de la topología SRR y ELC.

En la Figura 3.5, el marcador m_6 se emplea para comparar el coeficiente de unitariedad de las topologías ELC y SRR en la frecuencia de resonancia, situada en 2.400 GHz.

A partir de las simulaciones se extrajeron los datos necesarios para calcular el ancho de banda, el factor de calidad y el coeficiente de unitariedad. Los resultados se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resumen de propiedades de las topologías estudiadas.

Topología	Ancho de banda [GHz]	Factor de calidad	Coef. unitariedad
SRR	0.054	44.463	0.910
ELC	1.180	2.019	0.838

La topología SRR presenta el menor ancho de banda y el mayor factor de forma. Esto indica una resonancia más selectiva y una mayor resolución para detectar variaciones producidas por perturbaciones metálicas. Por este motivo, se seleccionó la topología SRR como base del lector.

Una vez elegida la topología a emplear, se realizaron diferentes diseños de lectores modificando tanto la posición del gap como las dimensiones y proporciones del propio lector.

3.3.2. Selección del sustrato

La elección del sustrato constituye una etapa importante en el diseño de estructuras microstrip, ya que sus propiedades eléctricas influyen directamente sobre parámetros como la frecuencia de resonancia, las pérdidas del sistema y las dimensiones finales de la estructura. Por este motivo, antes de iniciar el diseño del lector se realizó una comparación entre diferentes materiales habitualmente empleados en aplicaciones de radiofrecuencia y microondas.

La Tabla 3.2 recoge algunas de las características más representativas de varios sustratos utilizados en aplicaciones RF y de microondas.

Tabla 3.2: Comparación entre diferentes sustratos utilizados en aplicaciones RF y microondas.

Parámetro	RO4003C	RO4350B	I-Tera MT40
ε_r	3.55	3.66	3.45
$\tan \delta$	0.0027	0.0037	0.0031
Coef. térmico de ε_r [ppm/°C]	+40	+50	Muy estable
Tg [°C]	> 280	> 280	200
Td [°C]	425	390	360
Conductividad térmica [W/mK]	0.71	0.69	0.61
Absorción de humedad [%]	0.06	0.06	0.10

A partir de los datos recogidos en la Tabla 3.2, se observa que los tres materiales presentan prestaciones adecuadas para aplicaciones de alta frecuencia. No obstante, existen diferencias apreciables en parámetros como la tangente de pérdidas ($\tan \delta$) y la estabilidad de la permitividad relativa (ε_r).

En particular, el Rogers RO4003C presenta la menor tangente de pérdidas de los materiales comparados, lo que permite reducir la atenuación introducida por el dieléctrico y obtener resonancias más pronunciadas. Este aspecto resulta especialmente importante en la aplicación desarrollada, ya que el proceso de identificación se basa en detectar las variaciones producidas sobre la respuesta resonante del lector por la presencia o ausencia de los elementos metálicos de la etiqueta. Una resonancia más definida facilita la detección de dichas variaciones y mejora la distinción entre los diferentes estados binarios.

Por este motivo, aunque el Rogers RO4350B y el I-Tera MT40 constituyen alternativas válidas para aplicaciones de microondas, se seleccionó el Rogers RO4003C para la implementación tanto del lector como de las etiquetas.

Una vez seleccionado el material, se definió una estructura de simulación que permitiese representar de forma realista la separación existente entre el lector y la etiqueta durante el proceso de lectura. Para ello, se emplearon dos láminas de Rogers RO4003C de 1,52 mm de espesor separadas mediante una capa de aire de 0,5 mm, tal y como se muestra en la Figura 3.6.

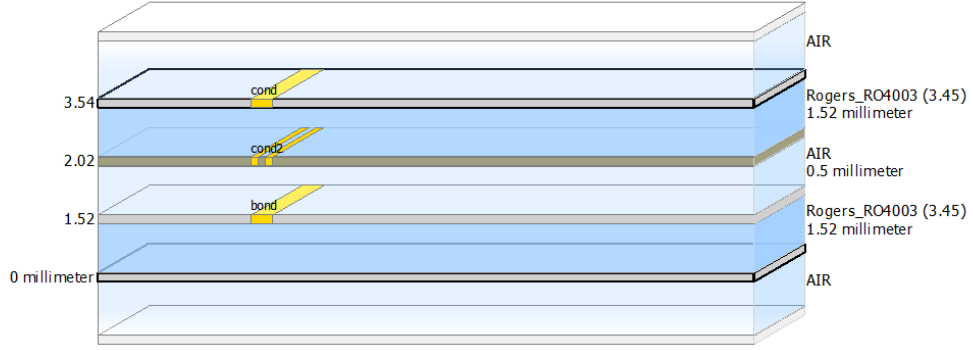


Figura 3.6: Definición del sustrato utilizado en la simulación.

En el modelo implementado, la capa inferior corresponde al resonador del lector, mientras que la capa superior representa los elementos metálicos de la etiqueta. La capa de aire intermedia permite reproducir la distancia física existente entre ambas estructuras durante el proceso de identificación, proporcionando una aproximación más realista al funcionamiento final del sistema.

3.3.3. Diseño geométrico del lector

Una vez establecida la base teórica, se analizaron diferentes topologías resonantes con el objetivo de seleccionar la más adecuada para el diseño del lector. Para ello se estudiaron resonadores SRR (*Split Ring Resonator*) y S-SRR (*Spiral Split Ring Resonator*), evaluando su comportamiento mediante modelos equivalentes implementados en esquemático.

La comparación entre ambas estructuras se realizó a partir de tres parámetros principales: el ancho de banda, el factor de calidad y el coeficiente de unitariedad. El ancho de banda permite evaluar la selectividad de la resonancia, mientras que el factor de calidad está relacionado con la capacidad del resonador para generar resonancias estrechas y bien definidas. Por otro lado, el coeficiente de unitariedad proporciona una estimación de las pérdidas presentes en la estructura y permite valorar su eficiencia.

A partir de los resultados obtenidos se observó que la topología SRR presentaba el menor ancho de banda y el mayor factor de calidad de entre todas las configuraciones estudiadas. Esto implica una resonancia más selectiva y una mayor sensibilidad frente a perturbaciones externas, características especialmente interesantes para la aplicación desarrollada. Dado que la detección de la etiqueta se basa en las variaciones electromagnéticas producidas por la presencia de ele-

mentos metálicos próximos al lector, se decidió seleccionar la topología SRR como estructura base del sistema.

Una vez escogido el resonador, se procedió a su implementación física mediante una configuración *slotline*. Esta elección se fundamenta en el principio de Babinet, según el cual una estructura ranurada presenta una respuesta electromagnética complementaria a la de su equivalente metalizada. Como consecuencia, los campos electromagnéticos se concentran principalmente en la región de la ranura, aumentando la interacción con cualquier elemento conductor situado en sus proximidades.

Esta característica resulta especialmente útil en el sistema desarrollado, ya que incrementa la sensibilidad del lector frente a los parches metálicos que forman las etiquetas chipless RFID. De este modo, pequeñas variaciones en la geometría metálica de la etiqueta producen cambios apreciables en la respuesta del resonador, facilitando el proceso de detección e identificación.

3.3.4. Optimización geométrica del lector

Una vez seleccionada la topología SRR e implementada mediante una configuración *slotline*, se inició el proceso de optimización geométrica del lector. El objetivo de esta etapa era maximizar la sensibilidad frente a perturbaciones metálicas manteniendo una respuesta resonante selectiva y compatible con las restricciones de fabricación del sistema.

Como punto de partida, se definió una primera geometría de carácter aproximadamente cuadrado sobre la que se estudiaron diferentes configuraciones del resonador. En particular, se analizó la influencia de la orientación del *gap* sobre la respuesta electromagnética de la estructura, evaluándose tres disposiciones diferentes: hacia la izquierda, hacia la parte superior y hacia la derecha del resonador.

Los resultados obtenidos en base a la orientación del *gap* no otorgaban una diferencia decisiva. No obstante, se probó de añadir otra anilla envolviendo al resonador con el *gap* a la derecha para aumentar la concentración de campo magnético y de ahí tratar de obtener una resonancia con menos ancho de banda para tener más precisión.

de ahí que la comparativa que se va a mostrar a continuación es el mismo lector con la misma línea de transmisión pero con una única diferencia, que uno tiene un anillo más que lo que debe de hacer es concentrar el campo electromagnético para conseguir un menor ancho de banda.

Es por ello que primero se realizó un estudio del desplazamiento frecuencial de estos dos diseños para ver la influencia de ese anillo adicional.



Figura 3.7: Layout del lector empleado con topología SRR en forma cuadrada.

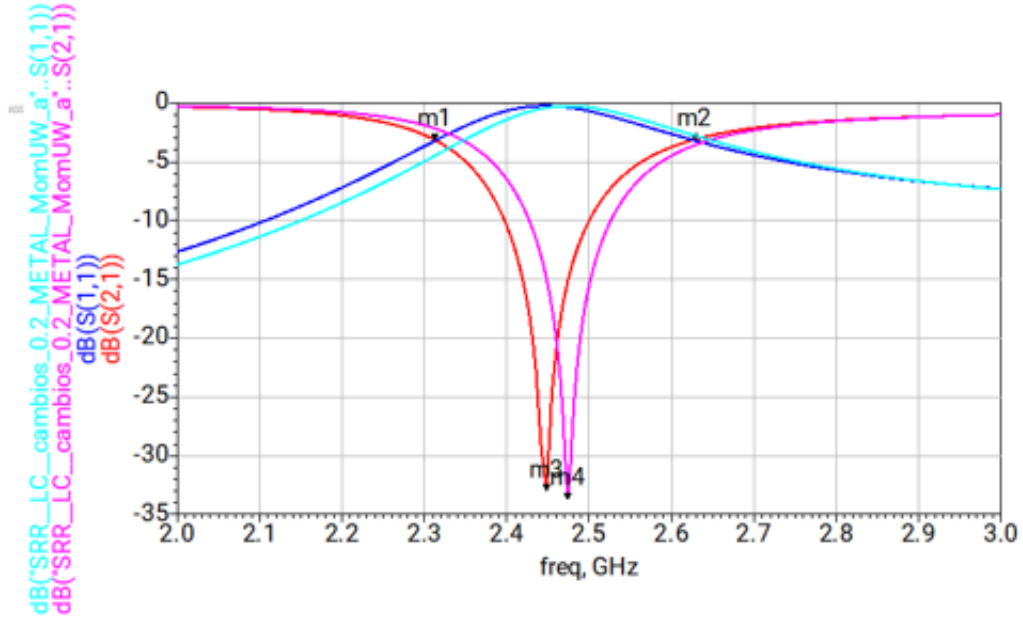


Figura 3.8: Desplazamiento frecuencial

Como puede observarse en la Figura 3.8, los marcadores m_1 y m_2 se emplean para determinar el ancho de banda (BW) de la resonancia, mientras que los marcadores m_3 y m_4 permiten identificar la frecuencia de resonancia de la etiqueta en ausencia y presencia de metal, respectivamente. En ausencia de metal, la frecuencia de resonancia se sitúa en 2,448 GHz, desplazándose hasta 2,474 GHz cuando se introduce una superficie metálica, lo que supone un desplazamiento frecuencial de 25,61 MHz. A partir de los puntos de corte definidos por m_1 y m_2 , se obtiene un ancho de banda de 315 MHz, correspondiente a un factor de calidad de $Q = 7,77$. Estos resultados ponen de manifiesto la sensibilidad de la etiqueta frente a la presencia de superficies metálicas, manteniendo una respuesta resonante adecuada para su funcionamiento.

