

Diseño de antenas RFID en sustratos de papel

Ángel Anta Félix

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación
Sistemas de Alta Frecuencia

Ignacio Gil Galí

Germán Cobo Rodríguez

Enero 2020



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

A mi madre y a mi hermano.

A los que no están.

Gracias.

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Diseño de antenas RFID en sustratos de papel</i>
Nombre del autor:	<i>Ángel Anta Félix</i>
Nombre del consultor/a:	<i>Ignacio Gil Galí</i>
Nombre del PRA:	<i>Germán Cobo Rodríguez</i>
Fecha de entrega:	01/2020
Titulación:	<i>Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Sistemas de Alta Frecuencia</i>
Idioma del trabajo:	<i>Castellano</i>
Palabras clave	<i>RFID, papel, inkjet printing</i>

Resumen del Trabajo:

En la actualidad, el rápido desarrollo de las comunicaciones inalámbricas ha provocado que, en el mundo en que vivimos, este todo prácticamente conectado. Dentro de este tipo de comunicaciones las antenas juegan un papel fundamental. Dichas antenas pueden clasificarse en varios grupos dependiendo de su topología como antenas tipo parche o antenas tipo dipolo.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) es proponer un nuevo diseño de antena dipolo RFID en la banda UHF sobre un sustrato flexible de papel.

Para ello, se analiza profundamente el estado del arte de las antenas RFID, se estudian los principales parámetros de una antena, así como el sustrato, se simulan diferentes antenas ya existentes estudiando así, las prestaciones las mismas.

Después, se realiza un diseño de una antena tipo dipolo sobre un sustrato de papel. Finalmente, se optimiza esta antena para un chip comercial

Como resultado final, se obtiene un diseño optimizado de una antena RFID para el rango de frecuencias UHF de la región europea logrando así, todos los objetivos propuestos.

Esta memoria concluye con una breve reflexión sobre los objetivos conseguidos y las líneas futuras de trabajo.

Abstract:

Nowadays, the fast development of wireless communications has caused that, in the world in which we live, everything is practically connected. Within this type of communications, the antennas play a fundamental role. These antennas can be classified into several groups of their topology as patch antennas or dipole antennas.

The main objective of this Thesis (TFG) is to propose a new RFID dipole antenna design in the UHF band on a flexible paper substrate.

To do this, it deeply analyzes the state of the art of the RFID antennas, studies the main parameters of an antenna, as well as the substrate, simulates different antennas and thus studying their performance.

Then, a design of a dipole antenna is performed on a paper substrate. Finally, this antenna is optimized for a commercial chip.

As a result, an optimized design of an RFID antenna is obtained for the UHF frequency range of the European region thus achieving all the proposed objectives.

This report concludes with a brief thought on the objectives achieved and the future lines of work.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	1
1.2	OBJETIVOS DEL TRABAJO	1
1.3	ENFOQUE Y MÉTODO SEGUIDO.....	2
1.4	PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	2
1.4.1	<i>Tareas que realizar</i>	3
1.4.2	<i>Planificación temporal</i>	3
1.5	BREVE SUMARIO DE PRODUCTOS OBTENIDOS	6
1.6	BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS OTROS CAPÍTULOS DE LA MEMORIA.....	6
2.	ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA RFID, ANTENAS RFID Y SUSTRATOS DE PAPEL.....	9
2.1	IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA – RFID.....	9
2.1.1	<i>Concepto</i>	9
2.1.2	<i>Historia</i>	9
2.1.3	<i>Arquitectura y componentes</i>	10
2.1.4	<i>Frecuencias utilizadas</i>	12
2.1.5	<i>Funcionamiento</i>	14
2.1.6	<i>Estandarización y regulación</i>	15
2.1.7	<i>Aplicaciones</i>	16
2.1.8	<i>Beneficios e inconvenientes</i>	17
2.1.9	<i>Antenas RFID</i>	18
2.2	PAPEL COMO SUSTRATO FLEXIBLE	21
2.3	TECNOLOGÍA POR INYECCIÓN DE TINTA	23
3.	PARÁMETROS PRINCIPALES EN EL DISEÑO DE UNA ANTENA RFID SOBRE SUSTRATO DE PAPEL.....	27
3.1	PARÁMETROS GENERALES	27
3.1.1	<i>Frecuencia de operación</i>	27
3.1.2	<i>Máxima potencia permitida</i>	27
3.2	PARÁMETROS DE ANTENA	27
3.2.1	<i>Ancho de banda</i>	27
3.2.2	<i>Polarización</i>	28
3.2.3	<i>Eficiencia de radiación y eficiencia de antena</i>	30
3.2.4	<i>Diagrama de radiación</i>	30
3.2.5	<i>Impedancia</i>	31
3.2.6	<i>Directividad</i>	32
3.2.7	<i>Ganancia</i>	32
3.2.8	<i>Área efectiva</i>	32
3.2.9	<i>Factor de antena</i>	33
3.3	PARÁMETROS DEL SUSTRATO	33
3.3.1	<i>Permitividad eléctrica o constante dieléctrica</i>	33
3.3.2	<i>Tangente de pérdidas</i>	33
3.4	RANGO DE FUNCIONAMIENTO.....	34
4.	ANÁLISIS DE ANTENAS RFID SOBRE DIFERENTES SUSTRATOS	35
4.1	ANÁLISIS DE ANTENA TIPO PARCHE.....	37
4.1.1	<i>Diseño</i>	38
4.1.2	<i>Simulación</i>	39
4.1.3	<i>Resultados</i>	43
4.2	ANÁLISIS DE ANTENA DIPOLO SOBRE SUSTRATO DE PAPEL	44
4.2.1	<i>Diseño</i>	44
4.2.2	<i>Simulación</i>	46

4.2.3	<i>Resultados</i>	49
4.3	ANÁLISIS DE ANTENA DIPOLO SOBRE SUSTRATO DE ALGODÓN	50
4.3.1	<i>Diseño</i>	51
4.3.2	<i>Simulación</i>	51
4.3.3	<i>Resultados</i>	55
5.	DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA ANTENA RFID SOBRE SUSTRATO DE PAPEL	57
5.1	DISEÑO	57
5.2	SIMULACIÓN	59
5.3	RESULTADOS	62
5.4	CONCLUSIONES.....	63
6.	OPTIMIZACIÓN DE LA ANTENA RFID SOBRE SUSTRATO DE PAPEL	65
6.1	DISEÑO	65
6.2	SIMULACIÓN	67
6.3	RESULTADOS	70
6.4	RANGO DE LECTURA.....	72
6.5	CONCLUSIONES.....	73
7.	CONCLUSIONES.....	75
7.1	LÍNEAS FUTURAS	75
8.	GLOSARIO.....	77
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
10.	ANEXOS.....	85
10.1	PRESUPUESTO.....	85
10.2	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS KATHREIN MIRA-100-CIRCULAR-ETSI	86

Lista de figuras

Figura 1. Planificación temporal del TFG	4
Figura 2. Diagrama de Gantt del TFG	4
Figura 3. Diagrama de Gantt PEC 1.....	5
Figura 4. Diagrama de Gantt PEC 2.....	5
Figura 5. Diagrama de Gantt PEC 3.....	5
Figura 6. Diagrama de Gantt PEC 4.....	6
Figura 7. Pulsera de control de acceso a club deportivo [5].....	12
Figura 8. Tarjeta de proximidad [6].....	13
Figura 9. Etiqueta SMARTRAC DOGBONE MONZA R6 WET INLAY [7]	13
Figura 10. Tag RFID Activo SYTAG245-2F5 a 2,45 GHz [9]	14
Figura 11. Funcionamiento de un sistema RFID [10]	15
Figura 12. Antena Ellipse Televés [17].....	18
Figura 13. Antena con polarización circular [18].....	19
Figura 14. Antena omnidireccional [19]	19
Figura 15. Antena de varilla [20].....	20
Figura 16. Antena dipolo [21]	20
Figura 17. Array de antenas parabólicas en Nuevo México [22]	21
Figura 18. Etiqueta RFID sobre sustrato de papel [25]	22
Figura 19. Parámetros dieléctricos más comunes en sustrato de papel	23
Figura 20. Dimatix Materials Printer DMP-2850 [28]	25
Figura 21. Ejemplo de las polarizaciones lineal, circular y elíptica [32]	29
Figura 22. Polarización elíptica a derechas [29].....	29
Figura 23. Ejemplo diagrama de radiación [33]	31
Figura 24. Espacio esquemático en ADS	35
Figura 25. Espacio de diseño o <i>layout</i> en ADS	36
Figura 26. Aplicación <i>Momentum</i>	37
Figura 27. Sustrato de papel con $\epsilon_r=1.63$ y $\tan \delta=0.046$	38
Figura 28. Diferentes características de los sustratos de papel analizados [35]	38
Figura 29. Diseño de la antena tipo parche.....	39
Figura 30. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena tipo parche	39
Figura 31. Impedancia de entrada en la carta Smith.....	40
Figura 32. Diagrama de radiación de la antena tipo parche.....	41
Figura 33. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena tipo parche	42
Figura 34. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena tipo parche ...	42
Figura 35. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena tipo parche..	43
Figura 36. Parámetros de la antena tipo parche	43
Figura 37. Representación gráfica de los parámetros de la antena tipo parche	44
Figura 38. Sustrato de papel con $\epsilon_r=2.31$ y $\tan \delta=0.15$	45
Figura 39. Diseño de la antena dipolo	45
Figura 40. Geometría de la antena dipolo [23]	46
Figura 41. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena tipo dipolo.....	46
Figura 42 . Impedancia de entrada en la carta Smith.....	47
Figura 43. Diagrama de radiación de la antena dipolo	47

Figura 44. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena tipo dipolo.....	48
Figura 45. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena tipo dipolo ...	48
Figura 46. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena tipo dipolo ...	49
Figura 47. Parámetros de la antena dipolo	49
Figura 48. Representación gráfica de los parámetros de la antena tipo dipolo	50
Figura 49. Diseño de la antena dipolo sobre sustrato de algodón [36].....	51
Figura 50. Sustrato de algodón con $\epsilon_r=1.3$ y $\tan \delta=0.058$	51
Figura 51. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón.	52
Figura 52. Impedancia de entrada en la carta Smith.....	52
Figura 53. Diagrama de radiación de la antena dipolo sobre sustrato de algodón	53
Figura 54. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón	53
Figura 55. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón.....	54
Figura 56. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón.....	54
Figura 57. Parámetros de la antena dipolo sobre sustrato de algodón.....	55
Figura 58. Representación gráfica de los parámetros de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón.....	55
Figura 59. Geometría de la antena propuesta.....	57
Figura 60. Dimensiones de la antena propuesta.....	58
Figura 61. Sustrato de la antena propuesta	58
Figura 62. Diseño antena dipolo propuesta.....	58
Figura 63. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena tipo dipolo.....	59
Figura 64. Impedancia de entrada en la carta Smith.....	59
Figura 65. Diagrama de radiación de la antena propuesta.....	60
Figura 66. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena propuesta	60
Figura 67. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena propuesta.....	61
Figura 68. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena propuesta ...	61
Figura 69. Parámetros de la antena propuesta	62
Figura 70. Representación gráfica de los parámetros de la antena propuesta	63
Figura 71. Geometría de la antena propuesta optimizada	65
Figura 72. Dimensiones de la antena propuesta optimizada.....	65
Figura 73. Diseño antena dipolo propuesta optimizada	66
Figura 74. Configuración del puerto en ADS.....	66
Figura 75. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena propuesta optimizada.....	67
Figura 76. Impedancia de entrada en la carta Smith.....	67
Figura 77. Diagrama de radiación de la antena propuesta optimizada	68
Figura 78. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena propuesta optimizada	68
Figura 79. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena propuesta optimizada.....	69
Figura 80. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena propuesta optimizada.....	69
Figura 81. Parámetros de la antena propuesta optimizada.....	70

Figura 82. Representación gráfica de los parámetros de la antena propuesta optimizada.....	71
Figura 83. Lector RFID Kathrein MIRA-100-circular-ETSI [38].....	72

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

En la actualidad vivimos una revolución tecnológica en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas lo cual abre las puertas a la forma en la que interactuamos con los dispositivos que nos rodean.

En España (por ejemplo) esta revolución se acelerará en 2020 debido a la liberación de la banda de 700 MHz [1] para la implantación del 5G. En consecuencia, nuevos millones de dispositivos estarán interconectados.

RFID es una de las múltiples tecnologías que ocupan el espacio radioeléctrico. RFID utiliza campos electromagnéticos para identificar y rastrear etiquetas las cuales contienen información. Estas etiquetas recogen la energía de las ondas electromagnéticas para poder transmitir la información que contienen.

El presente Trabajo de Fin de Grado pretende hacer un estudio y simulación de antenas RFID actuales para así, aportar un nuevo diseño de antena. Además, esta antena está situada sobre un sustrato de papel consiguiendo así, una reducción de costes de fabricación manteniendo unas prestaciones óptimas.

1.2 Objetivos del Trabajo

Los objetivos específicos del presente Trabajo de Fin de Grado son:

1. Estudiar el estado del arte en técnicas RFID y antenas en sustratos flexibles, así como sus propiedades y aplicaciones.
2. Determinar unas reglas de diseño y directrices para el diseño a nivel de layout de las antenas RFID en papel implementadas con *inkjet printing*.
3. Reproducir resultados conocidos de antenas, para familiarizarse con las herramientas de simulación.
4. Diseñar una antena RFID en papel mediante el software Momentum disponible en ADS.
5. Optimizar la antena mediante rediseño paramétrico (tuning) y simular a nivel eléctrico y electromagnético el comportamiento y prestaciones de la antena RFID propuesta.

1.3 Enfoque y método seguido

Este trabajo está enfocado en el desarrollo de un producto nuevo de RFID que sea barato y respetuoso con el medio ambiente, pero sin perder prestaciones. Para lograr este objetivo, se ha escogido el papel como sustrato. Además, el papel es un material ampliamente disponible y analizado en múltiples estudios demostrando su viabilidad como sustrato.

El presente Trabajo de Fin de Grado está basado en el diseño, simulación y análisis de antenas mediante el software ADS (propiedad de Keysight Technologies) proporcionado por la universidad. En los estudios analizados en este trabajo se han usado distintos programas de simulación electromagnética por lo que cualquier pequeña diferencia en los resultados, puede ser debida a los distintos programas utilizados.

En cuanto a la metodología a seguir consiste en varias fases en las cuales se irá incrementando el valor del producto final. En una primera fase se realiza un profundo estudio del estado actual de la tecnología RFID, después se analiza los parámetros de las antenas, posteriormente se analizan varias antenas ya existentes. Por último, se realiza un diseño y posterior optimización de una antena de diseño propio. De esta forma, todos los pasos anteriores aportan valor al último paso, el diseño final.

1.4 Planificación del Trabajo

En este apartado se exponen los recursos necesarios para la elaboración de este Trabajo Fin de Grado. Estos recursos son divididos en recursos humanos y recursos materiales:

- Recursos humanos: el TFG está compuesto por dos áreas, una técnica encargada del estudio, diseño y ejecución de la parte tecnológica y, una administrativa encargada de elaboración de la memoria del proyecto. Ambas áreas serán desarrolladas por el autor de este trabajo, Ángel Anta Félix.
- Recursos materiales: en cuanto a equipamiento será necesario un ordenador portátil con Webcam. Los programas necesarios para llevar a cabo el trabajo son ADS Keysight, Microsoft Word, Microsoft PowerPoint, Windows Movie Maker, y la plataforma online Gantt PRO. La documentación necesaria será: apuntes de la asignatura Antenas – UOC, Circuitos de microondas - UOC, además de diferentes fuentes de Internet como artículos científicos o libros técnicos.

1.4.1 Tareas que realizar

Los elementos más importantes de este trabajo son:

- El producto final resultado de los objetivos previstos: en este caso no es un producto físico dado que se trata de un trabajo de análisis, diseño y simulación. Consiste en una guía de diseño, un layout con unas dimensiones determinadas, resultado de simulación y prestaciones.
- La memoria del Trabajo Final de Grado: esta memoria contiene todo el trabajo de investigación, diseño y simulación de la antena RFID sobre sustrato de papel.
- La presentación: actividad en formato de video o diapositivas para explicar el trabajo realizado.

1.4.2 Planificación temporal

La planificación temporal es la que muestra la figura 1:

Nombre de la actividad	Duración en días	Dedicación en horas	Inicio	Fin
PEC 1	19	48	19/09/2019	07/10/2019
Análisis de requisitos	4	8	19/09/2019	22/09/2019
Instalación de los programas	2	4	23/09/2019	24/09/2019
Planificación del TFG	5	12	25/09/2019	29/09/2019
Búsqueda de información del estado del arte	8	24	30/09/2019	07/10/2019
Entrega				07/10/2019
PEC 2	28	60	08/10/2019	04/11/2019
Análisis de requisitos	6	12	08/10/2019	13/10/2019
Estudio de materiales asociados	15		08/10/2019	22/10/2019
Prediseño de la antena	9	18	14/10/2019	22/10/2019
Simulación EM	9	18	23/10/2019	31/10/2019
Verificación de las especificaciones	2	4	01/11/2019	02/11/2019
Tiempos de incidencias	28	4	08/10/2019	04/11/2019
Preparación entrega	2	4	03/11/2019	04/11/2019
Entrega				04/11/2019
PEC 3	35	74	05/11/2019	09/12/2019
Análisis de requisitos	6	12	05/11/2019	10/11/2019
Estudio de materiales asociados	20		05/11/2019	24/11/2019
Diseño de la antena	14	28	11/11/2019	24/11/2019
Simulación EM	11	22	25/11/2019	05/12/2019

Verificación de las especificaciones	2	4	06/12/2019	07/12/2019
Tiempos de incidencias	35	4	05/11/2019	09/12/2019
Preparación entrega	2	4	08/12/2019	09/12/2019
Entrega				09/12/2019
PEC 4	35	74	10/12/2019	13/01/2020
Análisis de requisitos	6	12	10/12/2019	15/12/2019
Estudio de materiales asociados	20		10/12/2019	29/12/2019
Optimización de la antena	14	28	16/12/2019	29/12/2019
Simulación EM	11	22	30/12/2019	09/01/2020
Verificación de las especificaciones	2	4	10/01/2020	11/01/2020
Tiempos de incidencias	33	4	10/12/2019	11/01/2020
Preparación entrega	2	4	12/01/2020	13/01/2020
Entrega				13/01/2020
Memoria	117	30	19/09/2019	11/01/2020
Redacción y corrección	117	30	19/09/2019	11/01/2020
Presentación	14	14	01/01/2020	13/01/2020
Elaboración	14	14	01/01/2020	13/01/2020

Figura 1. Planificación temporal del TFG

Para verlo de forma visual se incluye un diagrama de Gantt donde se podrán identificar las fases. Debido a la complejidad de éste por la gran cantidad de fases que tiene, se ha dividido en cinco imágenes (figuras 2, 3, 4, 5 y 6), una para mostrar de forma global los hitos más importantes, y otras cuatro donde se ven con más detalle las cuatro entregas del TFG:

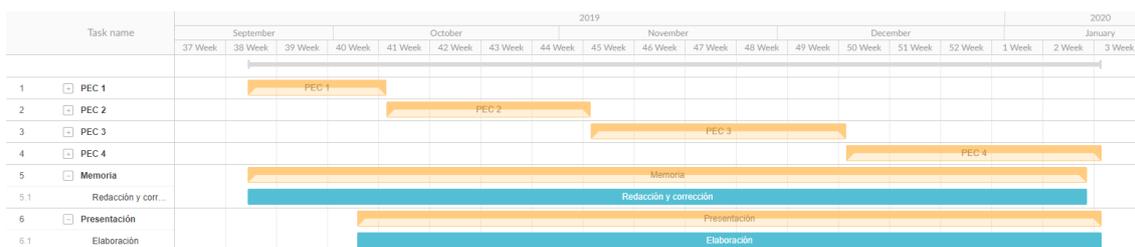


Figura 2. Diagrama de Gantt del TFG

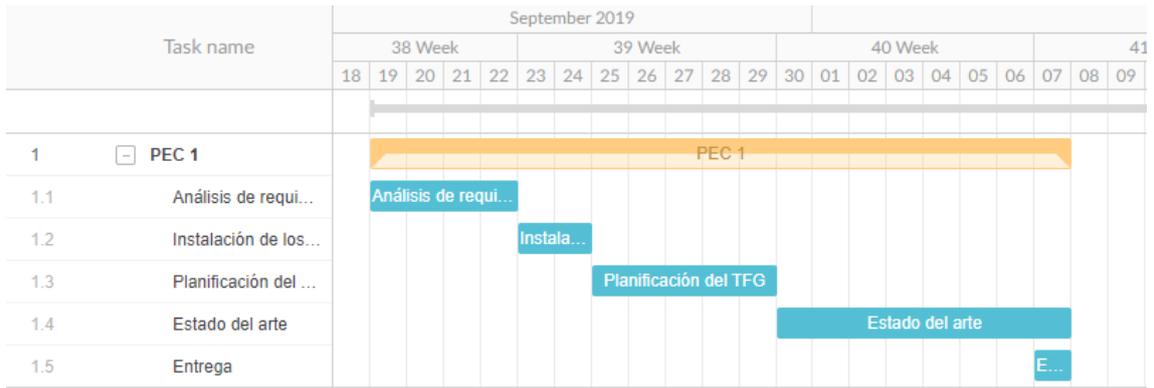


Figura 3. Diagrama de Gantt PEC 1

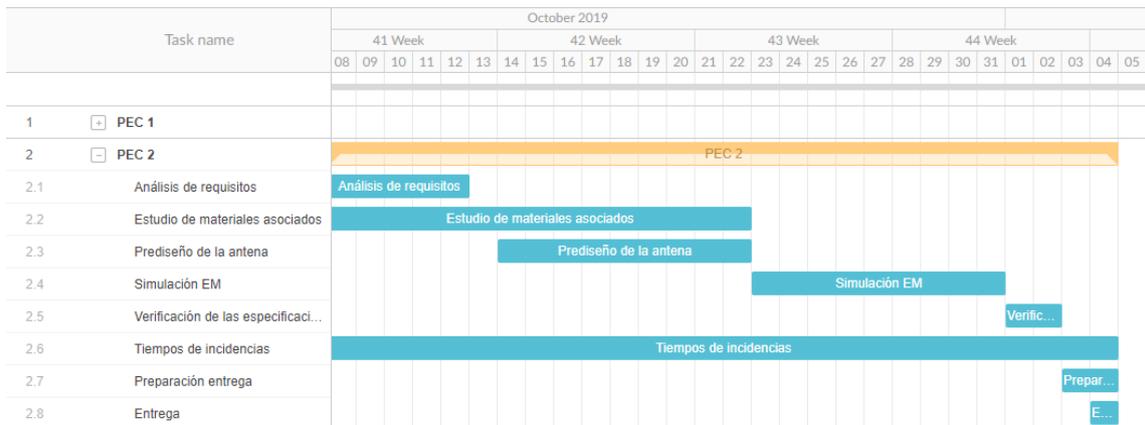


Figura 4. Diagrama de Gantt PEC 2

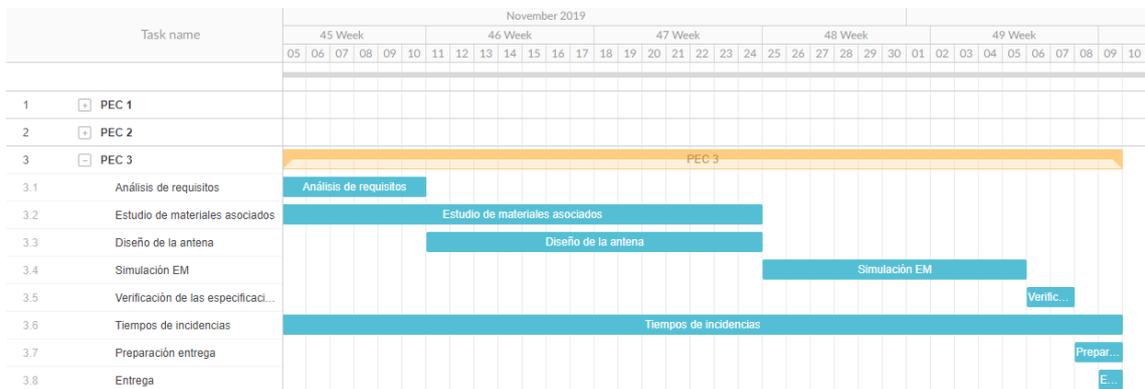


Figura 5. Diagrama de Gantt PEC 3

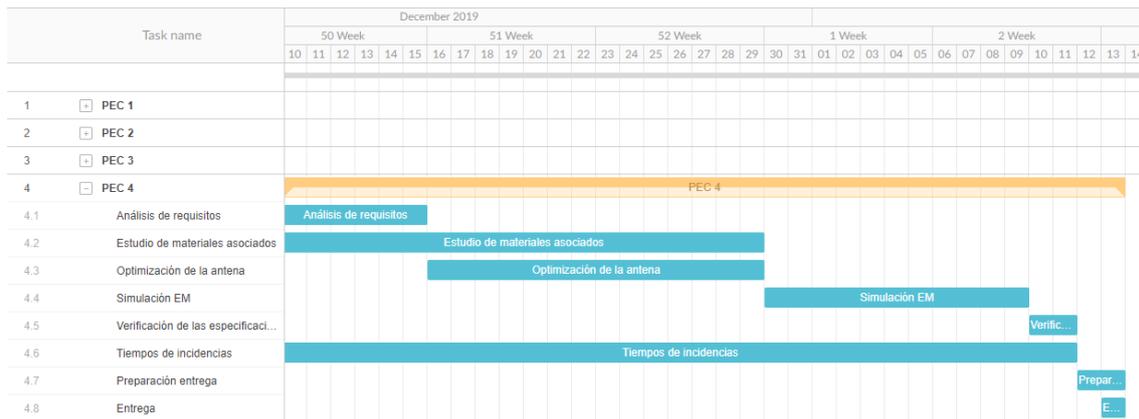


Figura 6. Diagrama de Gantt PEC 4

1.5 Breve resumen de productos obtenidos

El presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el diseño de una antena sobre sustrato de papel para aplicaciones RFID. Los diferentes apartados muestran el análisis de diferentes antenas ya existentes y el comportamiento de una antena de diseño propio optimizada para un chip comercial en concreto.

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

Los capítulos del presente Trabajo de Fin de Grado son:

- Capítulo 2: Estado del arte de la tecnología RFID, antenas RFID y sustratos de papel

En este capítulo se realiza un análisis detallado del estado actual de la tecnología RFID y el papel como sustrato de circuitos de microondas.

- Capítulo 3: Parámetros principales en el diseño de una antena RFID sobre sustrato de papel

En este capítulo se realiza una amplia explicación de todos los parámetros referidos a las antenas y a los sustratos de papel.

- Capítulo 4: Análisis de antenas RFID sobre diferentes sustratos

En este capítulo se analizan distintas antenas RFID sobre diferentes sustratos. En primer lugar, una antena tipo parche sobre sustrato de papel. En segundo lugar, una antena tipo dipolo sobre sustrato de papel. Por último, una antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón.

- Capítulo 5: Diseño y simulación de la antena RFID sobre sustrato de papel

En este capítulo se muestra el estudio del diseño propio de la antena RFID. También se muestran los resultados de su simulación electromagnética.

- Capítulo 6: Optimización de la antena RFID sobre sustrato de papel

En este capítulo se realiza una optimización de la antena obtenida en el capítulo 5 para un chip comercial en particular.

2. Estado del arte de la tecnología RFID, antenas RFID y sustratos de papel

2.1 Identificación por radiofrecuencia – RFID

En este apartado se realiza una amplia introducción de la tecnología RFID hasta sus beneficios e inconvenientes para, una vez situado el contexto, entrar en profundidad de forma particular en las antenas RFID.

2.1.1 Concepto

La revista RFID Journal define la identificación por radiofrecuencia como cualquier método de identificación única de artículos usando ondas de radio [2]. Su funcionamiento de forma simple trata de un lector que se comunica con un transpondedor el cual contiene la información necesaria en un microchip. Hoy en día, esta tecnología es conocida gracias a las etiquetas RFID. Estas etiquetas están compuestas de una antena conectada a un microchip el cual contiene información como por ejemplo un identificador o un número de cuenta de un cliente. Estas etiquetas, como se muestra más adelante, pueden clasificarse en activas, pasivas o semipasivas.

2.1.2 Historia

La tecnología RFID, al igual que muchas otras, comenzó con fines militares durante la Segunda Guerra Mundial. Todo comenzó a raíz de que el radar podía advertir del acercamiento de una aeronave, pero no podía diferenciar si era enemiga o aliada.

El físico escocés Sir Robert Alexander Watson-Watt desarrolló el primer sistema para identificar amigos o enemigos (IFF) [3]. Este sistema funcionaba mediante un transmisor que instalaron en los aviones británicos y los cuales emitían una señal de identificación cuando recibían señales del radar. El funcionamiento básico de la tecnología RFID era este.

De forma simplificada el proceso consistía en: el transmisor manda una señal la cual, o bien es reflejada de vuelta por un transpondedor en el sistema RFID pasivo o bien, en un sistema activo RFID el transpondedor responde emitiendo una señal.

En 1948, Harry Stockman publicó un documento llamado “Communications by Means of Reflected Power” [4] en cual es considerado como el nacimiento de la tecnología RFID. A partir de este punto comenzó el verdadero desarrollo de la tecnología RFID.

En la década de los años 50 se iniciaron muchos estudios para crear sistemas seguros para sistemas antirrobo y controles de acceso a minas de carbón, exploraciones petrolíferas e instalaciones nucleares.

A finales de los años 60 llegaron las primeras actividades comerciales de las manos de Sensormatic y Checkpoint desarrollando un equipo de vigilancia anti-intrusión electrónica llamada Electronic Article Surveillance (EAS).

Posteriormente se produjo una explosión de esta tecnología en el año 1973 cuando, entonces, se crearon las primeras patentes de RFID. Primero Mario W. Cardullo con una patente para su etiqueta RFID con memoria regrabable. Mas tarde, en ese mismo año, Charles Walton con su patente de transpondedor pasivo.

En el resto de la década de los 70 y 80 se desarrollaron múltiples soluciones. Por ejemplo, se desarrolló un sistema para rastrear personas dentro de edificios. Otro ejemplo trata de un sistema de seguimiento de camiones cargados con materiales nucleares. Posteriormente este sistema se convertiría en el sistema de control de paso en peajes.

Finalmente, en los años 90, IBM patentó el sistema RFID Ultra High Frequency (UHF). Este sistema será la base del diseño de este Trabajo Fin de Grado.

2.1.3 Arquitectura y componentes

Todo sistema RFID consta principalmente de cuatro componentes:

- Etiqueta RFID: también conocida por tag o transpondedor. Está compuesta por un microchip que almacena los datos y una antena que permite la comunicación por radiofrecuencia con el lector. Puede ser activas, pasivas o semipasivas:
 - Activas: necesitan alimentación a través de una batería.
 - Pasivas: funcionan sin batería alimentándose únicamente de la energía que les llega del lector.
 - Semipasivas: similares a las activas, pero incluyen una batería para alimentar el microchip y no para transmitir señal.

Esta etiqueta porta información sobre el objeto donde este colocada entendiéndose por objeto prácticamente cualquier sitio como un animal o persona, un coche, una llave, etc.

- Lector: es el encargado de transmitir la energía necesaria a la etiqueta para que esta pueda enviarle los datos que contenga. Está compuesta por un módulo de radiofrecuencia con su transmisor y su receptor, una unidad de control y una antena. Algunos también llevan un programador para escribir información en las etiquetas. Los datos leídos son enviados a un controlador, ordenador o una base de datos.
- Controlador: recibe la información del lector o los lectores y la comunica al sistema de información, es decir, desarrolla la aplicación RFID. También puede enviar ordenes al lector.
- Middleware: necesario para recoger, filtrar y manejar los datos.

Una vez expuesta la arquitectura de cualquier sistema RFID se puede ver en qué consisten los componentes que integran estos sistemas. Fundamentalmente son cinco:

- Transpondedor: contiene toda la información referida al objeto en el que está situada la etiqueta y es el encargado de transmitirla cuando el lector la solicita. Está formado por un microchip y una antena. El primero incluye una memoria para almacenar los datos, una circuitería digital para la lógica de control, de seguridad y del microprocesador y una circuitería analógica para proporcionar alimentación y realizar la transferencia de datos. El segundo se encarga de transmitir los datos almacenados en el microchip la cual puede ser de dos tipos, o un elemento inductivo o un dipolo. Este es un punto importante para decidir cuál de los dos tipos utilizar. Si se escoge el elemento inductivo hay que tener en cuenta que este acoplamiento tiene una cobertura baja (para aplicaciones en el campo cercano), la orientación es importante, suele usarse para bajas frecuencias, utiliza etiquetas pasivas y es muy sensible a interferencias electromagnéticas. En cambio, si se requiere una cobertura mayor, una orientación indiferente de la antena y trabajar a frecuencias más altas es más conveniente un dipolo, aunque como inconvenientes tiene que se precisa de etiquetas activas que dependen de un organismo regulador de frecuencias.
- Lector: está compuesto por los elementos citados anteriormente los cuales son detallados a continuación:
Las funciones del módulo de radiofrecuencia son: proporcionar energía al transpondedor para generar la señal de radiofrecuencia, modular la señal para enviar los datos y recibir y demodular la señal de vuelta del transpondedor.
La unidad de control se encarga de codificar y decodificar los datos, verificar la integridad de los datos, gestionar el acceso al medio y comunicarse con el sistema de información.