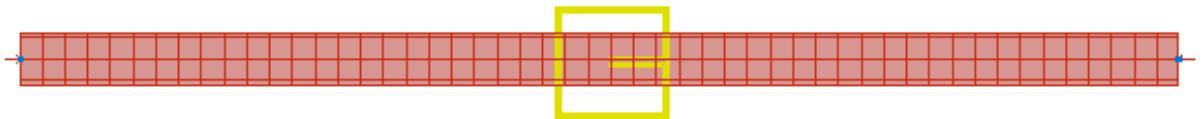


Figura 3.9: Layout Resonador SRR de geometría cuadrada con dos anillos

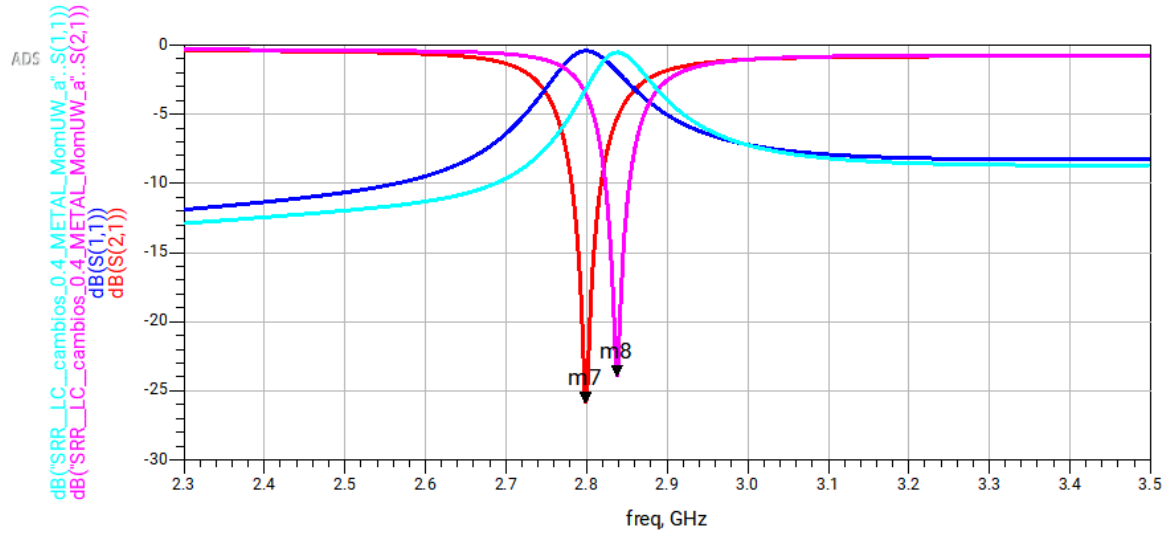


Figura 3.10: Desplazamiento frecuencial ante la presencia de un metal .

Como puede observarse en la Figura 3.10, los marcadores m_7 y m_8 se emplean para identificar la frecuencia de resonancia de la etiqueta en ausencia y presencia de metal, respectivamente. En ausencia de metal, la frecuencia de resonancia se sitúa en 2,798 GHz, mientras que la presencia de una superficie metálica provoca su desplazamiento hasta 2,837 GHz, lo que supone un desplazamiento frecuencial de aproximadamente 39 MHz.

De ahí, se analizó una comparativa entre ambos diseños sin metal para poder determinar si al añadir ese anillo, conseguimos obtener un menor ancho de banda.

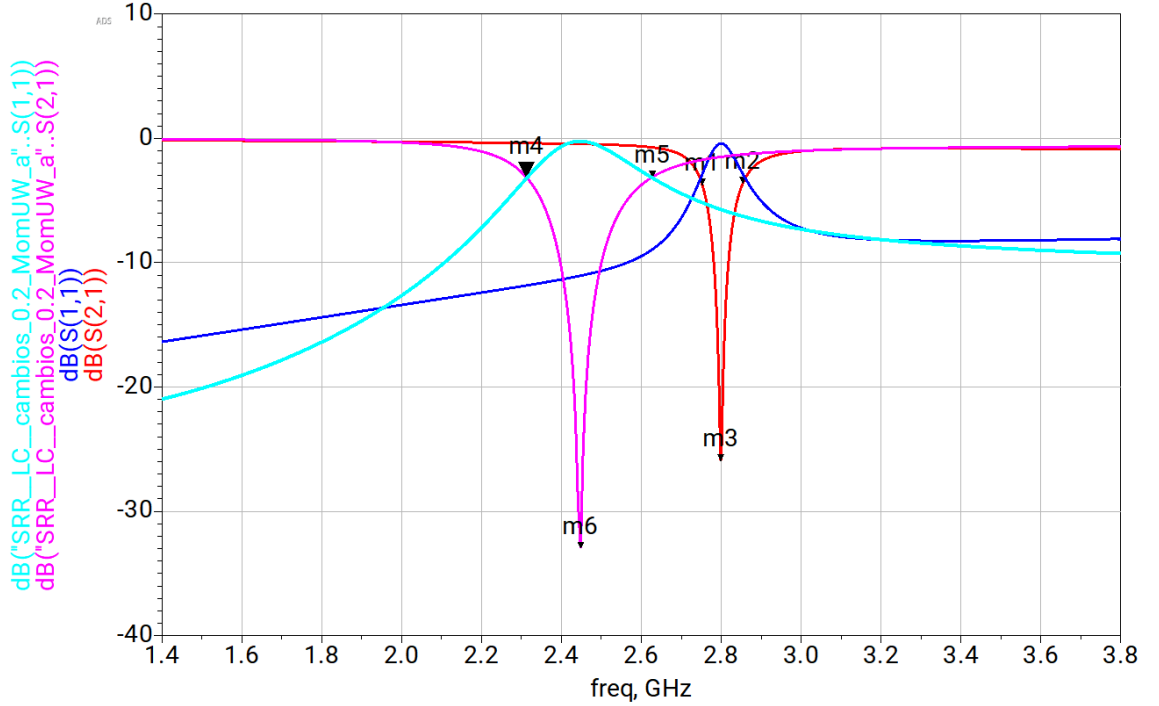


Figura 3.11: Comparativa entre misma topología con un anillo o con dos anillos

Como puede observarse en la Figura 3.11, las curvas en rojo y azul corresponden al modelo de topología diseñado con dos anillos, mientras que las curvas en rosa y cian representan la configuración con un único anillo. Los marcadores m_3 y m_6 se emplean para identificar la frecuencia de resonancia de cada diseño, mientras que los marcadores m_1 , m_2 , m_4 y m_5 permiten determinar el ancho de banda (BW) de ambas configuraciones.

La etiqueta con dos anillos presenta una frecuencia de resonancia de 2,798 GHz, mientras que la configuración con un único anillo resuena a 2,448 GHz. A partir de los puntos de corte definidos por los marcadores utilizados para el cálculo del ancho de banda, se obtiene un BW de 102 MHz para la etiqueta con dos anillos y de 315 MHz para la configuración con un único anillo. Estos resultados ponen de manifiesto que la incorporación de un segundo anillo incrementa el factor de calidad de la resonancia, dando lugar a una respuesta más selectiva y con un ancho de banda considerablemente menor. Las curvas en rojo y azul corresponden a la topología diseñada con dos anillos, mientras que las curvas en rosa y cian representan la topología con un único anillo. Los marcadores m_1 y m_3 indican la frecuencia de resonancia de la etiqueta con dos anillos en presencia y ausencia de metal, respectivamente, mientras que los marcadores m_5 y m_6 corresponden a la configuración con un anillo.

Finalmente se resumieron todos los datos obtenidos en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3: Comparación de las geometrías SRR analizadas.

Geometría	FBW [%]	Factor de calidad	Δf [MHz]
SRR cuadrada con 1 anillos	12.865	24.052	25.61
SRR cuadrada con 2 anillo	3.637	27.429	39.05

Podemos observar como la incorporación de un segundo anillo produce una mejora significativa en las prestaciones del resonador. En primer lugar, el ancho de banda fraccional disminuye desde un 12.865 % hasta un 3.637 % lo que indica una resonancia más estrecha y selectiva. Como consecuencia directa de esta reducción del ancho de banda, el factor de calidad aumenta de 24.052 a 27.429.

Además, la estructura de doble anillo presenta un mayor desplazamiento de frecuencia ante la perturbación introducida, alcanzando un valor de 39.05 MHz frente a los 25.61 MHz obtenidos con la geometría de un único anillo. Este incremento supone una mayor sensibilidad, ya que pequeñas variaciones en el entorno del resonador generan cambios más pronunciados en la frecuencia de resonancia.

Por tanto, la incorporación de un segundo anillo no solo permite obtener una resonancia más selectiva, sino que también incrementa la sensibilidad de la estructura frente a perturbaciones externas. Dado que ambos aspectos son especialmente relevantes para la detección de las etiquetas chipless RFID, se seleccionó la configuración SRR de doble anillo para el diseño final del lector.