La antena se encarga de habilitar la comunicación entre el transpondedor y el lector. Las características más importantes de las antenas son: la frecuencia de operación, la impedancia, la ganancia, la máxima potencia permitida y finalmente, la polarización (lineal o circular).

- Programador: es el encargado de escribir la información en las etiquetas. Esta información puede ser escrita una sola vez o varias veces dependiendo si la etiqueta está diseñada para ser reescrita.
- Middleware: es el software que se encarga de la conexión entre el hardware RFID y los sistemas de información. Sus funciones son: adquirir los datos, encaminarlos, gestionar los procesos y gestionar los dispositivos.
- Sistema de información: es el encargado de gestionar y tratar los datos recibidos por el lector. Tiene que ser capaz de soportar múltiples lecturas, coordinar tiempos y flujos de información, introducir actualizaciones del sistema y permitir la integración con otros sistemas de información.

2.1.4 Frecuencias utilizadas

Podemos clasificarlas en cuatro grupos bien diferenciados:

- Baja Frecuencia (LF): comprende el rango de frecuencias que va desde 120 kHz hasta 150 kHz. En estas frecuencias se alcanza un rango de lectura de 10 cm y carecen de regulación. Suelen usarse para la identificación de animales o para la recopilación de datos de fábrica. Su uso más extendido es el control de accesos como, por ejemplo, a clubes deportivos mediante una pulsera de silicona como muestra la Figura 7.



Figura 7. Pulsera de control de acceso a club deportivo [5]

- Alta Frecuencia (HF): corresponde a la frecuencia 13,56 MHz dentro de regulación de la banda ISM. Esta, tiene un alcance de entre 10 cm y 1 metro. Se usan en tarjetas inteligentes como la de la Figura 8.



Figura 8. Tarjeta de proximidad [6]

- Ultra Alta Frecuencia (UHF): en este apartado se realiza una división en dos, por un lado, está la frecuencia de 433 MHz y por otro lado están 865-868 MHz para Europa y 902-928 MHz para América del Norte. En cuanto a la primera, se encuentra dentro de la regulación de dispositivos de corto alcance y tiene un rango de funcionamiento de entre 1 y 100 metros. En cuanto al segundo grupo, ambas están reguladas por la banda ISM y tienen un rango de funcionamiento de entre 1 y 12 metros. La antena de la figura 9 puede ser usada en cualquiera de los dos rangos de frecuencias anteriores. En este grupo se encuentran las aplicaciones en defensa entre otras.



Figura 9. Etiqueta SMARTRAC DOGBONE MONZA R6 WET INLAY [7]

- Frecuencia de Microondas o Super Alta Frecuencia (SHF): en este grupo de nuevo se hace una doble clasificación: el primero, y con más desarrollos en la actualidad, es el que comprende el rango de frecuencias 2,45-5,8 GHz. Este rango, también regulado por la banda ISM, tiene un alcance de 1 a 2 metros y está dentro de los estándares de Bluetooth y 802.11 WLAN. Normalmente estas antenas son activas como muestra la figura 10. En el segundo grupo estarían frecuencias superiores a las anteriores y que son objeto de desarrollos actuales como por ejemplo el estudio “An Enhanced Chipless RFID System in 60 GHz Using Pattern Recognition Techniques” [8].



Figura 10. Tag RFID Activo SYTAG245-2F5 a 2,45 GHz [9]

2.1.5 Funcionamiento

Existen gran cantidad de sistemas RFID aplicados en multitud de campos diferentes pero todos ellos se basan en el mismo principio de funcionamiento tal y como muestra la figura 11:

- En primer lugar, se equipan todos los elementos que queremos identificar con etiquetas RFID.
- El lector emite un campo de radiofrecuencia a través de la antena el cual activa las etiquetas.
- Si la etiqueta está dentro de este campo, la etiqueta utiliza la energía para transmitir los datos que contiene su memoria.
- Finalmente, el lector recibe los datos y los envía al controlador u ordenador para que los procese.

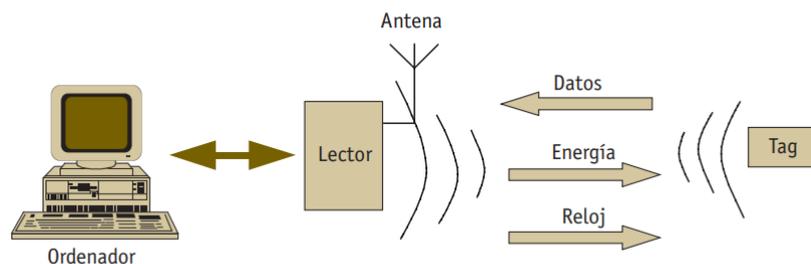


Figura 11. Funcionamiento de un sistema RFID [10]

2.1.6 Estandarización y regulación

Varias organizaciones han establecido estándares para la tecnología RFID entre los cuales están la Organización Internacional de Normalización (ISO) [11], la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) [12], la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM International) [13] o EPCglobal [14] entre otros.

En principio, cada país puede decir sus propias normas para la asignación de frecuencias teniendo en cuenta algunas limitaciones como las frecuencias conocidas como ISM bands (bandas para la Industria Científica y Médica).

En Norte América, UHF puede usarse sin licencia en las frecuencias 902-928 MHz, pero con restricciones en la potencia transmitida. En Europa en cambio, las frecuencias para RFID 865-868 MHz están reguladas por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones [15], concretamente por las normativas EN 300 220 y EN 302 208.

En definitiva, los estándares realizados para la tecnología RFID son [16]:

- ISO 11784/11785: identificación de animales en la frecuencia de 134,2 kHz.
- ISO 14223: identificación por radiofrecuencia de animales con transpondedores avanzados.
- ISO/IEC 14443: estándar popular en 13,56 MHz (HF). El estándar de la tecnología NFC también está basado en ISO/IEC 14443.
- ISO/IEC 15693: estándar utilizado por tarjetas sin contacto en la frecuencia de 13,56 MHz.
- ISO/IEC 18000: identificación por radiofrecuencia para la gestión de productos.
- ISO/IEC 18092: telecomunicaciones e intercambio de información entre sistemas NFCIP-1.

- ISO 18185: para rastrear contenedores de carga en las frecuencias de 433 MHz y 2,4 GHz.
- ISO/IEC 21481: telecomunicaciones e intercambio de información entre sistemas NFCIP-2.
- ASTM D7434: estándar para determinar el rendimiento de los transpondedores pasivos RFID en palets o cargas unificadas.
- ASTM D7435: estándar para determinar el rendimiento de los transpondedores pasivos RFID en contenedores de carga.
- ISO 28560-2: especifica los estándares de codificación y el modelo de datos que se utilizaran en las bibliotecas.

2.1.7 Aplicaciones

El uso de la tecnología RFID abarca un gran número de sectores. Este apartado aporta un breve resumen de los sectores donde se usa esta tecnología para proporcionar una visión global de su potencial.

El principal potencial o característica de la tecnología RFID es su capacidad de identificar, localizar, seguir o monitorizar personas, animales u objetos sin necesidad de que exista una línea de visión directa (en la mayoría de las frecuencias mostradas anteriormente). Lógicamente, partiendo de esta característica han surgido muchas de las aplicaciones usadas hoy en día. El objetivo de este apartado no es mostrar todas las aplicaciones existentes que hay sino proporcionar una visión global con algunos ejemplos. Las más relevantes son:

- Transporte y distribución:
 - Seguimiento de productos o activos como contenedores de carga.
 - Seguimiento de aeronaves o vehículos.
 - Localización en tiempo real.
- Empaquetado de artículos:
 - Gestión de la cadena de suministros.
 - Inventario y stocks.
- Seguridad y control de accesos:
 - Seguimiento de niños, animales o equipajes.
 - Gestión de pasaportes y visados.
 - Peajes.
 - Acceso a recintos privados.

- Monitorización:
 - Presión, temperatura, peso y volumen.
- Gestión de bibliotecas:
 - Acceso y gestión de libros.

2.1.8 Beneficios e inconvenientes

Aunque algunos de los beneficios ya se han mencionado anteriormente, aquí se vuelven a mencionar. A continuación, se muestran los más relevantes:

- Capacidad de lectura múltiple de etiquetas simultáneamente.
- Sin necesidad de visión directa para la lectura.
- Cada etiqueta es única.
- Dependiendo de la frecuencia usada, puede leer datos a gran distancia.
- Alta velocidad en la lectura de datos.
- Larga vida útil.
- Gran capacidad de memoria.
- Convivencia con otras tecnologías, así como su integración con ellas.
- Funcionamiento independiente de polvo o suciedad.
- Difíciles de falsificar.

En cuanto a los inconvenientes los más importantes son:

- Problemas en comunicación si nos encontramos con agua o metal.
- Algunos sistemas son incompatibles en determinados países debido a la carencia de estándar internacional.
- Poca privacidad ya que cualquier etiqueta puede ser leída sin que el propietario se dé cuenta.
- Elevado tamaño de la antena respecto del microchip que contiene.

A pesar de estos inconvenientes, el sistema RFID es un sistema ampliamente utilizado por sus bajos costes económicos y su fiabilidad.

2.1.9 Antenas RFID

Dado que el presente Trabajo Fin de Grado trata sobre el diseño de una antena RFID, es necesario un apartado único donde se expliquen las diferentes antenas que existen en la actualidad una vez explicada de forma detallada la tecnología RFID.

Las antenas de las etiquetas son las encargadas recoger la energía procedente del lector (en antenas pasivas, en activas la antena se alimenta de una fuente de alimentación, normalmente una batería) y enviar de vuelta los datos contenidos en el microchip. En definitiva, es el elemento encargado de la comunicación entre el lector y el chip que contiene la información.

Estas antenas pueden ser de diferentes tamaños y formas, todo dependerá de la aplicación donde se vaya a implantar. En función de las antenas más comunes [10], la clasificación es la siguiente:

- Antenas polarizadas linealmente.



Figura 12. Antena Ellipse Televés [17]

- Antenas polarizadas circularmente.



Figura 13. Antena con polarización circular [18]

- Antenas omnidireccionales.



Figura 14. Antena omnidireccional [19]

- Antenas de varilla.



Figura 15. Antena de varilla [20]

- Dipolos.



Figura 16. Antena dipolo [21]

- Arrays de antenas.



Figura 17. Array de antenas parabólicas en Nuevo México [22]

En la actualidad las más utilizadas en RFID son dipolos o elementos inductivos. En el primer caso, estas antenas se usan en HF y UHF mientras en LF se usa siempre una antena bobinada para el acoplamiento por campo magnético.

Los parámetros más importantes de una antena son: frecuencia de operación, polarización, eficiencia de antena, tipo de acoplamiento, impedancia, ganancia y máxima potencia transmitida. Es importante conocer bien estos parámetros (los cuales serán explicados en el capítulo 3) ya que en función de la aplicación del sistema RFID necesitaremos, por ejemplo, una frecuencia determinada o que la polarización de la antena sea circular o lineal, entre otras características.

2.2 Papel como sustrato flexible

En la actualidad, la demanda de productos RFID de bajos costes, flexibles, seguros y resistentes está creciendo rápidamente. La implementación de circuitos de microondas en sustratos flexibles de bajo coste, como el papel, es objeto de numerosos estudios en los últimos años. Este sustrato flexible resulta muy interesante dado que es eco-compatible, liviano, de gran flexibilidad, altamente disponible para producir en masa, de fácil acceso y con un coste muy reducidos. En los últimos años se han implementado algunas soluciones como antenas [23][24]. Este trabajo precisamente trata del diseño de una antena RFID sobre papel como sustrato flexible tal y como muestra la figura 18.



Figura 18. Etiqueta RFID sobre sustrato de papel [25]

Las propiedades, algunas mencionadas anteriormente, más importantes del papel como sustrato flexible son:

- Durabilidad: este tipo de sustrato es capaz de cumplir sus funciones durante un largo periodo de tiempo.
- Estabilidad dimensional: el tamaño de la etiqueta no cambia, aunque cambie su entorno. Es decir, mantiene sus dimensiones independientemente de la humedad (por ejemplo) que haya en el ambiente.
- Resiliente: capaz de volver a su forma inicial después de haber sido curvado.
- Económico: costes reducidos que permiten una alta producción.
- Ecológico: respetuoso con el medio ambiente.
- Flexible: se doble con facilidad y puede acomodarse a cualquier superficie. Ésta junto con la resiliencia son dos propiedades que hacen a estos sustratos tan atractivos.
- Disponible: se puede disponer de él rápidamente.

- Variedad de tipos: existen diferentes empresas que comercializan este sustrato con ligeras variaciones.
- Ligero: peso despreciable para cualquier uso.
- Permite la impresión directa: esta propiedad es muy importante dado que sobre este sustrato podemos aplicar la tecnología por inyección de tinta *inkjet printing*.
- Permite la aplicación de aditivos químicos: se pueden aplicar ciertos químicos para hacer a este sustrato hidrofóbico o ignífugo.

Por todo lo expuesto anteriormente, hace del papel uno de los sustratos más interesantes para el desarrollo de etiquetas RFID. Ahora bien, el papel tiene unas características determinadas como son la constante dieléctrica (ϵ_r) y la tangente de pérdidas ($\tan \delta$) la cual es calculada a partir del factor de calidad (Q) y de las pérdidas del conductor (α). Estas dos características determinan si el papel es un sustrato adecuado para poder diseñar e imprimir la antena sobre él. Los valores más comunes aparecen esquematizados en la figura 19.

Constante dieléctrica (ϵ_r)	Tangente de pérdidas ($\tan \delta$)
1,63	0,046
2,31	0,05
3,28	0,061
5,2	0,11

Figura 19. Parámetros dieléctricos más comunes en sustrato de papel

2.3 Tecnología por inyección de tinta

La tecnología por inyección de tinta es muy conocida por todo el mundo dado que es la tecnología que usan la mayoría de las personas en ambientes personales y comerciales. En el campo de la ingeniería eléctrica se ha demostrado que pueden formarse líneas conductoras con tintas a base de nanopartículas conductoras. Ésta, fue introducida por primera vez en la década de los años 70 [26]. En la actualidad, la tecnología por inyección de tinta es un método muy popular en el área de microondas. Ésta, junto con el uso de papel como sustrato, tiene muchas ventajas como bajo coste de producción y flexibilidad de los componentes explicados en el apartado anterior.

Actualmente existen dos técnicas de impresión utilizadas por estas impresoras:

1. Inyección de tinta continua

Su funcionamiento consiste en una bomba de alta presión que dirige la tinta líquida desde un depósito a través de un cuerpo de pistola hasta una boquilla microscópica. De esta forma se consigue un flujo continuo de tinta.

2. Inyección bajo demanda

Esta a su vez se divide en dos:

- Inyección bajo demanda térmica

En este proceso, los cartuchos de tinta tienen varias cámaras pequeñas con un calentador en cada una de ellas. Para expulsar tinta, una pequeña corriente eléctrica pasa a través del elemento calentador el cual provoca una evaporación de la tinta provocando un aumento de la presión dentro de la cámara. De esta forma se impulsa una gota de tinta sobre el papel. Para proporcionar un chorro de tinta continua, la corriente que pasa a través del elemento calentador es continua.

- Inyección bajo demanda controlada mediante material piezoeléctrico

Este método de funcionamiento consiste en el uso de un material piezoeléctrico detrás de cada boquilla en lugar de un elemento calentador. Este material cambia de forma cuando se le aplica un voltaje creando así, una presión en la cámara forzando la salida de tinta a través de la boquilla. Esta solución resulta interesante ya que no necesita un componente volátil en la tinta para poder crear presión en la cámara y expulsar tinta. Como desventaja cabe mencionar que las boquillas de estas impresoras son más caras de fabricar.

Finalmente, las impresoras actuales usadas para la impresión de tinta conductiva utilizan la técnica de inyección de tinta bajo demanda controlada mediante material piezoeléctrico. Un ejemplo de estas sería la Dimatrix Materials Printer DMP-2800 [27]. Una versión más moderna de esta impresora sería la Dimatrix Materials Printer DMP-2850 [28] como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Dimatix Materials Printer DMP-2850 [28]

3. Parámetros principales en el diseño de una antena RFID sobre sustrato de papel

3.1 Parámetros generales

3.1.1 Frecuencia de operación

Estas frecuencias se clasifican en 4 grupos diferenciados en Baja Frecuencia (LF), Alta Frecuencia (HF), Ultra Alta Frecuencia (UHF) y Microondas o Super Alta Frecuencia (SHF). Dado que estos grupos han sido explicados en el anterior punto 2.1.4 aquí simplemente se mencionan sin entrar en detalle. La frecuencia de operación de la antena es un punto importante dado que para cada grupo existe una antena adecuada.