No obstante, se tuvo que modificar las dimensiones de la estructura debido a una limitación de fabricación ya que ese modelo no habría sido posible fabricarlo con la fresadora .

Debido a esta restricción, se aumentó la longitud efectiva del resonador y se modificó progresivamente su geometría hacia una configuración más rectangular. Esta modificación permitió incrementar el tamaño del *gap* y fijar un ancho mínimo de conductor de 0.3121 mm, valor compatible con la resolución de la fresadora empleada, la cual no permite mecanizar estructuras con anchuras inferiores a 0.3 mm.

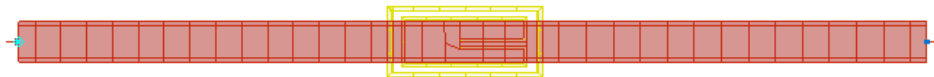


Figura 3.12: Layout del lector empleado con topología SRR rectangular.

Como resultado, se consiguió mejorar la sensibilidad del lector frente a las perturbaciones producidas por las etiquetas metálicas, manteniendo simultáneamente una geometría compacta

y adecuada para su fabricación experimental.

Los principales parámetros geométricos del lector se resumen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Parámetros geométricos del lector.

Parámetro	Valor [mm]
Longitud de la línea	75.563
Anchura de la línea	3.4236
Longitud exterior del resonador	12.9536
Anchura exterior del resonador	6.064
Longitud interior del resonador	10.4616
Anchura interior del resonador	4.2382
Longitud del <i>gap</i>	5.2308
Anchura del conductor	0.3121
Separación en x entre longitud interior y exterior	0.8719
Separación en y entre longitud interior y exterior	0.4439

La geometría final del lector se muestra en la Figura 4.1. La anchura y longitud de la línea de alimentación se ajustaron para obtener una impedancia característica de 50Ω para poder estar trabajando con una línea adaptada.

Debido a las limitaciones de fabricación existentes, fue necesario modificar las dimensiones iniciales del resonador. En particular, la fresadora disponible en el laboratorio no permite mecanizar estructuras con anchuras inferiores a 0.3 mm, lo que imponía una restricción directa sobre el ancho mínimo del conductor. Para satisfacer esta condición, se fijó un ancho mínimo de 0.3121 mm y se aumentó la longitud total del resonador, permitiendo obtener una apertura (*gap*) de mayor tamaño sin alterar significativamente la frecuencia de resonancia objetivo. Como resultado, se adoptó una geometría más rectangular, que además de garantizar la fabricabilidad del diseño contribuyó a incrementar la longitud efectiva del recorrido de corriente y mejorar la selectividad de la respuesta resonante.

A continuación se realizó una comparación con y sin metal para poder ver que desplazamiento frecuencial tenía el lector. Ya que ese desplazamiento me determinará la sensibilidad del sistema.

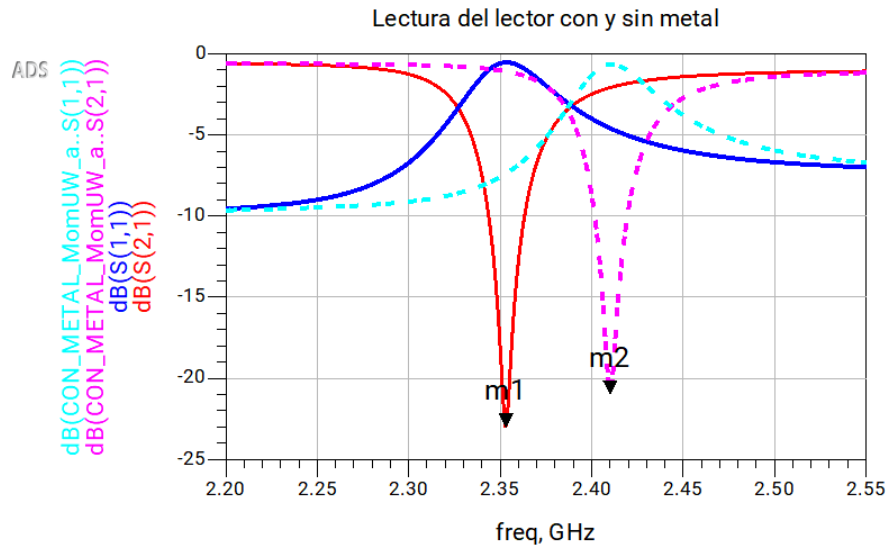


Figura 3.13: Respuesta del lector en presencia y ausencia de metal

Como puede observarse en la Figura 3.13, los marcadores m_1 y m_2 permiten identificar la frecuencia de resonancia del lector en ausencia y presencia de metal, respectivamente. En ausencia de metal, el lector presenta una frecuencia de resonancia de 2.353 GHz. La presencia de una superficie metálica provoca un desplazamiento de la resonancia hasta 2.410 GHz, correspondiente a un incremento de 57.02 MHz. Este comportamiento confirma la elevada sensibilidad de la estructura diseñada frente a perturbaciones metálicas localizadas.

La presencia de este desplazamiento frecuencial confirma que el lector es capaz de detectar perturbaciones producidas por elementos metálicos situados sobre la región sensible del resonador. Este comportamiento resulta fundamental para el sistema propuesto, ya que la información de las etiquetas se codifica precisamente mediante la presencia o ausencia de metal. Por tanto, los resultados obtenidos permiten verificar que el lector presenta la sensibilidad necesaria para diferenciar ambas situaciones y continuar con el estudio de las etiquetas chipless RFID en las siguientes etapas del diseño.

Cabe añadir que todas las simulaciones en las cuales se diferenciaba la detección del metal, se hizo añadiendo un parche metálico encima del lector. En el siguiente apartado, miraremos de optimizar las dimensiones del parche metálico o etiquetas para poder realizar nuestra lectura secuencial en el proceso de simulación y de posterior fabricación.

3.4. Diseño de las etiquetas

Una vez definido el diseño final del lector, se procedió al diseño de las etiquetas encargadas de almacenar la información binaria del sistema. Como se observó en el apartado anterior, la geometría rectangular seleccionada para el lector producía un mayor desplazamiento frecuencial cuando se aproximaba un elemento metálico a la zona de lectura. Además, esta configuración permitía reducir el ancho de los parches metálicos sin perder sensibilidad durante la detección.

Por este motivo, se decidió utilizar elementos metálicos con una geometría similar a la empleada en el lector. De esta forma, se maximiza la perturbación introducida sobre la estructura resonante y se favorece la detección de cada bit durante el proceso de lectura.

Las etiquetas están formadas por una secuencia de parches metálicos distribuidos linealmente sobre el sustrato. La presencia de un parche metálico representa un 1 lógico, mientras que su ausencia representa un 0 lógico. Cada parche presenta una longitud de 4 mm y se encuentra separado del siguiente mediante una distancia de 4 mm. Como consecuencia, cada posición binaria ocupa una longitud total de 8 mm.

Antes de proceder a la fabricación de las etiquetas, se realizó una simulación paramétrica con el objetivo de comprobar si el lector era capaz de distinguir correctamente la presencia y ausencia de metal en cada posición binaria.

Para ello, se definió en el *layout* un parámetro denominado *y*, encargado de controlar la posición relativa de la etiqueta respecto al lector. Este parámetro se hizo variar entre 0 mm y 100 mm con incrementos de 1 mm, manteniendo fija la coordenada horizontal ($x=0$ mm). De esta forma, la etiqueta se desplaza progresivamente sobre el lector simulando el proceso de lectura real.

Una vez definido el parámetro, el *layout* se exportó como símbolo para poder incorporarlo al esquemático mostrado en la Figura 3.14.

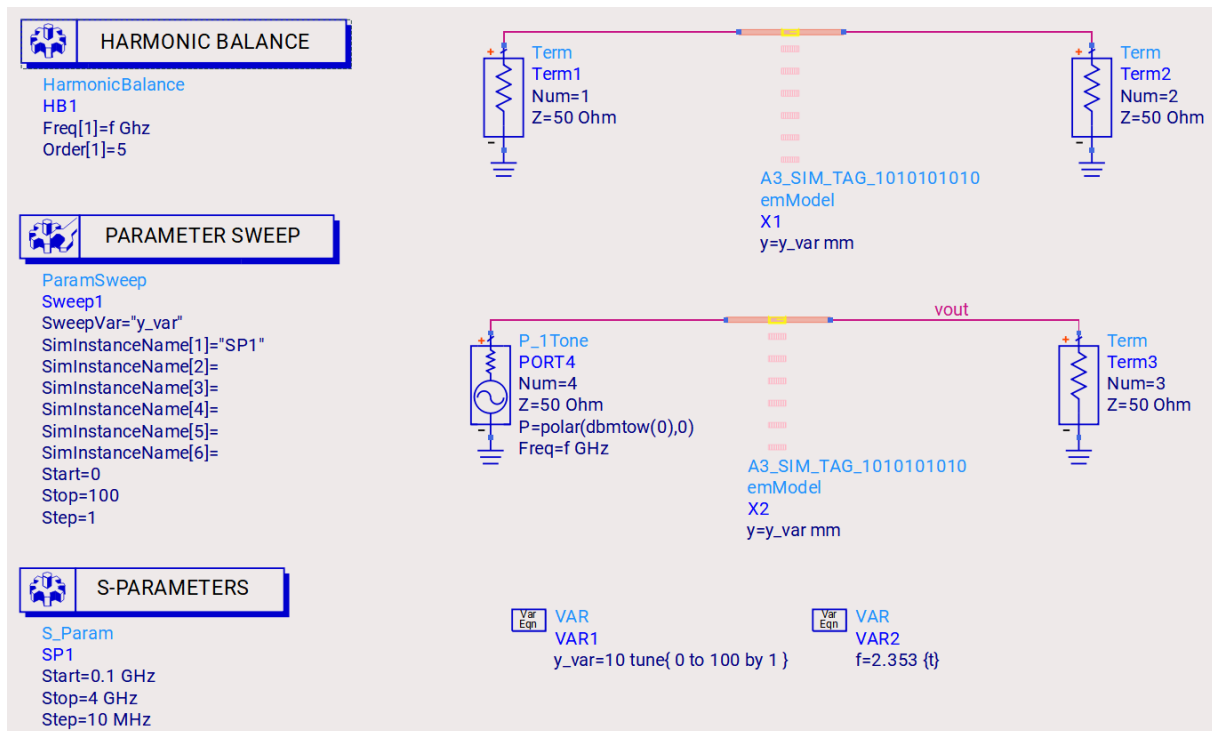


Figura 3.14: Esquemático empleado para realizar el análisis paramétrico de las etiquetas.