3.1.2 Máxima potencia permitida

La potencia máxima permitida depende de la región donde sea implantado el sistema RFID. En la región de Europa el organismo regular que se encarga de este estándar es el CEPT [30] el cual se basa en los estándares ETSI [15]. En este caso y para la región europea la potencia máxima permitida es de 2W ERP o 33 dBm ERP.

En el caso de Estados Unidos el organismo regulador es la FCC [31] el cual establece 4W ERP o 33,75 dBm de potencia máxima permitida.

El diseño final presentado en este documento se ha realizado para cumplir con la normativa europea.

3.2 Parámetros de antena

3.2.1 Ancho de banda

La definición más conocida trata del rango de frecuencias dentro de la cual el funcionamiento de la antena con respecto a una característica se ajusta o cumple con unas condiciones determinadas. Es decir, es el rango de frecuencias sobre las cuales la antena opera de forma satisfactoria. También, existen otras definiciones de ancho de banda [29]. A continuación, se detallan las más comunes:

3.2.1.1 Ancho de banda de impedancia

Es el rango de frecuencias que presentan un coeficiente de reflexión inferior a un valor determinado o, una relación de onda estacionaria (ROE) igual o inferior a un valor determinado S (ecuación 1).

$$BW(ROE \leq S, \%) = \frac{f_2 - f_1}{\frac{f_2 + f_1}{2}} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde f_1 y f_2 definen las frecuencias en las que la impedancia de antena presenta una $ROE \leq S$.

3.2.1.2 Ancho de banda de relación axial

Este parámetro normalmente es utilizado en las antenas con polarización circular. Una polarización circular pura tendría una relación axial $RA_{dB} = 0$. Cualquier valor por debajo de 3 dB se considera aceptable. Este parámetro depende de la frecuencia y se define igual que la ecuación 1.

3.2.1.3 Ancho de banda de ganancia

Es el margen de frecuencias en las cuales la ganancia no decae más de 3 dB con respecto de su valor máximo.

3.2.2 Polarización

Las antenas crean campos electromagnéticos los cuales son magnitudes vectoriales, esto quiere decir que, además de conocer su magnitud necesitamos conocer su dirección. En función de esta podemos clasificar el tipo de polarización en 3 grupos (figura 21):

- Lineal: puede tomar varias direcciones como son horizontal o vertical.
- Circular: puede tomar la dirección a derechas o a izquierdas.
- Elíptica: del mismo modo que la circular, puede tomar la dirección a derechas (figura 22) o a izquierdas.

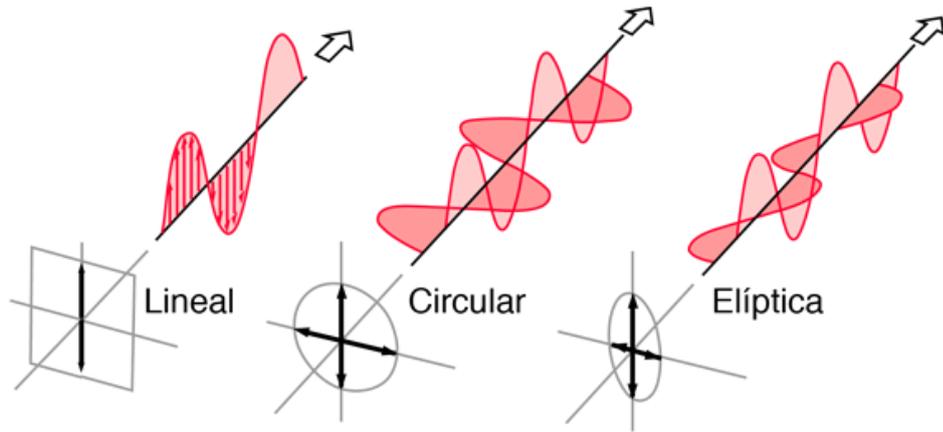


Figura 21. Ejemplo de las polarizaciones lineal, circular y elíptica [32]

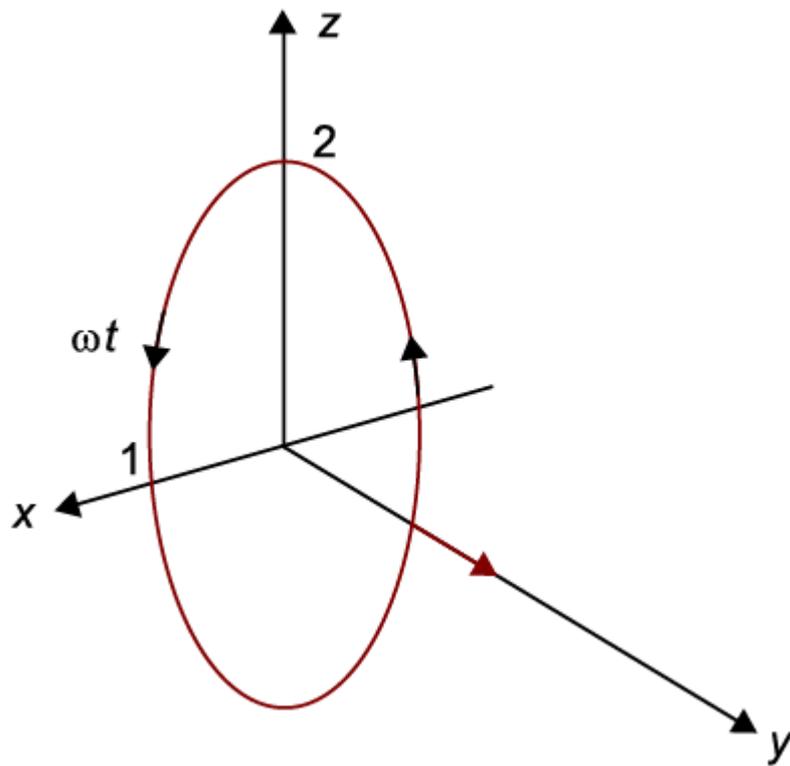


Figura 22. Polarización elíptica a derechas [29]

3.2.3 Eficiencia de radiación y eficiencia de antena

La eficiencia de radiación es la relación entre la resistencia de radiación y la suma de la resistencia de radiación más las pérdidas óhmicas (ecuación 2).

$$\eta_r = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{\Omega}} \quad (2)$$

donde R_{rad} es la resistencia de radiación y R_{Ω} las pérdidas óhmicas.

La eficiencia de antena es la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena. También es definida como la relación entre ganancia y directividad. Este parámetro incluye las pérdidas por desadaptación de impedancias, así como todos los elementos que disipan potencia en forma de calor (ecuación 3).

$$\eta_a = \eta_r \cdot (1 - |S_{11}|^2) \quad (3)$$

donde η_r es la eficiencia de radiación y $(1 - |S_{11}|^2)$ las pérdidas por desadaptación.

3.2.4 Diagrama de radiación

Representación gráfica de la potencia radiada en función de la dirección expresada con coordenadas en azimut y elevación (figura 23). Los parámetros más importantes de estos diagramas son:

- Dirección de apuntamiento
- Lóbulo principal
- Lóbulos secundarios
- Relación de lóbulo principal a secundario (SLL)
- Relación delante-atrás (FBR)
- Ancho de haz

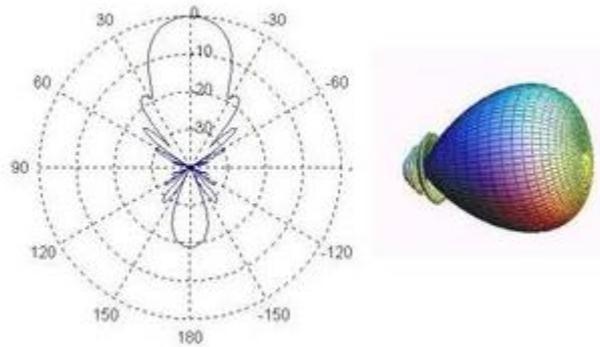


Figura 23. Ejemplo diagrama de radiación [33]

3.2.5 Impedancia

La impedancia de entrada de una antena (Z_{in}) es la relación entre la tensión y la corriente de entrada. Se trata de un número complejo en el que la parte real se denomina resistencia de antena (R_{in}) y la parte imaginaria reactancia (X_{in}). Esta impedancia depende de la frecuencia de operación. La resistencia de antena se asocia a las pérdidas por radiación y a las pérdidas óhmicas. La reactancia corresponde a la energía que almacena la antena, si es positiva la energía que predomina es magnética y si es negativa predomina la eléctrica. La frecuencia de resonancia es aquella en la que la reactancia es negativa.

En el diseño de una antena se pretende obtener un buen rendimiento de la antena, es decir, que la transferencia de potencia entre el generador y la antena sea máxima. En consecuencia, es necesario tener en cuenta las pérdidas por disipación de calor y las pérdidas producidas por desadaptación de impedancias.

Para medir la desadaptación de impedancias se usan dos parámetros: el coeficiente de reflexión (ecuación 4), que se define como la relación entre la amplitud de la onda reflejada y la amplitud de la onda incidente, y la relación de onda estacionaria (ROE) que se relaciona con el coeficiente de reflexión (ecuación 5).

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad S_{11}(dB) \in (-\infty, 0) \quad (4)$$

$$ROE = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad ROE \in [1, \infty) \quad (5)$$

3.2.6 Directividad

Es la capacidad de radiar más potencia en una o varias direcciones (ecuación 6). Otra forma de definirla sería como la relación entre la intensidad de radiación de una antena en la dirección del máximo y la intensidad de radiación de una antena isotrópica (misma intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio) que radia con la misma potencia total.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\vartheta(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \quad (6)$$

donde $4\pi r^2$ es la densidad de potencia de una fuente que irradia isotrópicamente y P_r es la potencia radiada.

3.2.7 Ganancia

Relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica con la misma potencia entregada. Es el producto de la directividad por la eficiencia de radiación (ecuación 7).

$$G(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \cdot \eta_r \quad (7)$$

Otro termino importante es la ganancia realizable (ecuación 8), la cual tiene en cuenta las perdidas por desadaptación.

$$G_{realized} = D \cdot \eta_r \cdot (1 - |S_{11}|^2) \quad (8)$$

3.2.8 Área efectiva

Relación entre la potencia disponible en el puerto de la antena y la densidad de potencia de la onda plana incidente (ecuación 9).

$$A_{eff}(\theta, \varphi) = \frac{P_{load}}{\vartheta(\theta, \varphi)} \quad (9)$$

donde P_{load} es la potencia entregada a la carga.

3.2.9 Factor de antena

Relación entre el campo eléctrico incidente y la tensión en el puerto de entrada de la antena (ecuación 10).

$$AF = \frac{E_i}{V_i} \quad [m^{-1}] \quad (10)$$

donde E_i es el campo incidente y V_i la tensión en el puerto de entrada de la antena.

3.3 Parámetros del sustrato

3.3.1 Permitividad eléctrica o constante dieléctrica

Se trata de un parámetro físico de cualquier material que describe como de afectado es por un campo eléctrico. Está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esta forma anular de forma parcial el campo interno del material.

Normalmente la permitividad de un material se expresa en relación con la permitividad del vacío denominándose así, permitividad relativa (ecuación 11). La permitividad absoluta se calcula multiplicando la permitividad relativa por la del vacío.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (11)$$

Donde ϵ es la permitividad absoluta y $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} F/m$ es la permitividad del vacío.

3.3.2 Tangente de pérdidas

También denominada pérdida dieléctrica, cuantifica la disipación de energía electromagnética de un material dieléctrico a través de, por ejemplo, calor. Es parametrizada como $\tan \delta$ (ecuación 12).

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon} \quad (12)$$

Donde σ es la conductividad, ω la frecuencia angular y ϵ la permitividad.

3.4 Rango de funcionamiento

Una de las características más importantes en el diseño de este tipo de antenas es el rango de lectura. Este rango es la distancia máxima en el que un lector RFID es capaz de detectar la señal reflejada por la etiqueta. Debido a que el rango de lectura lo define la etiqueta, la sensibilidad del lector es alta en comparación con la de la etiqueta. El rango de lectura también es sensible a la orientación ya que esta afecta a la polarización, el material sobre el que está situado la etiqueta y el ambiente por donde se propagara la señal.

El rango de lectura tanto en el enlace lector-etiqueta o *forward* (ecuación 13) como de retorno o *return* (ecuación 14) pueden calcularse usando la ecuación de Friis como [34]:

$$R_{forward} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{P_{TX} G_{reader} G_{tag}}{P_{min,tag}}} \quad (13)$$

$$R_{return} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{TX} T_b G_{reader}^2 G_{tag}^2}{P_{min,rdr}}} \quad (14)$$

Donde λ es la longitud de onda, P_{TX} es la potencia que transmite el lector, G_{reader} es la ganancia del lector, G_{tag} es la ganancia de la etiqueta, $P_{min,tag}$ y $P_{min,rdr}$ son las potencias mínimas requeridas por la etiqueta y por el lector, respectivamente, para funcionar y T_b son las pérdidas de retorno del chip.

Actualmente, el rango de lectura en un sistema RFID pasivo está limitado por la sensibilidad del chip, por lo tanto, en este documento se utiliza la fórmula 13 para el cálculo del rango de lectura del diseño.

4. Análisis de antenas RFID sobre diferentes sustratos

En este capítulo se han analizado dos antenas RFID sobre sustrato de papel ya existentes, una de tipo parche y otra de tipo dipolo. También, y a modo de entrenamiento, también se ha analizado otra antena dipolo sobre sustrato de algodón. Para ello, se ha utilizado el software Advanced Design System (ADS).

Este programa posee, fundamentalmente, dos espacios de trabajo para el diseño y análisis de antenas. El primero (figura 24), es el esquemático. Este espacio permite implantar modelos de circuitos teóricos, así como importar fragmentos de diseños para evaluarlos. El segundo (figura 25), y el usado a lo largo de este presente trabajo, consiste en un espacio de diseño (de aquí en adelante *layout*). Este espacio permite dibujar diferentes tipos de materiales, como metal o dieléctricos, para combinarlos y diseñar antenas, líneas de transmisión, etc.