El esquemático empleado durante la simulación está formado por dos bloques principales. El primer bloque permite calcular la respuesta electromagnética del sistema para cada posición de la etiqueta durante el barrido paramétrico. El segundo bloque incorpora una fuente encargada de generar un tren de pulsos sintonizado a la frecuencia de resonancia del lector. De esta forma, para cada posición de la etiqueta se inyecta una señal a la frecuencia de trabajo del sistema y se registra la potencia recibida en el puerto 3. A partir de estas variaciones de potencia es posible distinguir entre la presencia y la ausencia de material metálico y, por tanto, determinar si la posición analizada corresponde a un 1 lógico o a un 0 lógico.

Con el objetivo de validar el funcionamiento del sistema, se diseñaron tres etiquetas con codificaciones diferentes: 1111111111, 1101111011 y 1010101010. A partir de ellas se evaluó la capacidad del lector para distinguir correctamente diferentes secuencias binarias.

3.5. Resultados de la simulación

3.5.1. Etiqueta con codificación 1111111111

El primer caso de estudio corresponde a la etiqueta con codificación 1111111111. En esta configuración todas las posiciones binarias contienen metal, por lo que se espera obtener una

respuesta periódica asociada al paso sucesivo de los diez parches metálicos sobre la zona de lectura.

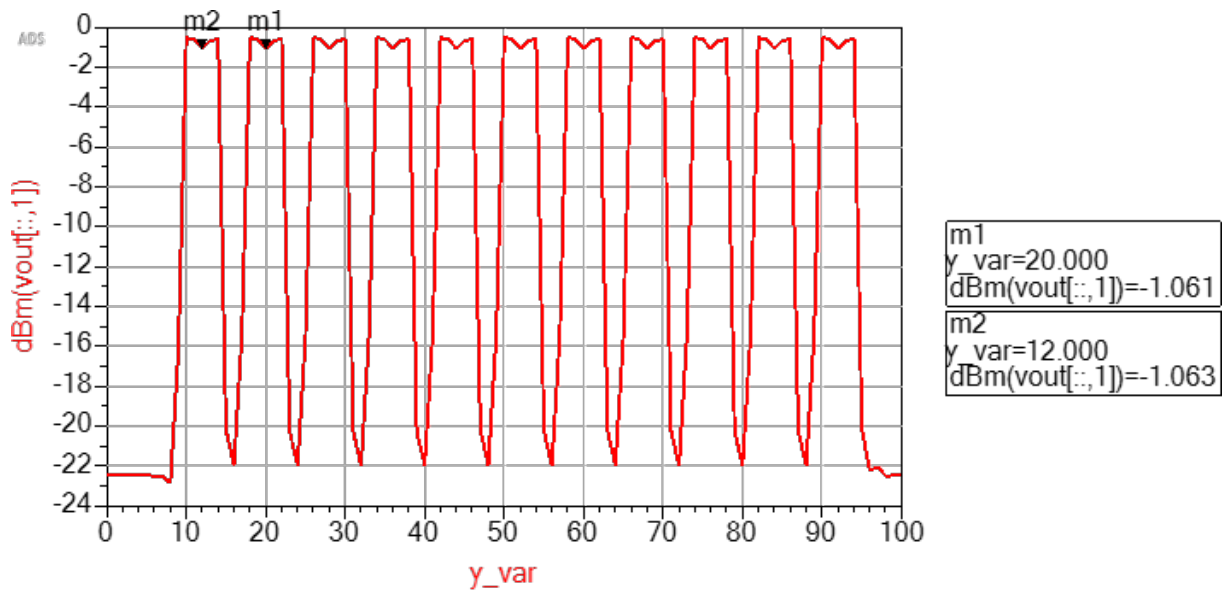


Figura 3.15: Respuesta obtenida para la etiqueta 1111111111.

La Figura 3.15 muestra la potencia recibida a medida que la etiqueta se desplaza sobre el lector. Puede observarse una secuencia periódica de máximos separados aproximadamente 8 mm entre sí, distancia que coincide con el tamaño asignado a cada posición binaria.

Cada uno de estos máximos aparece cuando un parche metálico se sitúa sobre la región de máxima sensibilidad del lector. Debido a que todas las posiciones contienen metal, la respuesta se mantiene prácticamente constante a lo largo de toda la etiqueta, verificando la correcta detección de los diez bits correspondientes a un 1 lógico.

3.5.2. Etiqueta con codificación 1101111011

Una vez comprobada la detección continua de unos lógicos, se analizó una segunda etiqueta que incorpora posiciones sin material metálico. Para ello se empleó la codificación 1101111011.

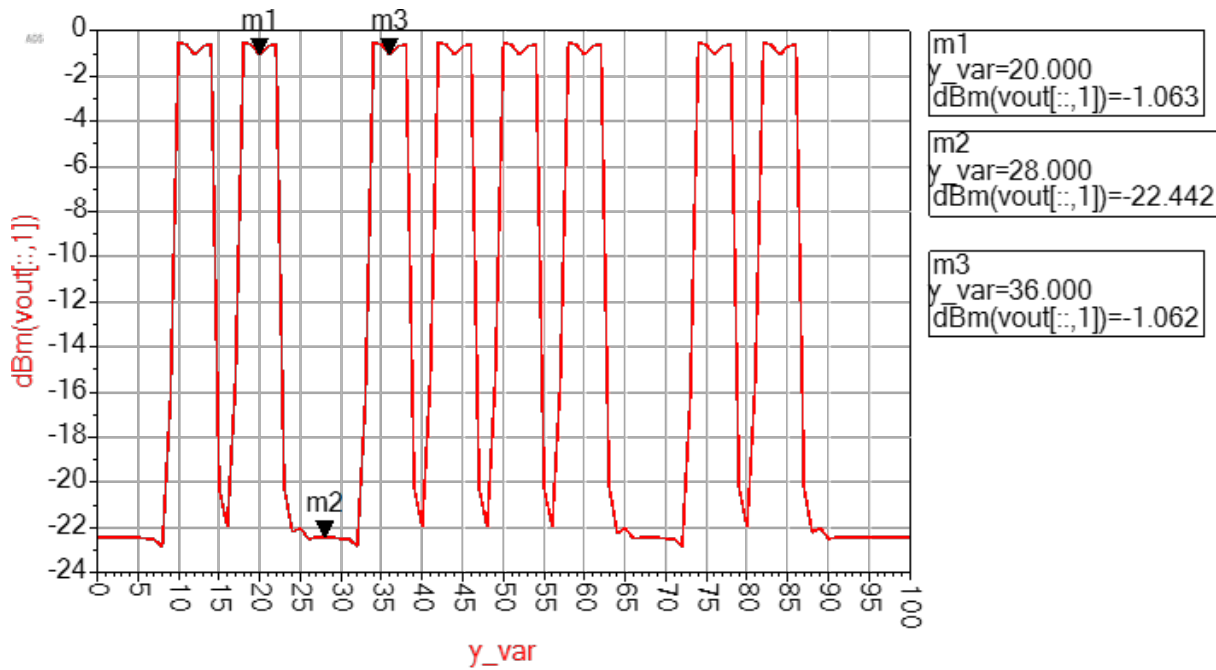


Figura 3.16: Respuesta obtenida para la etiqueta 1101111011.

Como puede observarse en la Figura 3.16, aparecen dos niveles claramente diferenciados de potencia. Cuando la posición analizada contiene un parche metálico, la potencia recibida aumenta hasta valores próximos a - 1.063 dBm.

Por el contrario, cuando la posición corresponde a un 0 lógico y no existe metal sobre la zona de lectura, la potencia permanece próxima al valor de referencia, alcanzando valores cercanos a - 22.442 dBm.

Esta diferencia se debe a que la señal utilizada para realizar la lectura se encuentra sintonizada a la frecuencia de resonancia del lector. Cuando no existe metal sobre el resonador, la respuesta del sistema se mantiene en dicha frecuencia y la potencia recibida es máxima.

Sin embargo, cuando un parche metálico se sitúa sobre la zona de lectura, se produce un desplazamiento de la frecuencia de resonancia. Como la frecuencia de excitación permanece fija, el sistema deja de trabajar exactamente en resonancia y la potencia recibida disminuye.

Como consecuencia, los máximos de potencia pueden asociarse a la presencia de metal, mientras que los mínimos corresponden a posiciones donde únicamente se encuentra el sustrato. Esta diferencia entre ambos niveles permite distinguir de forma clara la presencia o ausencia de metal en cada posición de la etiqueta y, por tanto, reconstruir correctamente la secuencia binaria almacenada.

3.5.3. Comparación entre etiquetas

Finalmente, se compararon las respuestas obtenidas para las etiquetas 1101111011 y 1010101010 con el objetivo de verificar si el sistema era capaz de diferenciar entre codificaciones distintas.

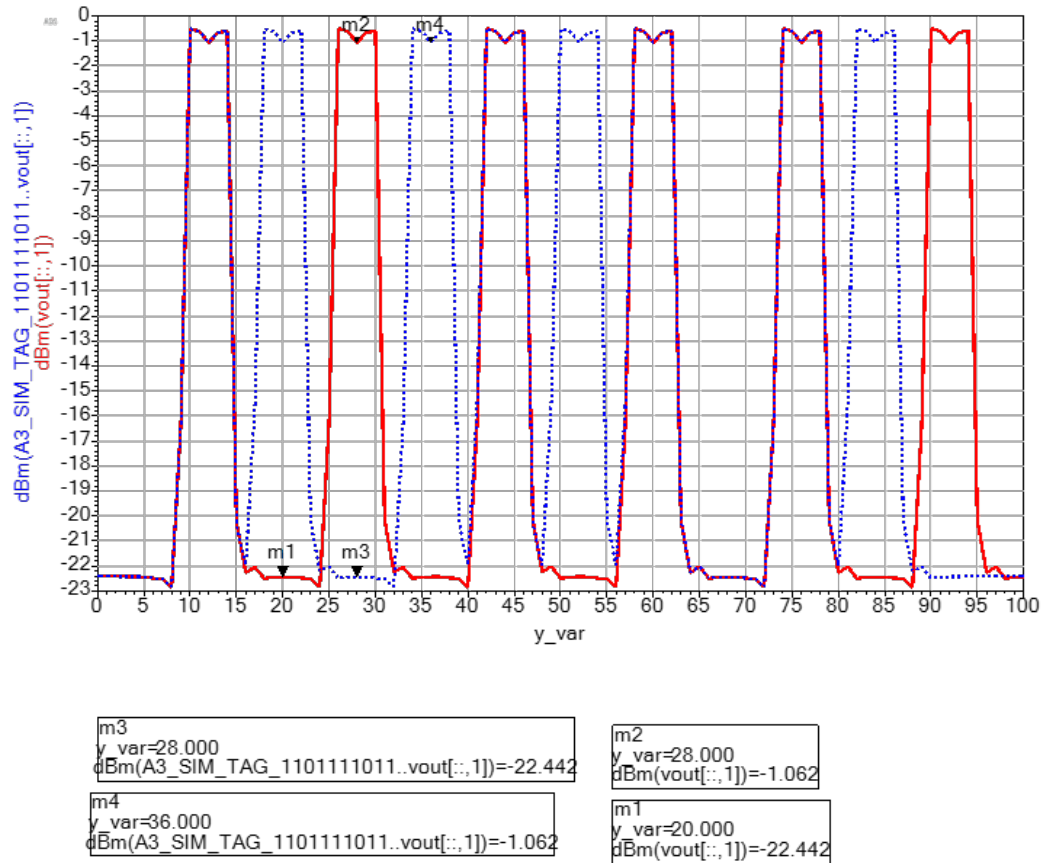


Figura 3.17: Comparación entre las respuestas obtenidas para las etiquetas 1101111011 y 1010101010.

Tal y como se observa en la Figura 3.17, ambas etiquetas presentan una respuesta diferente a medida que avanzan sobre el lector. Las variaciones observadas coinciden con las posiciones en las que una etiqueta contiene metal y la otra no, permitiendo distinguir claramente ambas codificaciones.

Estos resultados demuestran que el sistema es capaz de identificar correctamente la presencia o ausencia de metal en cada posición binaria y, por tanto, diferenciar entre etiquetas con códigos distintos.

Una vez verificado el funcionamiento del sistema mediante simulación, las tres configuraciones analizadas fueron seleccionadas para su fabricación y posterior validación experimental. Los

layouts finales de las etiquetas empleados durante la fase de medidas se muestran en la Figura 3.18.

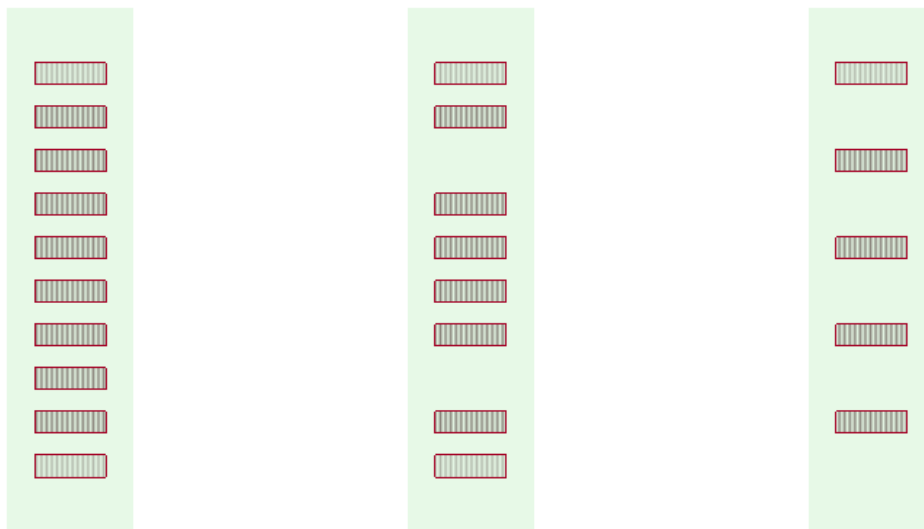


Figura 3.18: Etiquetas seleccionadas para su fabricación y validación experimental.

Capítulo 4

Fabricación y validación experimental

4.1. Tecnología de fabricación del prototipo

La fabricación del lector y de los tres prototipos de etiquetas se llevó a cabo mediante una fresadora LPKF ProtoMat. Esta herramienta permite transferir directamente los diseños obtenidos en el programa Advanced Design System (ADS) al sustrato Rogers RO4003 eliminando directamente el cobre de la superficie del sustrato sin necesidad de emplear procesos fotolitográficos ni productos químicos.

El procedimiento de fabricación comenzó una vez finalizado el diseño electromagnético de las diferentes estructuras en Advanced Design System (ADS). Tras verificar el correcto funcionamiento de los diseños mediante simulación, se generaron los correspondientes *layouts* físicos de fabricación. Estos *layouts* contienen toda la información geométrica necesaria para reproducir las estructuras diseñadas sobre el sustrato seleccionado.

En el caso del lector, la estructura se implementó mediante tecnología *slotline*, por lo que fue necesario definir tanto las regiones conductoras como las zonas de cobre que debían eliminarse durante el proceso de mecanizado. Para facilitar esta tarea se empleó una capa auxiliar denominada *resi*, utilizada como referencia geométrica para delimitar las dimensiones físicas finales del dispositivo y definir con precisión las áreas que debían ser procesadas durante la fabricación.

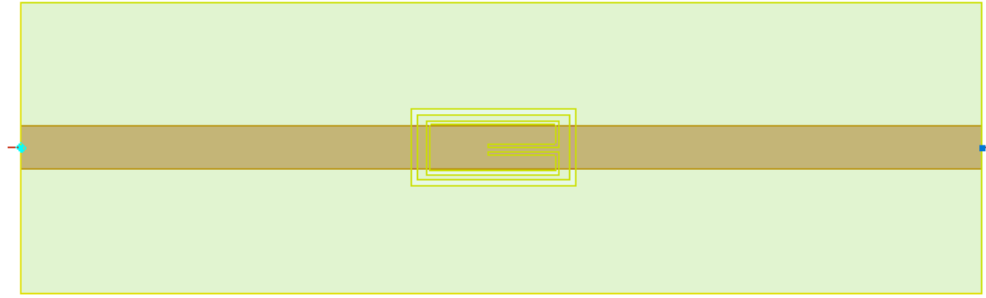


Figura 4.1: Layout final del lector utilizado para la generación de los archivos de fabricación.

La Figura 4.1 muestra el *layout* final del lector generado en ADS. En ella puede observarse la estructura resonante situada en la región central de la línea, así como la capa *resi*, representada en color verde, que permite visualizar la superficie total ocupada por el dispositivo una vez fabricado.

Una vez completado el diseño, ADS permitió exportar los archivos de fabricación en formato Gerber, estándar ampliamente utilizado en la industria de circuitos impresos. Estos archivos contienen la información geométrica correspondiente a cada una de las capas del dispositivo, incluyendo las regiones conductoras, las zonas de mecanizado y los contornos físicos necesarios para la fabricación de la placa.

Posteriormente, los archivos Gerber fueron importados al software de control de la fresadora LPKF ProtoMat. A partir de esta información, el equipo generó automáticamente las trayectorias de mecanizado necesarias para eliminar selectivamente el cobre de la superficie del sustrato y reproducir con precisión las geometrías definidas durante la etapa de diseño.

A diferencia de los métodos convencionales de fabricación de circuitos impresos basados en fotolitografía y ataque químico, la tecnología de fresado mecánico emplea una herramienta rotativa de pequeño diámetro que elimina físicamente el cobre de las zonas seleccionadas. Este procedimiento no solamente permite reducir considerablemente los tiempos de fabricación sino que también nos permite obtener prototipos funcionales de forma más ágil.

4.2. Materiales utilizados

El sustrato principal utilizado fue el Rogers RO4003, un laminado ampliamente empleado en circuitos de alta frecuencia debido a sus reducidas pérdidas dieléctricas y a la estabilidad de sus propiedades eléctricas. Este sustrato presenta una constante dieléctrica relativa de $\epsilon_r = 3,45$, valor utilizado durante la etapa de diseño electromagnético para la definición del sustrato empleado para la simulación. Asimismo, dispone de una baja tangente de pérdidas, lo que

contribuye a reducir la disipación de potencia y permite obtener resonancias más definidas durante el funcionamiento del sistema.

Las placas utilizadas presentan un espesor de 1,52 mm y una metalización de cobre de 35 μm , parámetros que fueron considerados durante las simulaciones realizadas en ADS y posteriormente mantenidos durante la fabricación de los prototipos.

Además del sustrato, se emplearon conectores SMA para la conexión del lector a la instrumentación de medida. Este tipo de conectores es ampliamente utilizado en sistemas de radiofrecuencia debido a su buena adaptación de impedancias y a su capacidad para operar en rangos de frecuencia elevados, proporcionando una conexión coaxial robusta y repetible.

Durante la fase experimental también se utilizó un analizador vectorial de redes (VNA), concretamente el PNA N5221A, tanto para la caracterización inicial del lector como para la generación de la señal de excitación utilizada durante las medidas dinámicas.

La detección de las variaciones de amplitud producidas por el paso de las etiquetas se realizó mediante un detector de envolvente conectado a uno de los conectores SMA del lector, mientras que la visualización y registro de las señales temporales se llevó a cabo mediante un osciloscopio digital que estaba conectado directamente a la salida del detector de envolvente.

Tabla 4.1: Materiales y equipamiento utilizados durante la fabricación y validación experimental.

Elemento	Descripción
Equipo de fabricación	Fresadora LPKF ProtoMat
Analizador de redes	Keysight PNA N5221A
Kit de calibración	Patrón de calibración Keysight (SOLT)
Detección	Detector de envolvente
Visualización y adquisición	Osciloscopio digital

La Tabla 4.1 resume los principales materiales y equipos empleados durante la fabricación y validación experimental del sistema.