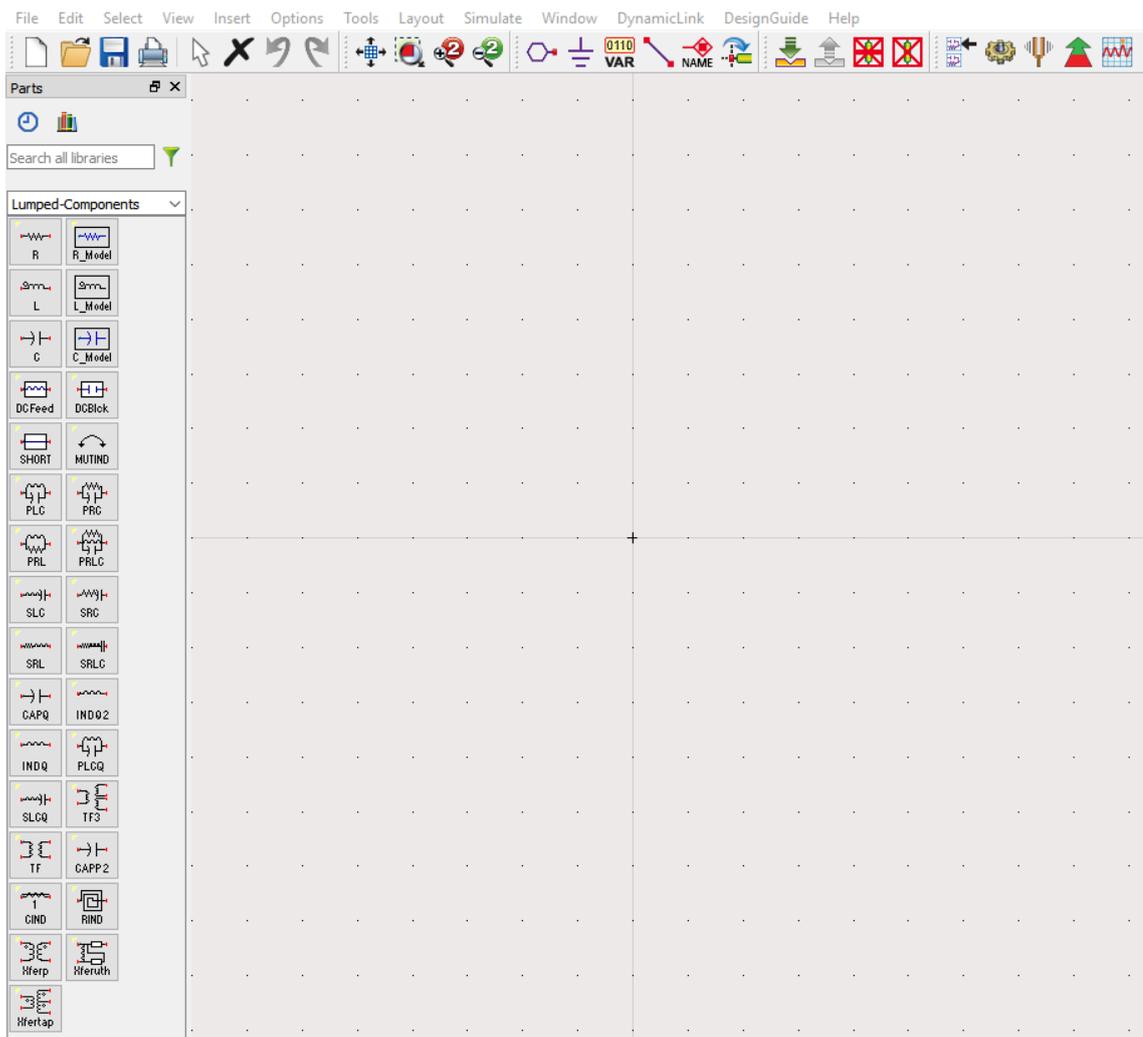


Figura 24. Espacio esquemático en ADS

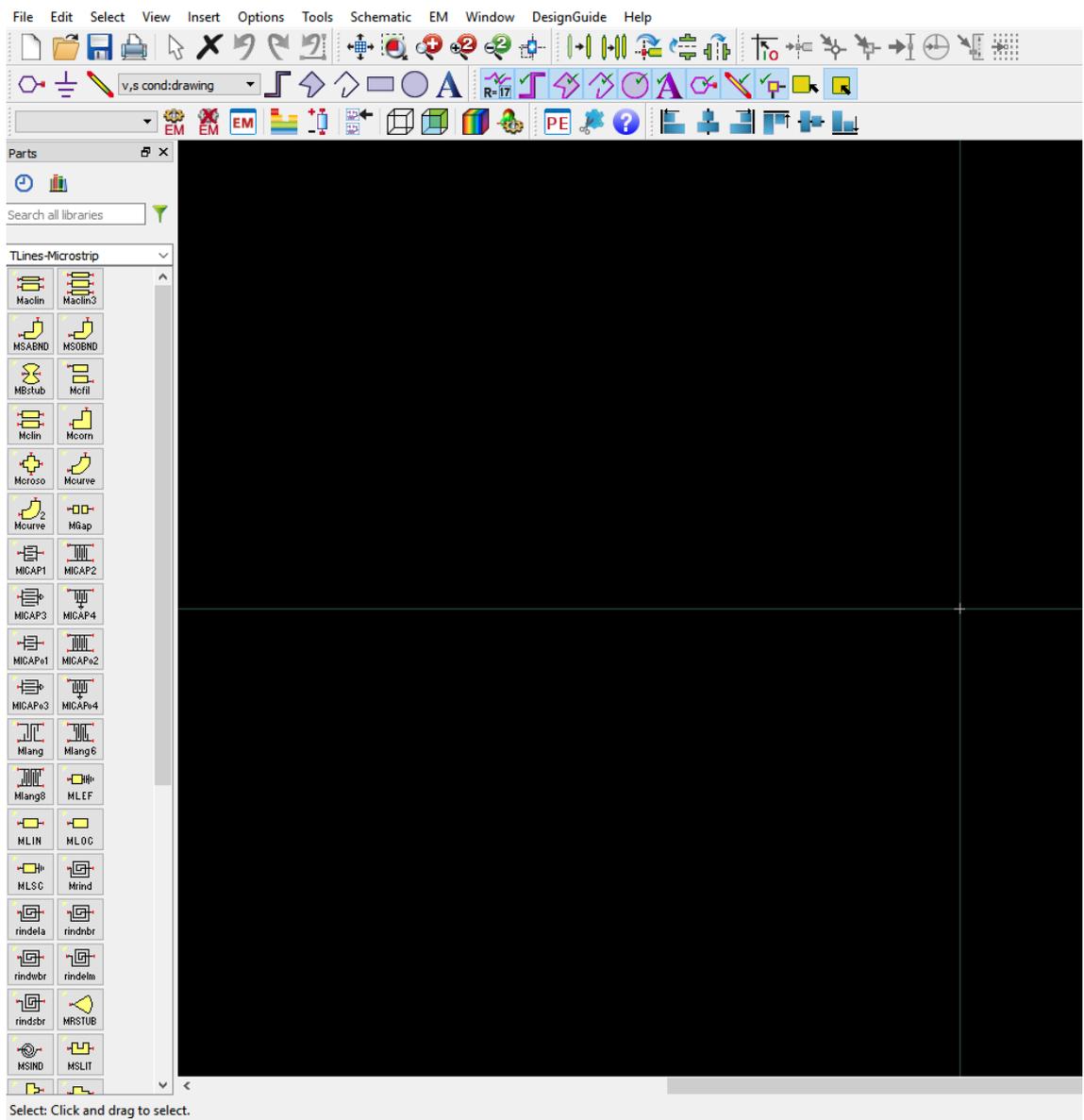


Figura 25. Espacio de diseño o *layout* en ADS

Dado que este trabajo consiste en el diseño y análisis de una antena se utilizará el modo *layout* del programa dado que proporciona una simulación electromagnética y un análisis de radiación. Precisamente esto último será analizado con la aplicación Momentum (figura 26) dentro de ADS.

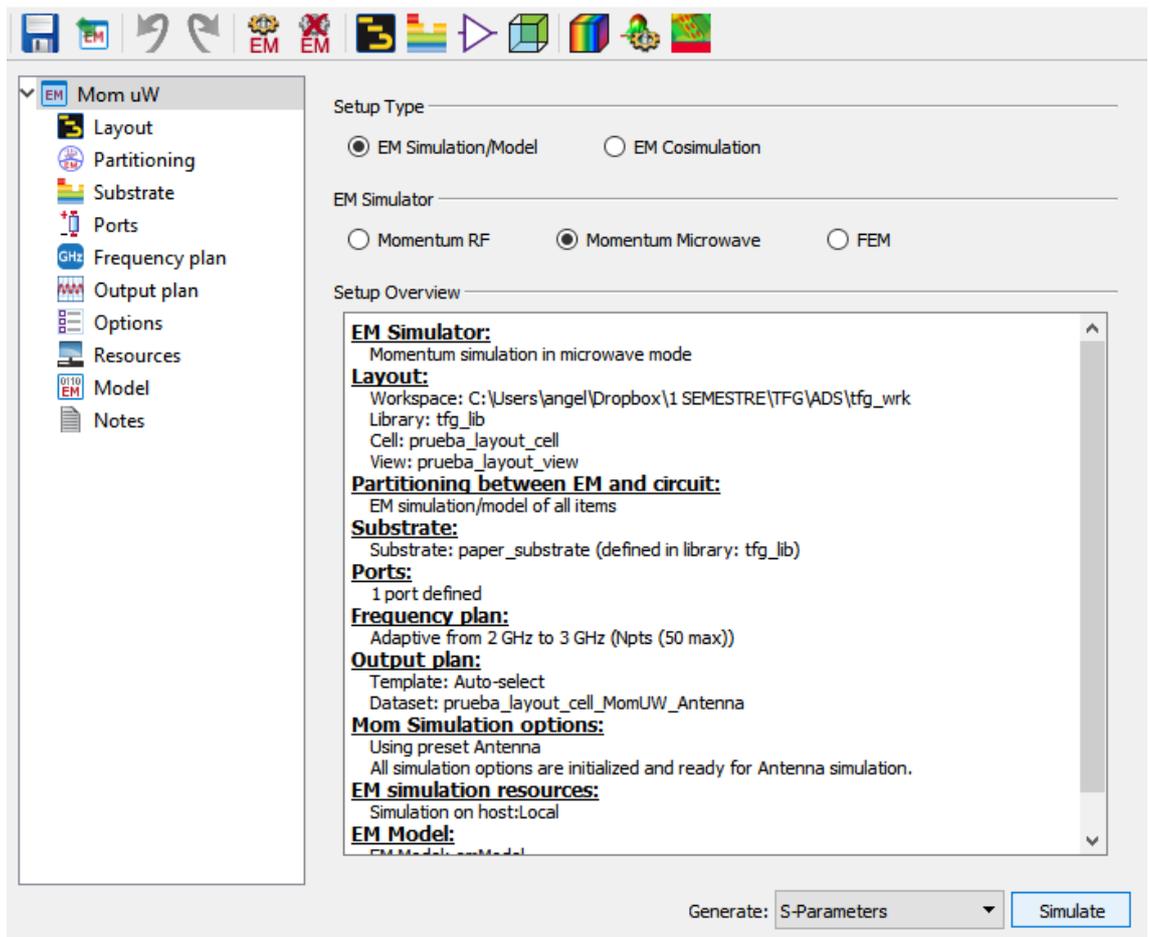


Figura 26. Aplicación *Momentum*

4.1 Análisis de antena tipo parche

Las antenas tipo parche también son conocidas como antenas microstrip dado que se basan en esa tecnología. Se ha elegido esta antena por varios motivos:

- Este tipo de antenas son relativamente pequeñas debido a su gran miniaturización y su bajo perfil. De esta forma, se adecuan muy bien a dispositivos muy pequeños y livianos.
- Son muy baratas de producir.
- Son fáciles de diseñar y por lo tanto de simular.

Este análisis sirve como ejercicio de simulación introductorio para proporcionar una amplia visión sobre el diseño y simulación de antenas. Por último, se espera que esta antena opere a la frecuencia de 2,4 GHz.

4.1.1 Diseño

En este apartado será analizada una antena tipo parche [35]. Esta antena está situada sobre un sustrato de papel (figura 27) con una constante dieléctrica $\epsilon_r = 1.63$, una tangente de pérdidas $\tan \delta = 0.046$ y un grosor de 1.6 mm.

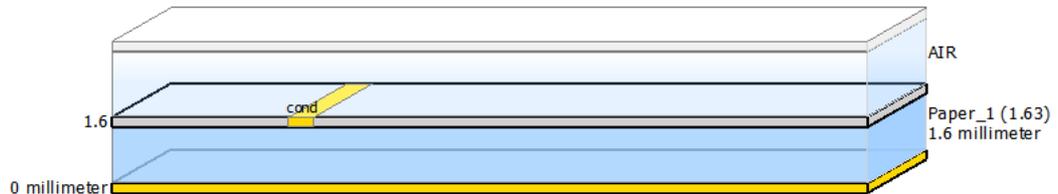


Figura 27. Sustrato de papel con $\epsilon_r=1.63$ y $\tan \delta=0.046$

La elección de estos parámetros es debida a que se ha partido de un estudio previo ya realizado en el Trabajo de Fin de Grado “Disseny de components de micrones passius en paper” [35] donde se ha realizado un profundo análisis de diferentes componentes pasivos de microondas, sobre 3 sustratos de papel con distintas características, tal y como muestra la tabla de la figura 28:

Sustrato	Constante dieléctrica (ϵ_r)	Tangente de pérdidas ($\tan \delta$)
1	1,63	0,046
2	3,28	0,061
3	5,2	0,11

Figura 28. Diferentes características de los sustratos de papel analizados [35]

Parece ser que el que mejor resultados a ofrecido ha sido el sustrato 1, motivo por el cual se ha utilizado para analizar la antena tipo parche. En el diseño final también se ha analizado con un solo sustrato.

El diseño de la antena es que muestra la figura 29:

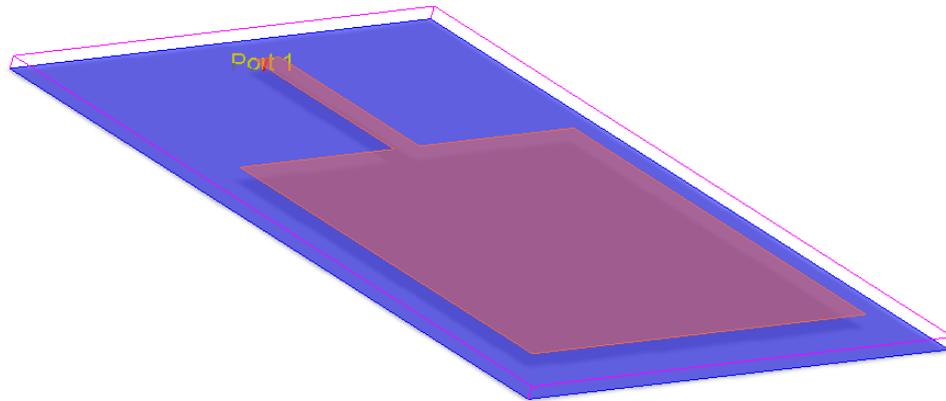


Figura 29. Diseño de la antena tipo parche

Donde:

Longitud del parche: $L = 48.10$ mm

Anchura del parche: $W = 54.5$ mm

Longitud de la línea de alimentación: $l_a = 23$ mm

Anchura de la línea de alimentación: $W_a = 4.1$ mm

4.1.2 Simulación

Una vez realizado el diseño de la antena sobre el sustrato de papel se extraen los resultados de la simulación electromagnética:

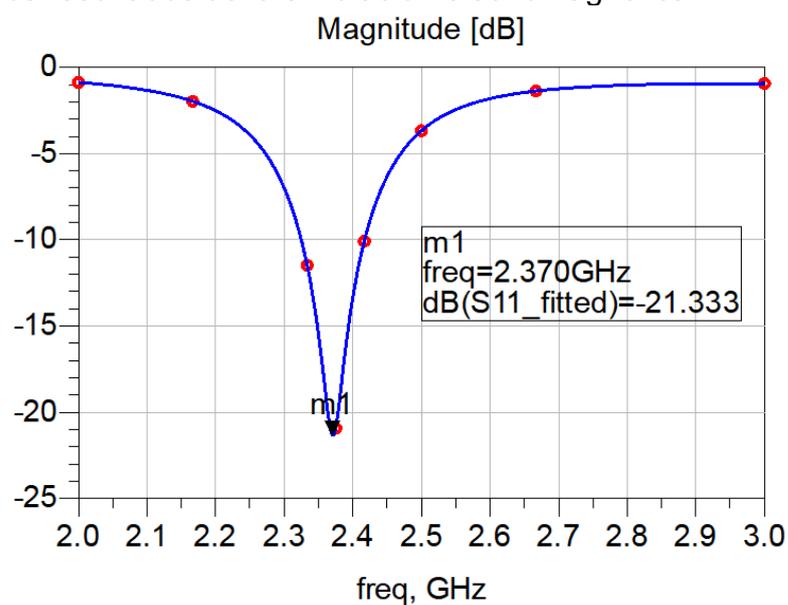
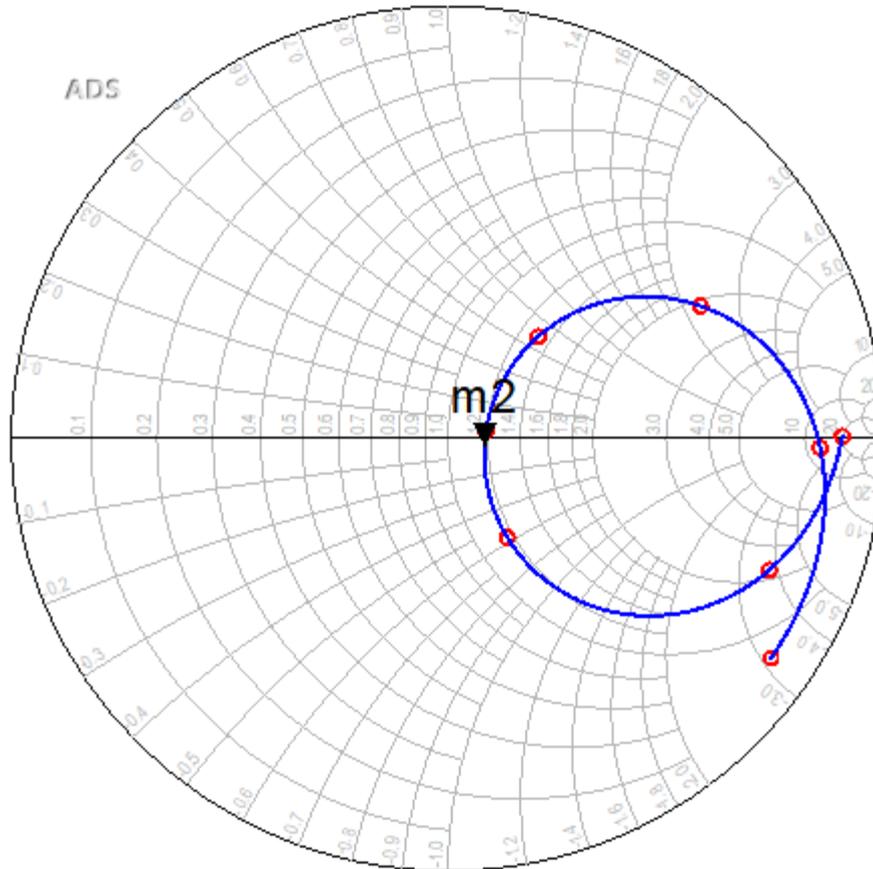


Figura 30. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena tipo parche

m2
freq=2.370GHz
S11_fitted=0.086 / -9.932
impedance = Z0 * (1.184 - j0.035)



freq (2.000GHz to 3.000GHz)

Figura 31. Impedancia de entrada en la carta Smith

Se obtiene un coeficiente de reflexión $S_{11} = -21.33$ dB (figura 30) a la frecuencia de operación. Esto quiere decir que este diseño es óptimo ya que no se produce reflexión en esa frecuencia.