4.3. Fabricación del lector

Durante el proceso de fabricación del lector se eliminaron las zonas de cobre no deseadas, obteniendo la línea microstrip y la estructura resonante diseñada. Una vez finalizado el mecanizado, se inspeccionó visualmente la estructura para comprobar que las dimensiones de la línea coincidían con las especificadas en el diseño.

Posteriormente, se soldaron dos conectores SMA en los extremos de la línea microstrip para permitir la conexión del lector al analizador vectorial de redes durante las medidas experimentales. Finalmente, se verificó la continuidad eléctrica de la línea y la correcta fijación de los conectores.

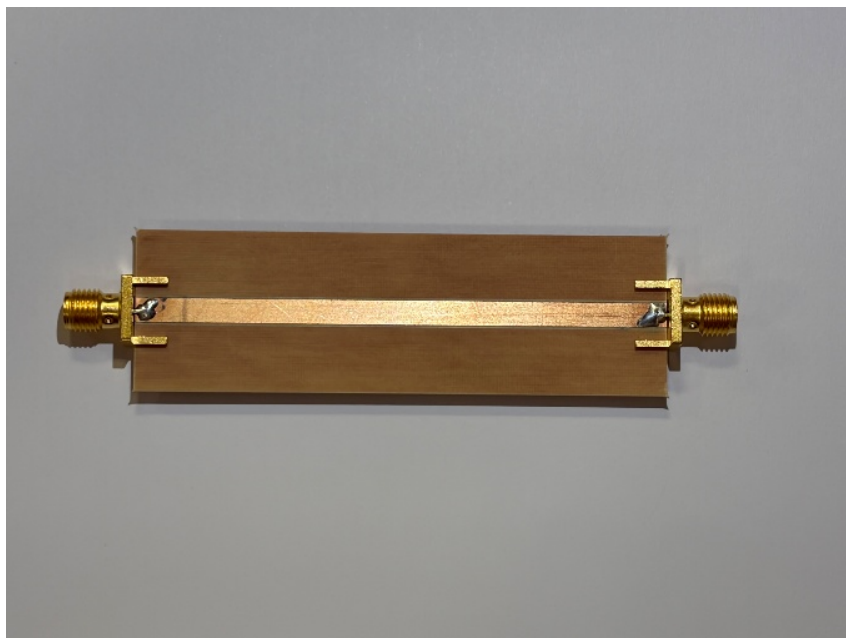


Figura 4.2: Prototipo del lector visto por la parte posterior.



Figura 4.3: Prototipo del lector visto por la parte frontal.

4.4. Fabricación de las etiquetas

En el caso de las etiquetas, se eliminaron las zonas de cobre no deseadas dejando únicamente las secciones metálicas que representan los valores lógicos 1. La ausencia de metal en una posición representa un 0 lógico. Cada configuración codifica una secuencia binaria diferente.



Figura 4.4: Tags fabricados para la validación del sistema.

La Figura 4.4 muestra los diferentes *tags* fabricados, donde puede observarse la variación en el número y disposición de las barras metálicas utilizadas para codificar la información.

4.5. Montaje experimental

Una vez fabricados el lector y las diferentes etiquetas, se procedió a la validación experimental del sistema. Para ello, se montó el banco de medida mostrado en la Figura 4.5, donde el lector se colocó sobre una estructura mecánica motorizada y la etiqueta se desplazaba por debajo de él durante el proceso de lectura. El sistema de adquisición utilizado para recuperar la información codificada en la etiqueta estaba formado por un analizador vectorial de redes (VNA), un circulador, un detector de envolvente y un osciloscopio.

En primer lugar, se configuró el VNA para trabajar alrededor de la frecuencia de resonancia obtenida durante la etapa de diseño. Posteriormente, se realizó un barrido frecuencial entre 0.1

y 4 GHz con el objetivo de verificar experimentalmente la respuesta del lector y compararla con los resultados obtenidos mediante simulación.

Una vez validado su funcionamiento, el VNA se utilizó como generador de señal, fijando una onda continua a la frecuencia de resonancia del lector. La señal generada se dirigía hacia el resonador a través del circulador, mientras que la señal reflejada era redirigida hacia la etapa de detección.

Cuando la etiqueta se desliza sobre la región de lectura, la presencia o ausencia de elementos metálicos modifica el acoplamiento electromagnético con el resonador, provocando variaciones en la amplitud de la señal reflejada. Estas variaciones son recogidas por el detector de envolvente, que convierte la señal de radiofrecuencia en una señal de tensión proporcional a la potencia reflejada.

Finalmente, la señal de tensión obtenida se visualiza mediante el osciloscopio, permitiendo analizar la respuesta temporal generada durante el desplazamiento de la etiqueta. Para garantizar un movimiento uniforme y repetible, las medidas se realizaron utilizando un sistema mecánico motorizado mostrado en la Figura 4.5. De este modo, la distribución espacial de elementos metálicos presente en la etiqueta se transforma en una secuencia temporal de máximos y mínimos de tensión, a partir de la cual es posible reconstruir la información binaria almacenada en el tag.

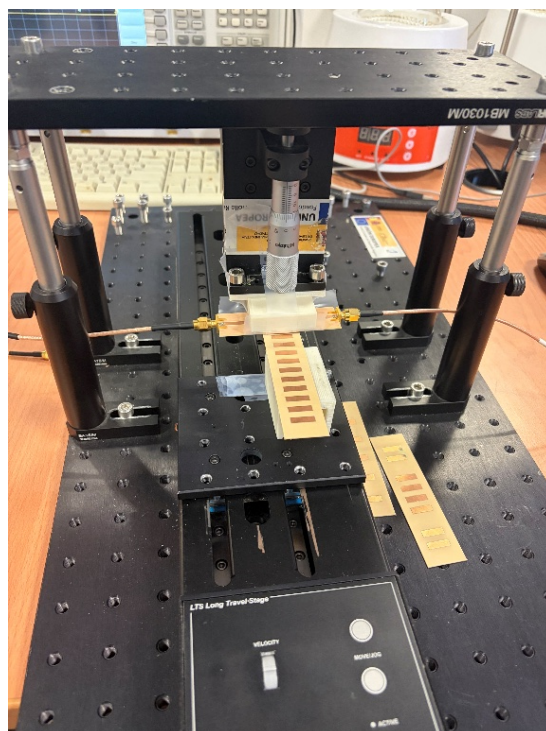


Figura 4.5: Montaje experimental utilizado para la validación del sistema.

Con el objetivo de validar experimentalmente el diseño del lector, se comparó la respuesta

frecuencial obtenida mediante simulación con la medida realizada sobre el prototipo fabricado. La Figura 4.6 muestra la evolución del parámetro S_{21} en ambos casos.

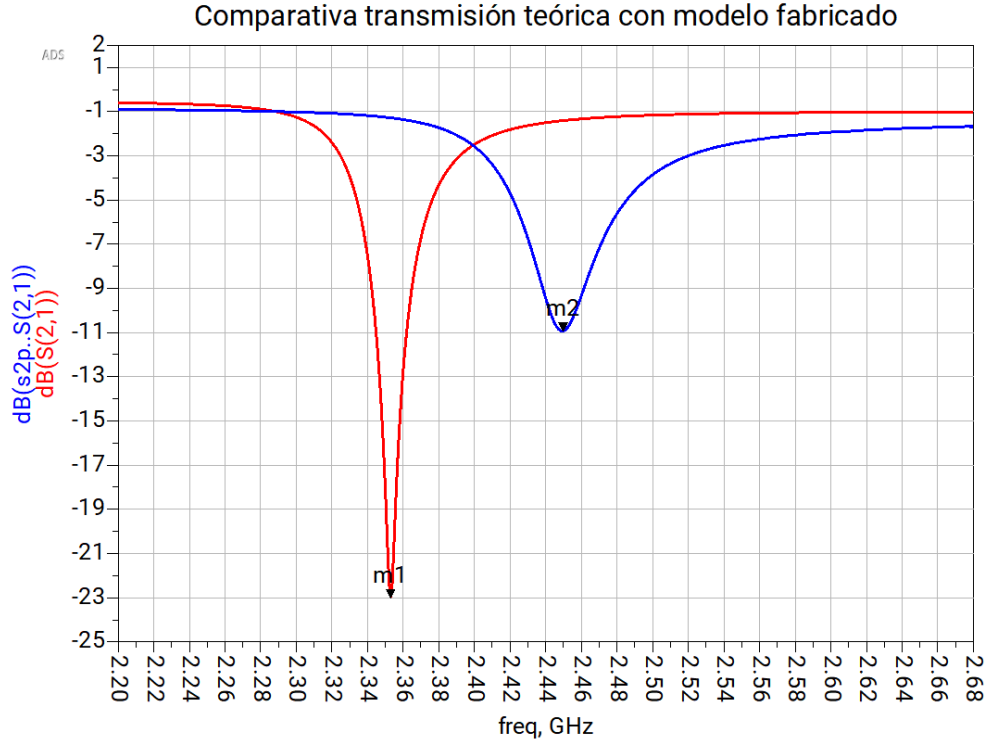


Figura 4.6: Comparativa simulación con fabricación

Puede observarse que la estructura fabricada mantiene el comportamiento resonante previsto durante la etapa de diseño. El marcador m_1 identifica la frecuencia de resonancia obtenida mediante simulación, situada en 2.410 GHz, con un mínimo de transmisión de aproximadamente -20,95 dB. Por su parte, el marcador m_2 corresponde a la frecuencia de resonancia medida sobre el prototipo fabricado, localizada en 2.450 GHz, con un mínimo de transmisión de -10,94 dB.

Este desplazamiento de 40 MHz y la reducción de la profundidad de la resonancia pueden atribuirse principalmente a las tolerancias del proceso de fabricación, las variaciones en los parámetros reales del sustrato y las pérdidas introducidas por los conectores y el montaje experimental. No obstante, la respuesta obtenida experimentalmente reproduce el comportamiento resonante previsto por simulación, validando el correcto funcionamiento del lector y permitiendo continuar con la caracterización del sistema completo.

Una vez verificado el correcto funcionamiento del lector, se realizaron las diferentes medidas experimentales sobre las etiquetas diseñadas. A partir de estas medidas fue posible analizar la respuesta del sistema y reconstruir la información codificada en cada *tag*, tal y como se muestra en el siguiente apartado.