En la carta Smith (figura 31) se observa como la parte reactiva de la impedancia de entrada a la frecuencia de resonancia prácticamente se anula. Esto provoca que se maximice la potencia de transferencia entre el generador y la antena.

Mediante la simulación electromagnética se obtiene el siguiente diagrama de radiación (figura 32) en 3 dimensiones:

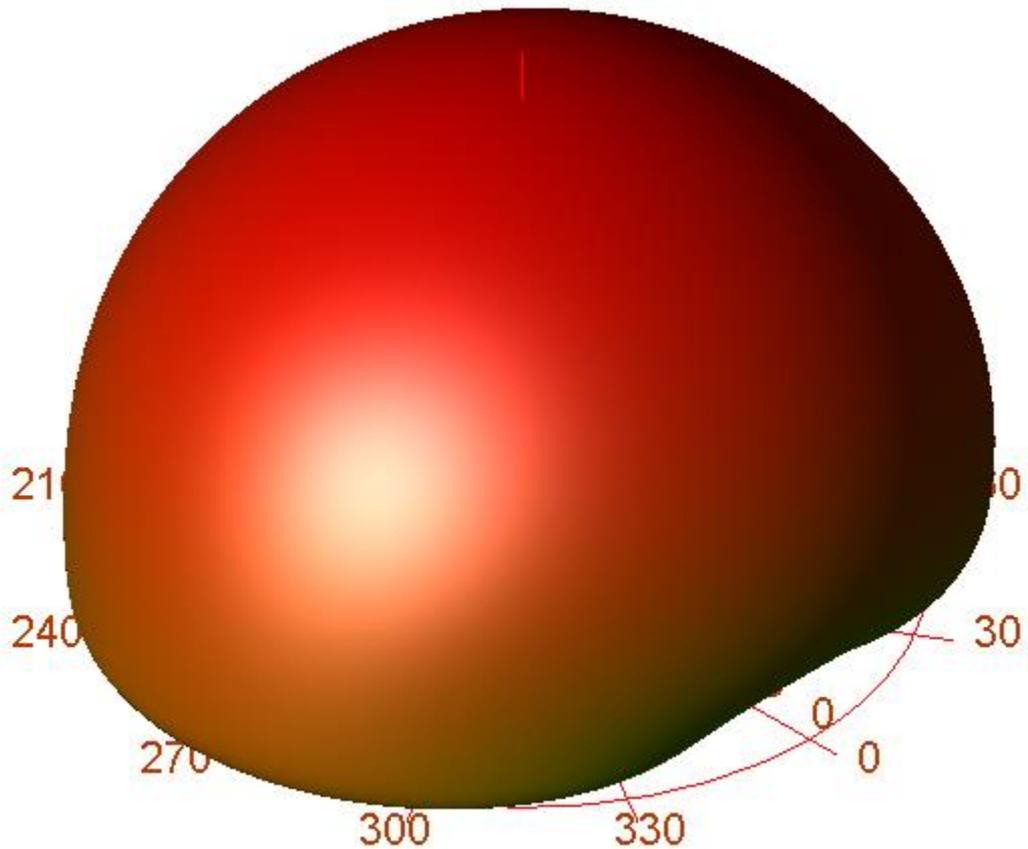


Figura 32. Diagrama de radiación de la antena tipo parche

Se puede observar como radia toda la potencia en la dirección positiva del eje z mientras que, el plano de masa hace que sea nula la radiación en la dirección negativa de dicho eje.

ADS también permite una simulación en 2 dimensiones como podemos ver en las figuras 33, 34 y 35:

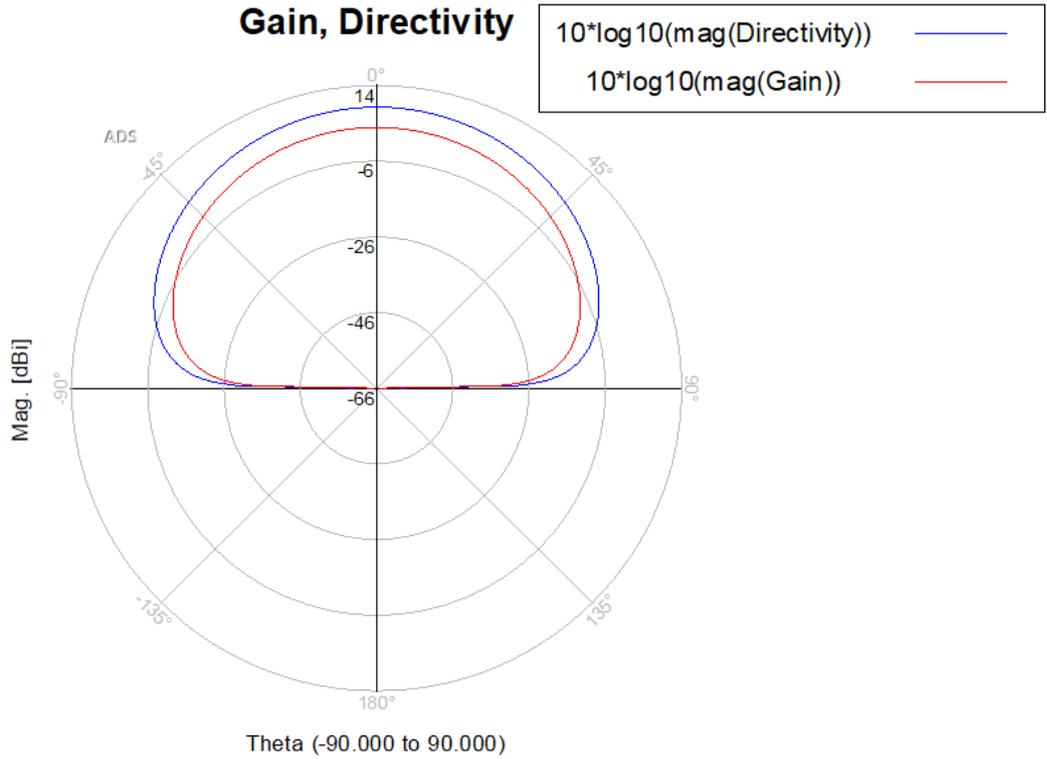


Figura 33. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena tipo parche

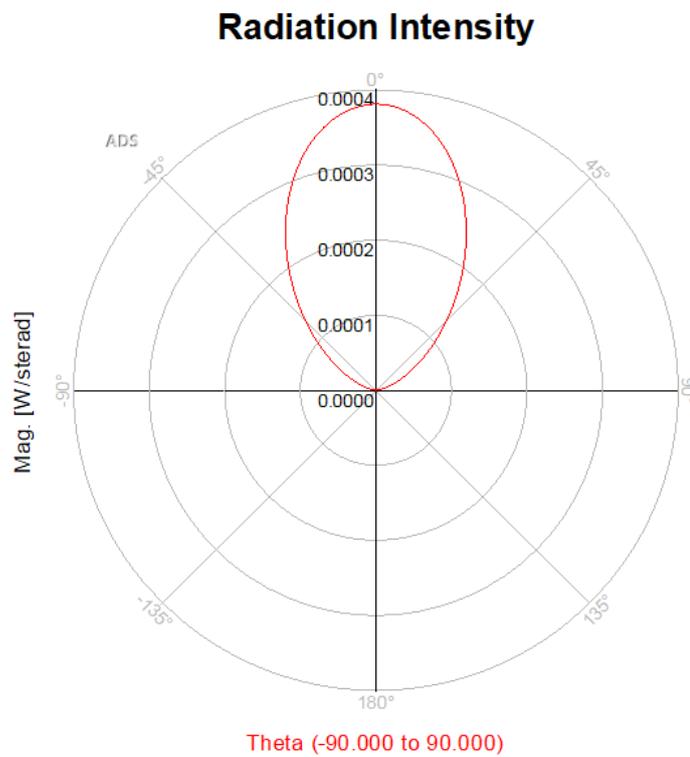


Figura 34. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena tipo parche

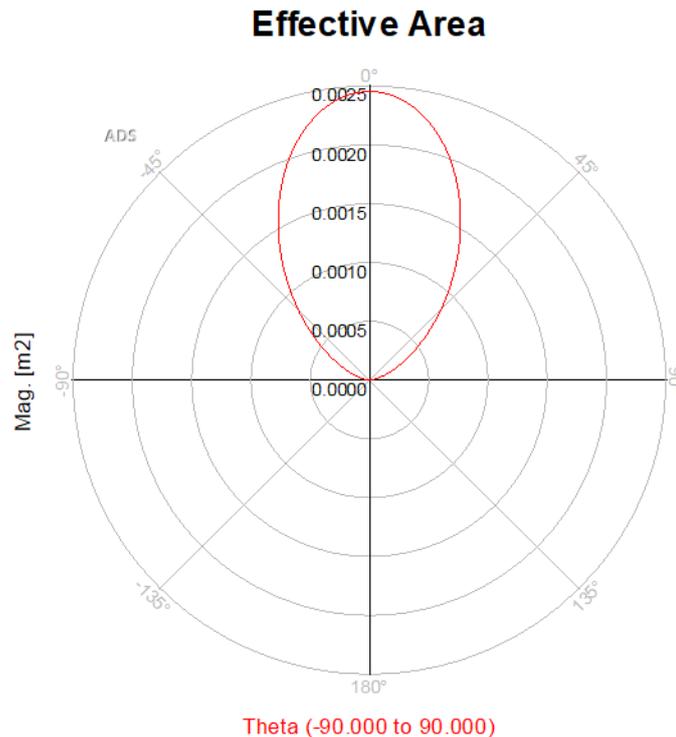


Figura 35. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena tipo parche

4.1.3 Resultados

La opción *FarField* permite analizar los parámetros de la antena (figura 36) así como visualizarlos de forma gráfica (figura 37).

Frequency (GHz)	2.375
Input power (Watts)	0.00248167
Radiated power (Watts)	0.000728326
Directivity(dBi)	8.2294
Gain (dBi)	2.90522
Radiation efficiency (%)	29.3483

Figura 36. Parámetros de la antena tipo parche

La figura 36 muestra que a la frecuencia de operación de 2,375 GHz la directividad de la antena es de 8,23 dBi, la ganancia es de 2,9 dBi y la eficiencia es del 29,35 %. En cuanto al ancho de banda, en las antenas RFID se establece que una antena tiene un correcto funcionamiento con un coeficiente de reflexión menor o igual a -10 dB. Por lo tanto, en la gráfica del parámetro S_{11} se observa que a -10 dB las frecuencias son 2,32 GHz y 2,42 GHz, es decir, un ancho de banda es de 100 MHz.

Resulta interesante observar el comportamiento de estos parámetros de forma gráfica en el intervalo de 2 GHz a 3GHz:

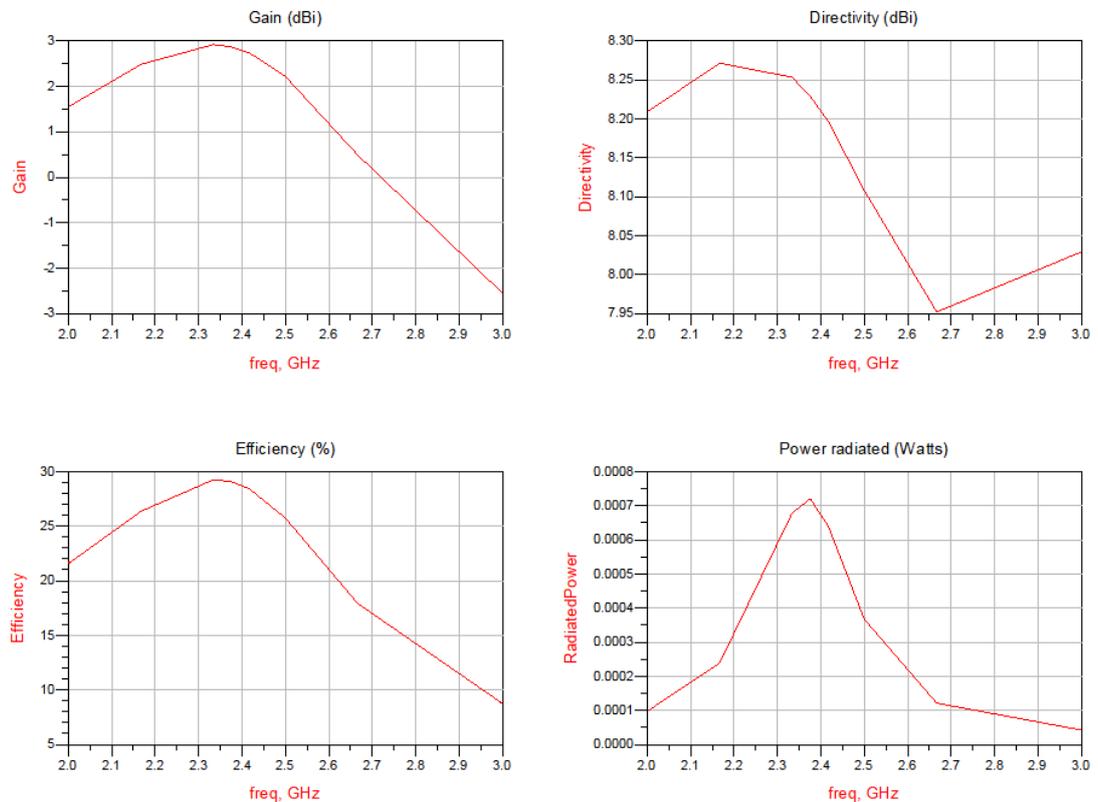


Figura 37. Representación gráfica de los parámetros de la antena tipo parche

4.2 Análisis de antena dipolo sobre sustrato de papel

Las antenas dipolo son una de las topologías más usadas en antenas RFID por su sencillo diseño, sus bajos costes, su pequeño tamaño y sus buenas prestaciones. Por ello y a modo de ejemplo, en este apartado se analizará la antena del estudio “Design of an UHF RFID Tag Antenna with a Paper Substrate” [23]. El tamaño de esta antena es de 63.6 mm x 25 mm y las frecuencias a la que opera están comprendidas entre 881.9 MHz y 962.2 MHz con frecuencia central en 915 MHz. Este rango cubre la mayoría de las frecuencias disponibles en diferentes países.

4.2.1 Diseño

En este caso, la antena estará sobre un sustrato de papel común, cuyo peso es de 80 g/m². Este papel es ecológico, económico, muy utilizado y de los más utilizados hoy en día. La constante dieléctrica es de 2.31 y el grosor de 0.1 mm tal como muestra la figura 38.