4.6. Resultados experimentales

A través del montaje descrito se obtuvieron las primeras medidas experimentales del sistema.

En la Figura 4.7 se muestra la respuesta temporal obtenida para tres etiquetas diferentes, correspondientes a los códigos binarios 1111111111, 1010101010 y 1101111011.

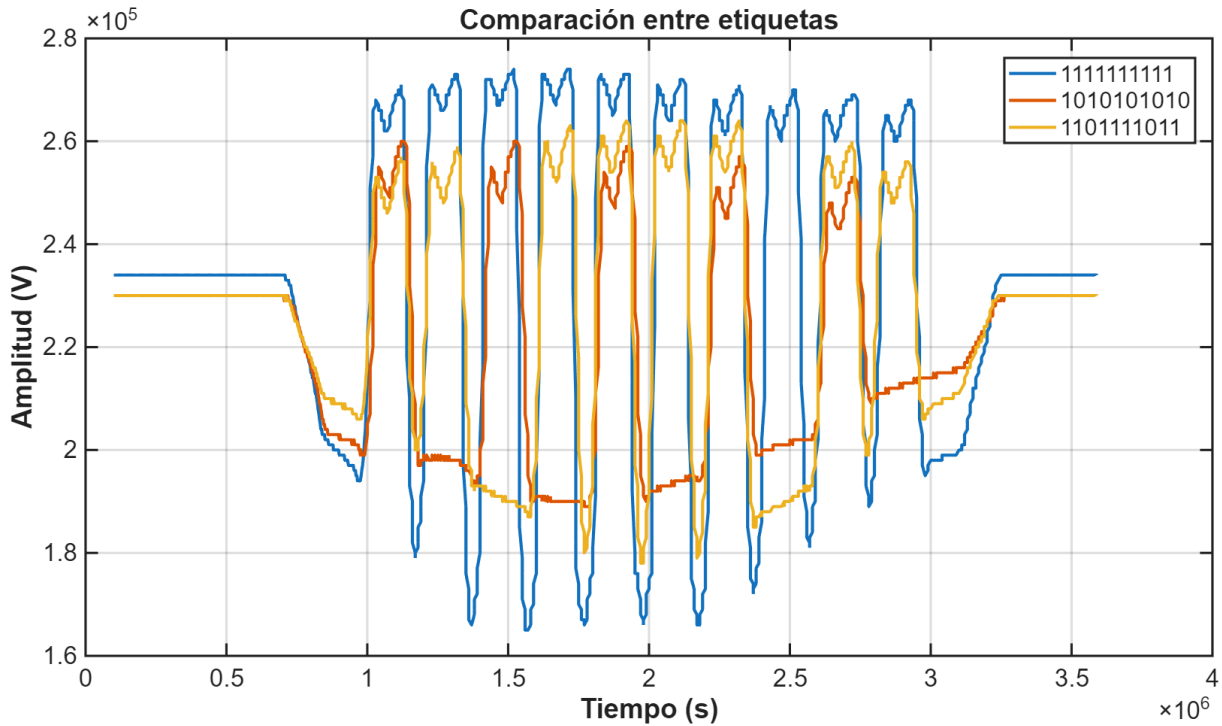


Figura 4.7: Adquisición de datos de las tres etiquetas.

Puede observarse que la etiqueta 1111111111 presenta los mínimos de tensión más pronunciados, alcanzando valores próximos a 1.7 V, mientras que los máximos se sitúan alrededor de 2.7 V. Este comportamiento es coherente con la presencia continua de elementos metálicos a lo largo de toda la etiqueta, de modo que el lector detecta de forma sucesiva estados lógicos '1' durante todo el recorrido.

Por otro lado, en las etiquetas 1010101010 y 1101111011 aparecen regiones donde no existe elemento metálico asociado al bit correspondiente. En estas posiciones, la amplitud de la señal se mantiene alrededor de 1.9 V, valor que se ha asociado al estado lógico '0'. Como consecuencia, la alternancia entre mínimos y máximos permite reconstruir la secuencia binaria almacenada en cada etiqueta.

Idealmente, si el sistema no presentase pérdidas y el coeficiente de unitariedad fuese igual a la unidad, la respuesta obtenida estaría comprendida entre 0 V y 1 V. Sin embargo, debido a las pérdidas introducidas por los cables, conectores, componentes del sistema y por la

propia estructura resonante, el rango de operación obtenido experimentalmente se encuentra aproximadamente entre 1.9 V y 2.8 V.

Para calcular el periodo de las etiquetas, se han realizado dos análisis. Por un lado, se ha cogido dos mínimos consecutivos de la etiqueta '111111111' para poder determinar el periodo de símbolo del bit 1. Posteriormente, se ha estudiado la etiqueta 01010101010, con el objetivo de verificar el tiempo de bit asociado al símbolo lógico 0" y comprobar la consistencia temporal de la codificación empleada.

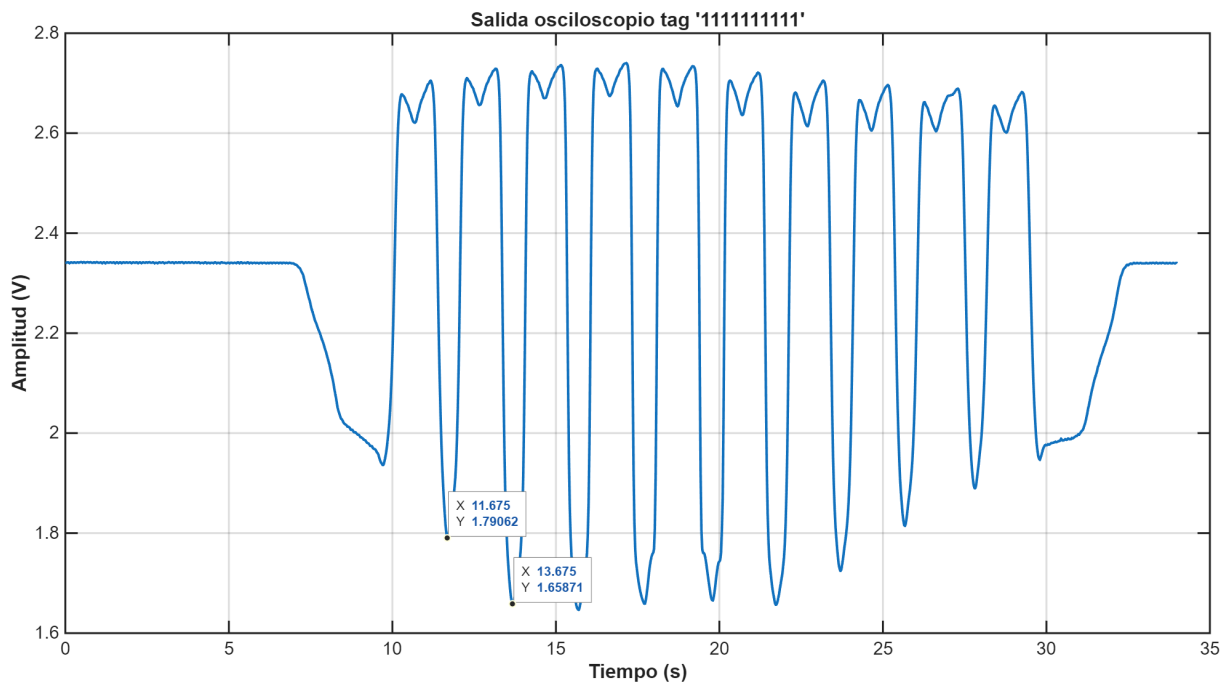


Figura 4.8: Adquisición de datos de las tres etiquetas.

Podemos observar en la Figura 4.8 como al inicio de la adquisición se mantiene constante en 2.34 V y a los 7 segundos de iniciar la adquisición se ve una bajada de tensión alrededor de los 2 V. Eso se debe a que al principio de la adquisición el lector solo estaba detectando aire y a medida que se iba acercando el tag mediante un desplazamiento secuencial, lo primero que detectó el tag fue el sustrato que hay en la estructura. Posteriormente detectó un 1 y entre un bit y otro, se generó un pico de tensión que corresponde a la separación de 4mm que hay entre bit y bit.

Debido a que esta secuencia está formada únicamente por unos lógicos consecutivos, la señal presenta un comportamiento periódico caracterizado por una sucesión de oscilaciones de amplitud similar. Esta propiedad permite determinar directamente el período temporal de la señal.

Para calcular el período de la señal, se han seleccionado dos mínimos consecutivos perte-

necientes a ciclos sucesivos. Estos puntos representan la misma condición de fase dentro de la oscilación, por lo que la diferencia temporal entre ellos corresponde al período de la señal.

A partir de los marcadores mostrados en la Figura 4.8, se identifican tres mínimos consecutivos situados en los instantes $t_1 = 11,675$ s, $t_2 = 13,675$ s y $t_3 = 15,675$ s. La separación temporal entre mínimos consecutivos es constante e igual a 2,000 s, por lo que el período de bit asociado a la etiqueta 1111111111 puede expresarse como:

$$T_{bit} = 2,000 \text{ s} \quad (4.1)$$

Este resultado coincide con la separación observada a lo largo de toda la región oscilatoria de la señal, confirmando la estabilidad temporal de la respuesta y la correcta identificación de los ciclos empleados para el cálculo del período.

Una vez determinado el período asociado al símbolo lógico '1', en el caso del análisis de la etiqueta 1010101010, al tratarse de una secuencia alternante de unos y ceros lógicos, resulta más adecuado determinar directamente el tiempo de bit asociado al símbolo lógico '0' mediante la medida del intervalo temporal comprendido entre el final de un nivel lógico '1' y el inicio del siguiente nivel lógico '1'.

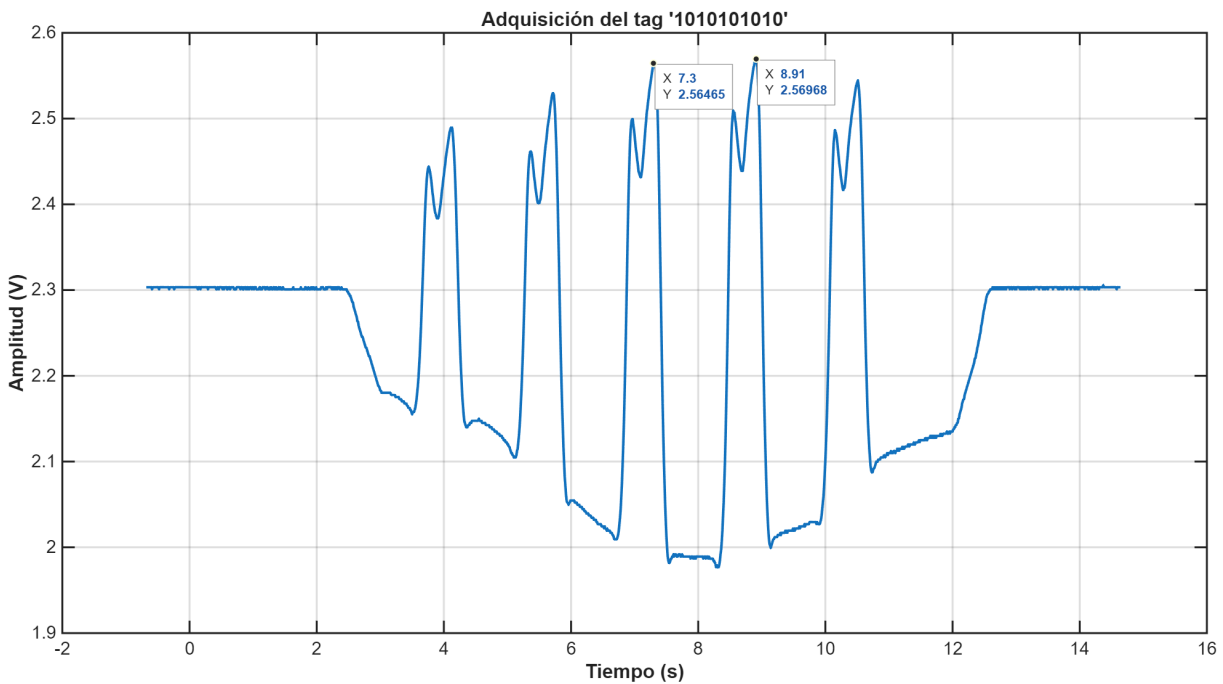


Figura 4.9: Adquisición de datos de la etiqueta 1010101010

En la Figura 4.9 puede observarse nuevamente una región inicial con un nivel de tensión prácticamente constante, correspondiente a la ausencia de la etiqueta frente al lector. Sin em-

bargo, una vez se detecta el primer bit con valor lógico 0, la señal desciende y se mantiene en un nivel inferior, indicando la presencia de una perturbación asociada a un cero lógico.

Durante el proceso de adquisición se procuró mantener la etiqueta lo más nivelada posible respecto al lector, con el objetivo de conservar una distancia constante entre ambas estructuras. A pesar de ello, existen pequeñas variaciones mecánicas inevitables que producen ligeras fluctuaciones en el nivel de tensión asociado a la detección de los bits. Estas variaciones son especialmente apreciables en los niveles correspondientes a los ceros lógicos, mientras que la detección de los unos se mantiene más estable a lo largo de toda la medida.

A partir de los resultados obtenidos, es posible establecer diferentes niveles de tensión para la identificación de cada estado. Valores comprendidos entre 2.4 V y 2.6 V se asocian a la detección de un 1 lógico, tensiones cercanas a 2.3 V corresponden a la ausencia de etiqueta y valores situados entre 2.0 V y 2.2 V indican la detección de un 0 lógico. Esta separación entre niveles permite discriminar de forma clara los distintos estados presentes durante el proceso de lectura.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones principales

En este trabajo se ha estudiado un sistema *chipless RFID* de campo cercano basado en resonadores electromagnéticos para la detección de elementos metálicos. La propuesta se fundamenta en la sustitución del chip de silicio por una estructura pasiva cuya respuesta varía en función de la presencia o ausencia de metal en la región de lectura.

A partir del análisis teórico se ha justificado el uso del campo cercano para aplicaciones de detección de proximidad, ya que las perturbaciones locales producidas por elementos metálicos modifican de forma medible la respuesta del resonador. También se han estudiado diferentes topologías resonantes y se ha seleccionado la topología SRR por presentar una resonancia más selectiva, menor ancho de banda y mayor factor de calidad en comparación con EC-SRR y S-SRR.

El diseño propuesto permite codificar información mediante secuencias espaciales de parches metálicos. Las simulaciones realizadas con etiquetas de distintas codificaciones han mostrado que el sistema es capaz de diferenciar entre posiciones con metal y posiciones sin metal, permitiendo reconstruir la secuencia binaria almacenada en el *tag*.

5.2. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos muestran una clara diferenciación entre los estados lógicos 1 y 0, reproduciendo el comportamiento previsto durante la fase de simulación. En todas las etiquetas analizadas es posible identificar las variaciones de amplitud asociadas a la presencia o ausencia de material metálico sobre la región de lectura, permitiendo reconstruir correctamente la secuencia binaria codificada.

Sin embargo, el nivel asociado al estado lógico 0 no permanece constante en todas las medidas realizadas. Durante la fase experimental fue necesario sustituir manualmente cada etiqueta en el sistema mecánico de desplazamiento, intentando mantener siempre la misma posición respecto al lector. A pesar de ello, pequeñas variaciones en la colocación de las etiquetas pudieron modificar ligeramente la distancia de separación entre ambas estructuras.

Dado que el sistema se basa en el acoplamiento electromagnético de campo cercano, estas variaciones geométricas producen cambios apreciables en la amplitud de la señal detectada. Como consecuencia, los intervalos correspondientes a los estados lógicos 0 presentan ligeras variaciones de amplitud a lo largo de la secuencia medida. Este comportamiento puede atribuirse a una pequeña inclinación de la etiqueta durante la adquisición, provocando que determinadas regiones del *tag* se encuentren más próximas al lector que otras.

A pesar de estas variaciones, la identificación de los bits resulta sencilla. El nivel correspondiente al estado lógico 1 se distingue claramente del resto de la señal, mientras que el estado lógico 0 puede identificarse tomando como referencia la respuesta obtenida al inicio de la medida, cuando únicamente se encuentra presente el sustrato de la etiqueta antes de comenzar la lectura de los bits codificados.

5.3. Limitaciones del sistema

La principal limitación observada en el sistema desarrollado está relacionada con el compromiso existente entre el tamaño físico de la etiqueta y las prestaciones de comunicación obtenidas.

En particular, la reducción de las dimensiones de la etiqueta permite disminuir el espacio ocupado y facilitar su integración en diferentes aplicaciones. Sin embargo, esta disminución de tamaño también afecta a la capacidad de la estructura para interactuar con la señal electromagnética incidente.

A medida que se reduce el tamaño de la etiqueta, disminuye la energía reflejada hacia el receptor, lo que provoca una reducción de la amplitud de la señal detectada y una menor relación señal-ruido. Como consecuencia, la detección de los cambios de estado asociados a los bits transmitidos resulta más compleja y menos robusta frente a perturbaciones externas.

Por otro lado, el aumento de la velocidad de transmisión implica una reducción del tiempo disponible para distinguir entre símbolos consecutivos. Aunque una mayor tasa de transmisión permite incrementar la cantidad de información enviada por unidad de tiempo, también exige una mayor resolución temporal en el sistema de adquisición y procesamiento. En estas condiciones, pequeñas variaciones en la respuesta temporal de la etiqueta pueden traducirse en errores de detección o decodificación. Por tanto, existe un compromiso entre el tamaño de la etiqueta y la velocidad de transmisión alcanzable.

Las etiquetas de menor tamaño ofrecen ventajas desde el punto de vista de la integración y el coste, pero a su vez limitan la potencia retrodispersada y, por consiguiente, la fiabilidad de la comunicación.

De forma análoga, incrementar la velocidad de transmisión mejora la capacidad de transferencia de información, aunque reduce el margen temporal disponible para la correcta detección de los símbolos.

En consecuencia, el diseño final debe buscar un equilibrio entre compactación física, alcance de comunicación y velocidad de transmisión, de forma que se garantice una lectura fiable de la información codificada y reduciendo costes de fabricación.

Capítulo 6

Uso de herramientas de Inteligencia Artificial

Durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado se han utilizado herramientas basadas en inteligencia artificial como apoyo en determinadas tareas de redacción y revisión del documento.

Concretamente, se ha empleado ChatGPT (OpenAI) como herramienta de asistencia para la mejora de la expresión escrita, la corrección gramatical y la reformulación de algunos fragmentos del texto. Asimismo, se ha utilizado como apoyo para resolver dudas puntuales relacionadas con la sintaxis de $\text{\LaTeX}$ y la organización del documento.

En ningún caso las herramientas de inteligencia artificial han sido utilizadas para generar resultados experimentales, realizar simulaciones, desarrollar el trabajo técnico ni sustituir el análisis realizado por la autora. Todas las decisiones de diseño, cálculos, simulaciones, resultados y conclusiones presentadas en este trabajo han sido elaboradas, verificadas e interpretadas por la autora.

El uso de estas herramientas se ha limitado exclusivamente a funciones de asistencia y apoyo a la redacción, manteniendo en todo momento la responsabilidad sobre el contenido final del documento.

Bibliografía

- [1] F. Paredes, C. Herrojo, J. Mata-Contreras, M. Moras, A. Núñez, E. Ramón y F. Martín, “Near-Field Chipless Radio-Frequency Identification System with Switching Reading,” *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1148, 2018.
- [2] F. Paredes, C. Herrojo y F. Martín, “An Approach for Synchronous Reading of Near-Field Chipless-RFID Tags,” en *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, Pisa, Italia, 2019, pp. 192–195.
- [3] F. Martín, C. Herrojo, J. Mata-Contreras y F. Paredes, *Time-Domain Signature Barcodes for Chipless-RFID and Sensing Applications*. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [4] Rogers Corporation, *RO4000 Series High Frequency Circuit Materials Data Sheet*, Rogers Corporation, Chandler, AZ, USA.
- [5] F. Paredes, C. Herrojo, J. Mata-Contreras, M. Moras, A. Núñez, E. Ramón y F. Martín, “Near-Field Chipless Radio-Frequency Identification System with Switching Reading,” *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1148, 2018.