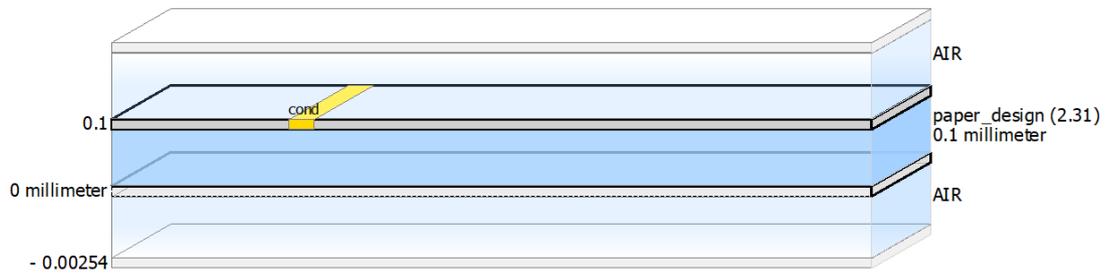


Figura 38. Sustrato de papel con $\epsilon_r=2.31$ y $\tan \delta=0.15$

El diseño de la antena es el mostrado por la figura 39:

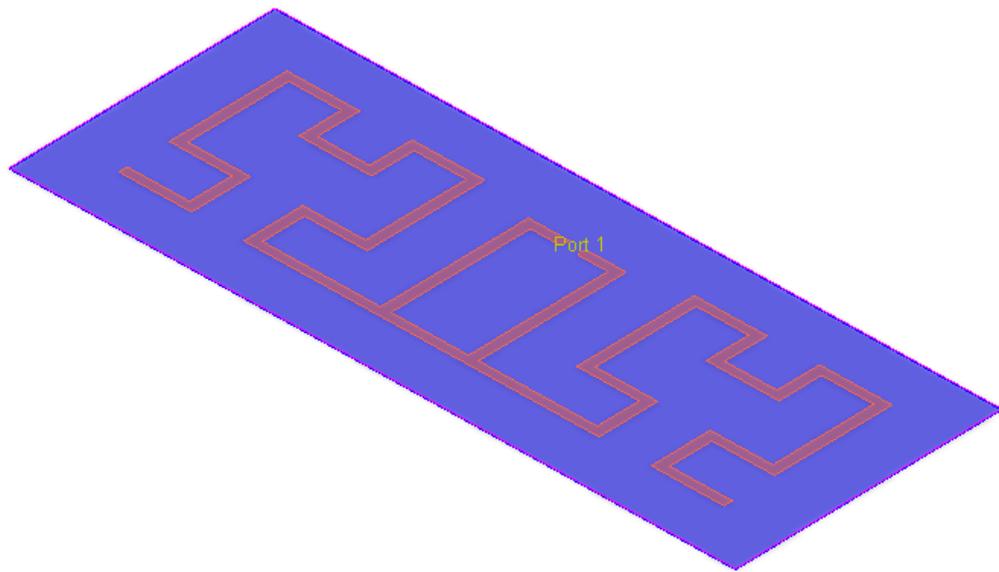


Figura 39. Diseño de la antena dipolo

Las dimensiones del diseño las mostradas por la figura 40:

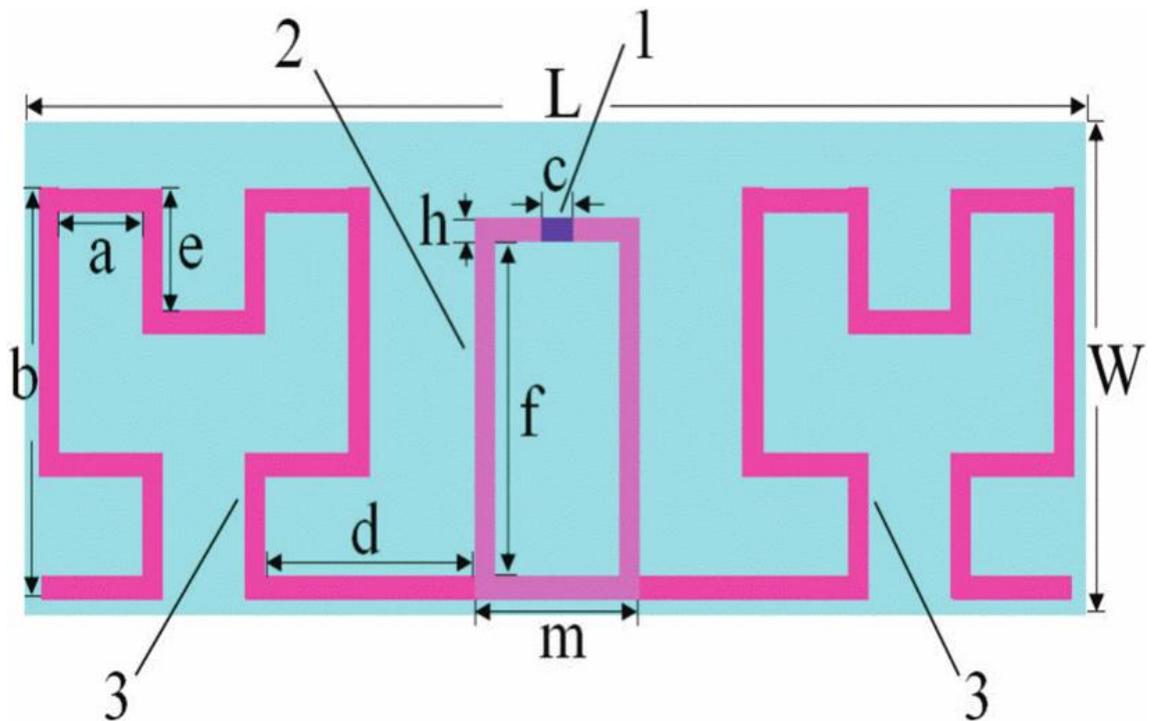


Figura 40. Geometría de la antena dipolo [23]

Donde $L = 63.6$ mm, $W = 25$ mm, $m = 9.64$ mm, $a = 5.16$ mm, $b = 20.48$ mm, $c = 1.64$ mm, $d = 12.66$ mm, $e = 6.16$ mm, $f = 17$ mm y $h = 1$ mm.

4.2.2 Simulación

En este apartado se muestra la gráfica del parámetro S_{11} (figura 41), la impedancia de entrada en la carta Smith (figura 42) y el diagrama de radiación (figura 43).

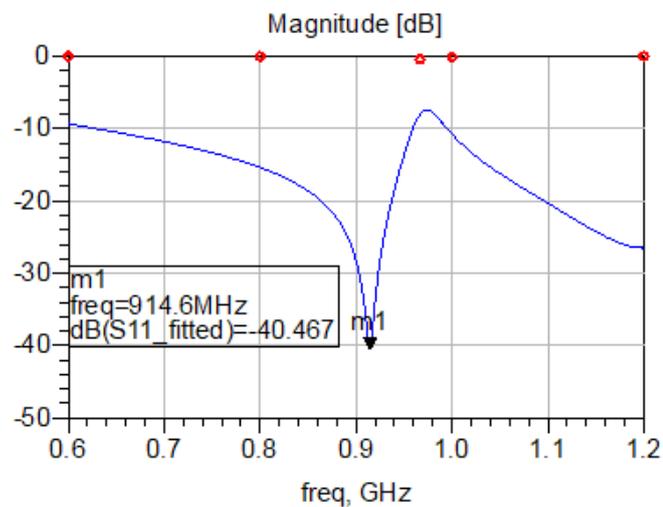


Figura 41. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena tipo dipolo

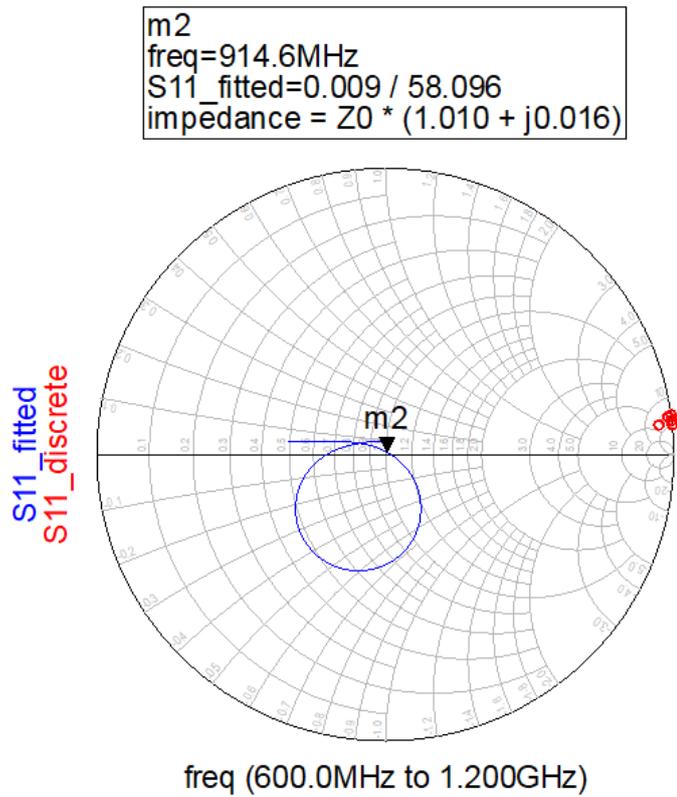


Figura 42 . Impedancia de entrada en la carta Smith

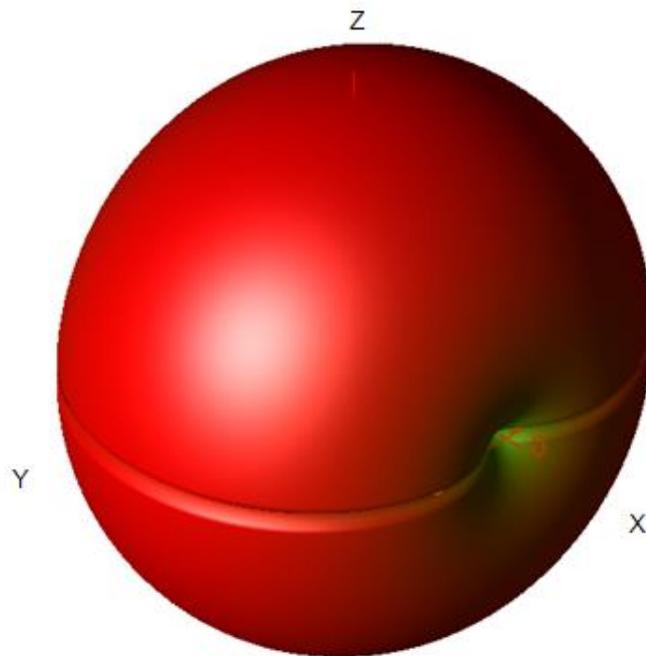


Figura 43. Diagrama de radiación de la antena dipolo

A diferencia del caso anterior, ahora no hay plano de masa y, por lo tanto, los máximos de radiación se encuentran en las direcciones positivas y negativas de los ejes Z e Y, encontrándose los mínimos en el eje X. Por lo tanto, se trata de una antena omnidireccional. En la figura 44 se aprecian los máximos del eje Z y los mínimos del eje X. Esta diferencia, respecto a la antena del caso anterior, se muestra también en 2 dimensiones con las figuras 44, 45 y 46:

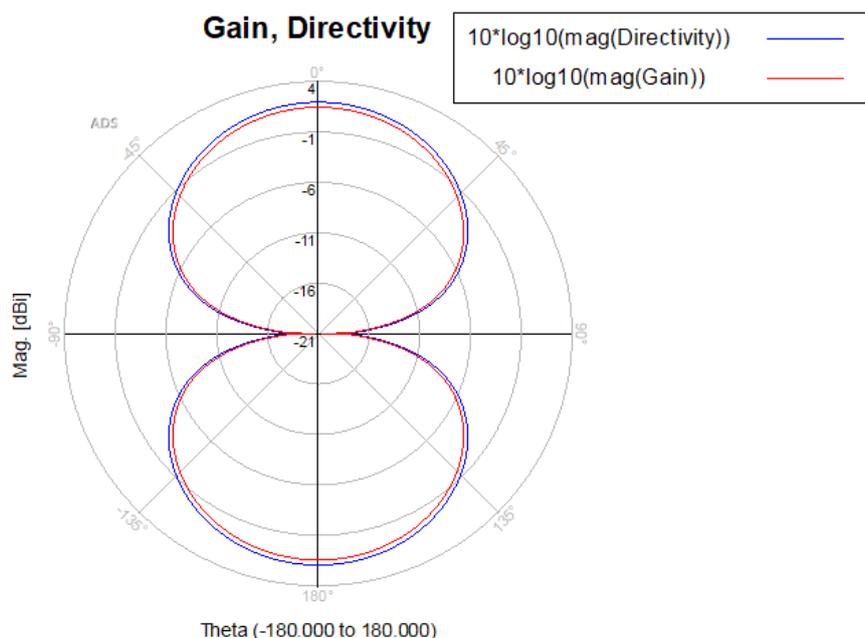


Figura 44. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena tipo dipolo

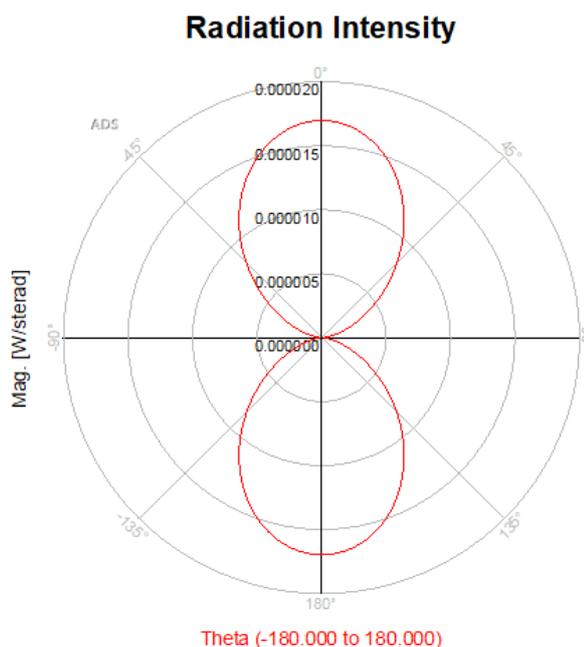


Figura 45. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena tipo dipolo

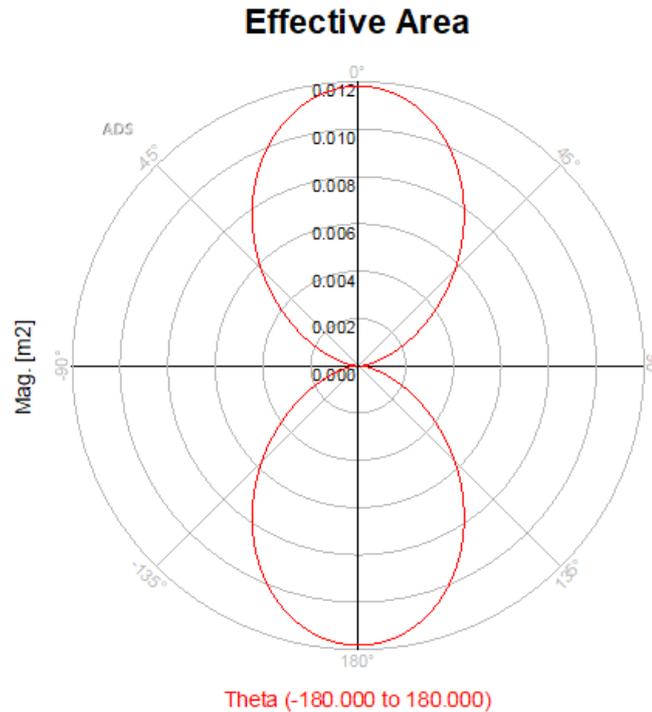


Figura 46. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena tipo dipolo

4.2.3 Resultados

En este caso los valores obtenidos mostrados en la figura 47 y las gráficas de la figura 48 no coinciden exactamente con los del estudio analizado, pero a pesar de todo, son diferencias aceptables. Esto puede deberse, por ejemplo, a diferentes valores como los referidos a los materiales con los que se ha construido la antena que no están especificados en el estudio.

Frequency (GHz)	0.9146
Input power (Watts)	0.000154453
Radiated power (Watts)	0.000137617
Directivity(dBi)	1.93758
Gain (dBi)	1.43633
Radiation efficiency (%)	89.0994
Maximum intensity (Watts/Steradian)	1.71089e-05
Effective angle (Steradians)	8.04362

Figura 47. Parámetros de la antena dipolo

A la frecuencia de operación de 914,6 MHz se obtiene una directividad de 1,93 dBi, una ganancia de 1,43 dBi con una eficiencia de radiación del 89 %. Con este ejemplo, queda demostrado sus mejores prestaciones con respecto a la antenna tipo parche.

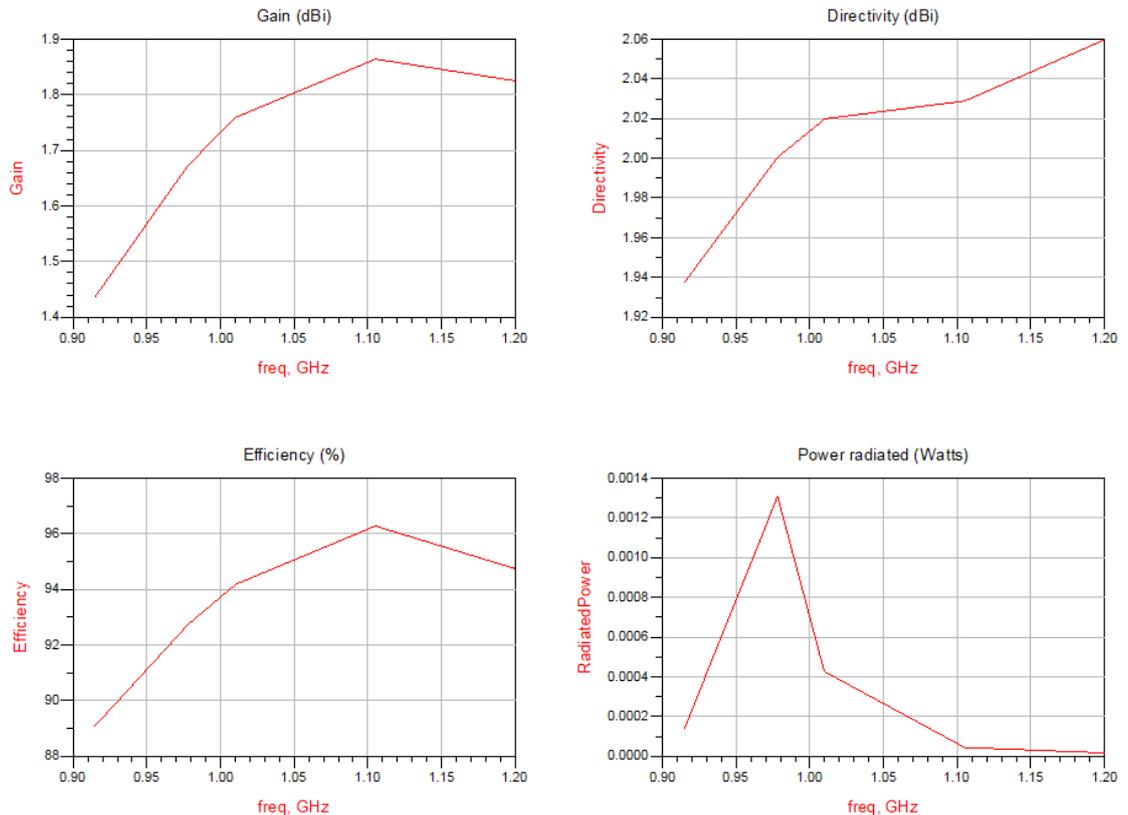


Figura 48. Representación gráfica de los parámetros de la antenna tipo dipolo

4.3 Análisis de antenna dipolo sobre sustrato de algodón

En este apartado, para continuar con otro ejemplo a modo de entrenamiento, se analizará otra antenna con tipología dipolo dada la importancia de estas, pero con un sustrato flexible diferente para analizar sus prestaciones. Para ello se ha escogido la antenna diseñada en el estudio *“Embroidery manufacturing techniques for textile dipole antenna applied to wireless body area network”* [36]. El sustrato en este caso se trata de algodón aportando así, una visión más amplia de las prestaciones de los sustratos. El objetivo de esta antenna es operar en la banda de radio médica y científica a la frecuencia de 2.45 GHz para aplicaciones WBAN.

4.3.1 Diseño

Este, consiste en un dipolo básico con el diseño que muestra la figura 49:

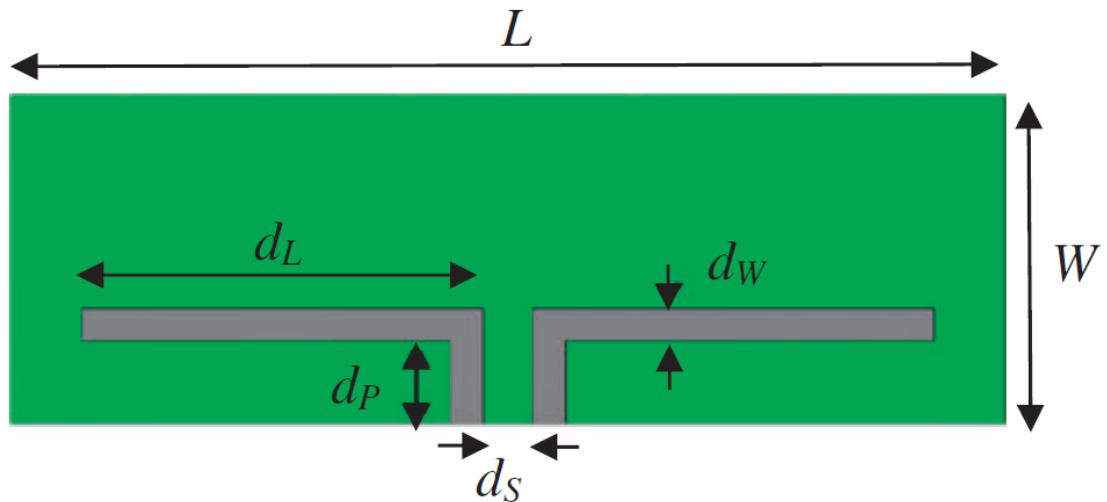


Figura 49. Diseño de la antena dipolo sobre sustrato de algodón [36]

Donde $W = 20$ mm, $L = 60$ mm, $d_L = 24$ mm, $d_w = 2$ mm, $d_s = 3$ mm y $d_P = 5$ mm

Esta antena está situada sobre un sustrato de algodón con una constante dieléctrica de 1.3, una tangente de pérdidas de 0.058 y un grosor de 0.4 mm tal como muestra la figura 50:

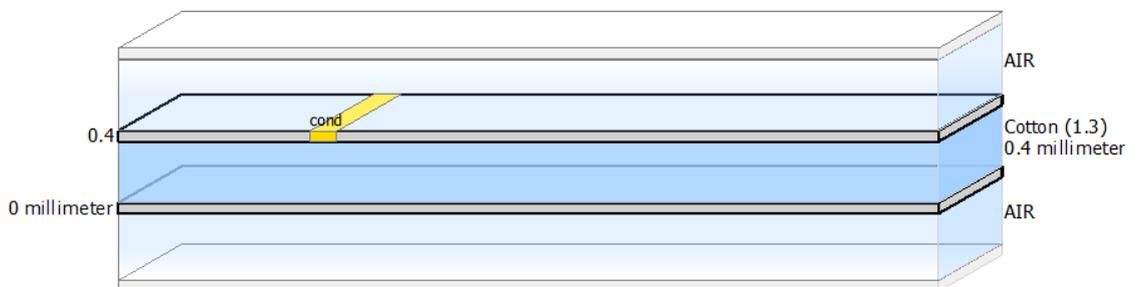


Figura 50. Sustrato de algodón con $\epsilon_r=1.3$ y $\tan \delta=0.058$

4.3.2 Simulación

Con motivo de seguir la misma estructura de los apartados anteriores, en este se muestra, también, la gráfica del parámetro S_{11} (figura 51), la impedancia de entrada en la carta Smith (figura 52) y el diagrama de radiación en tres dimensiones (figura 53) y en dos dimensiones (figuras 54, 55 y 56).

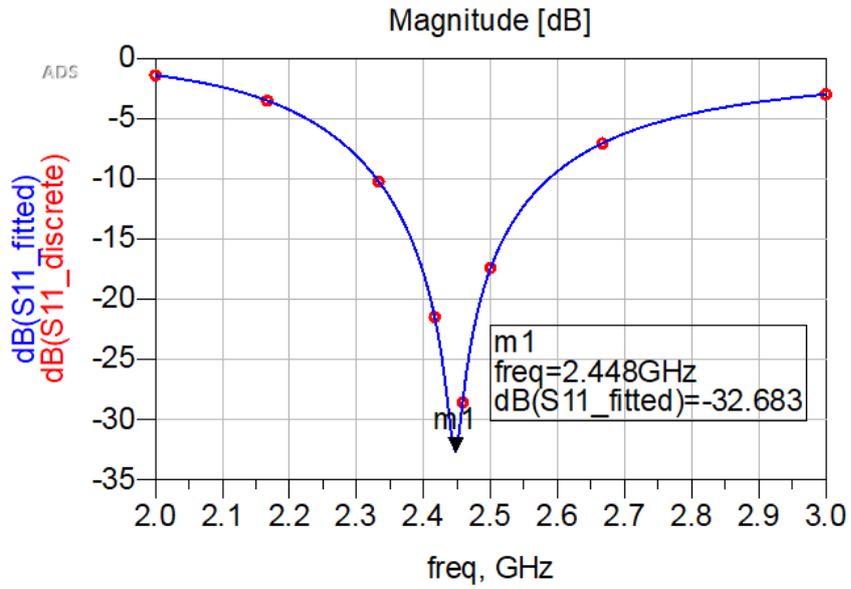


Figura 51. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón.

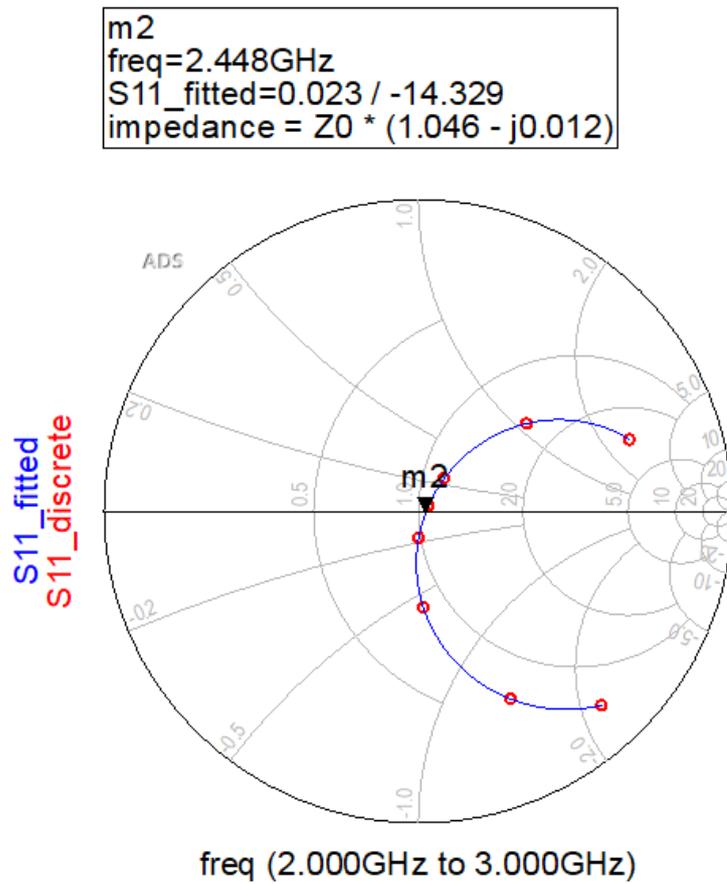


Figura 52. Impedancia de entrada en la carta Smith

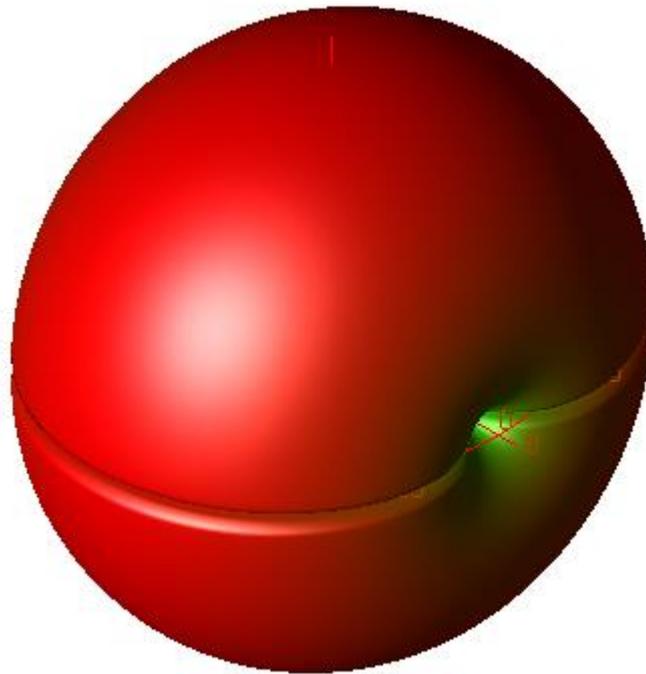


Figura 53. Diagrama de radiación de la antena dipolo sobre sustrato de algodón

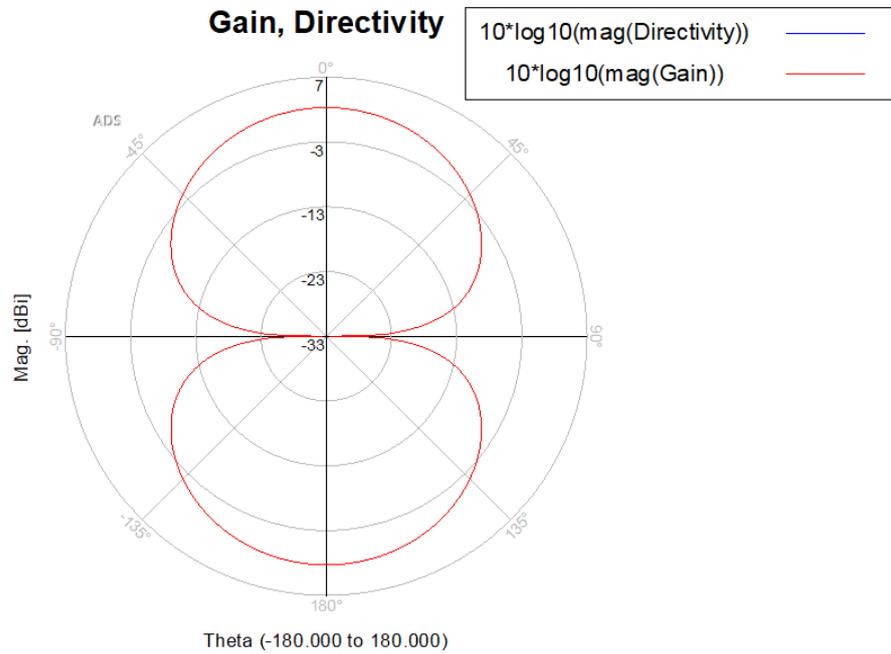


Figura 54. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón

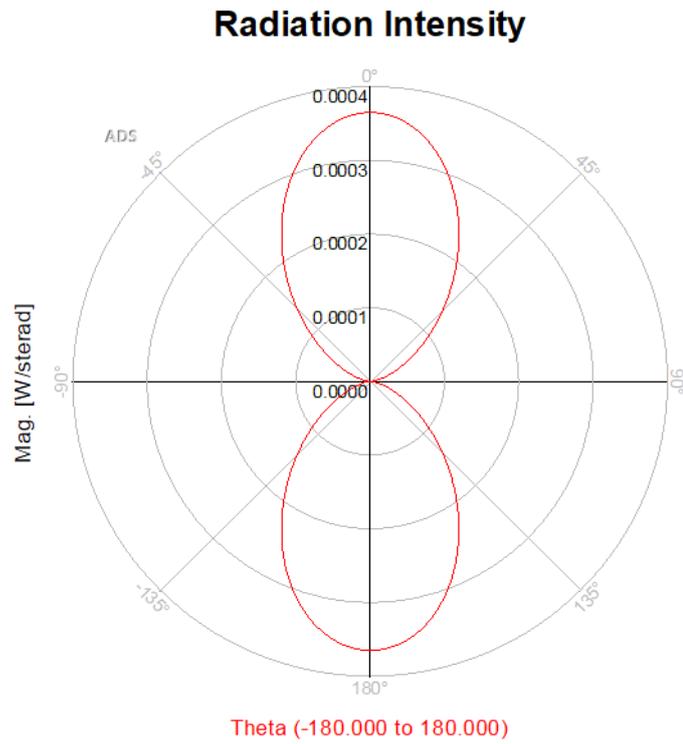


Figura 55. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón

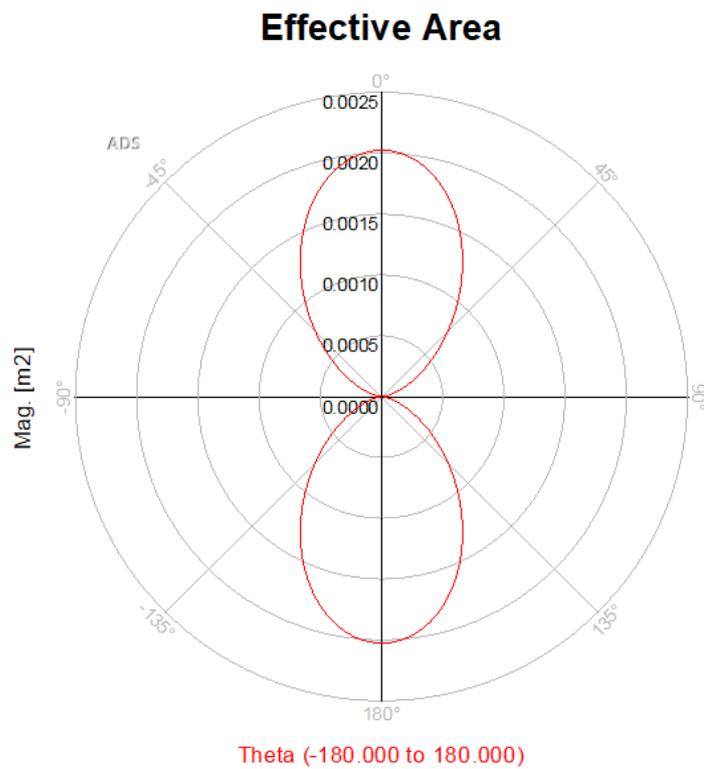


Figura 56. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón

4.3.3 Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones anteriores. En este caso si se han conseguido unos valores muy similares a lo que aporta el estudio. Estos, se pueden observar en las figuras 57 y 58.

Frequency (GHz)	2.448
Input power (Watts)	0.00270893
Radiated power (Watts)	0.00270893
Directivity(dBi)	2.28177
Gain (dBi)	2.28177
Radiation efficiency (%)	100
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000364556
Effective angle (Steradians)	7.43076

Figura 57. Parámetros de la antena dipolo sobre sustrato de algodón

A la frecuencia de operación de 2.448 GHz se ha obtenido una directividad de 2,28 dBi, una ganancia de 2,28 dBi y una eficiencia de radiación del 100 %. Esto es debido a que en la simulación no se han considerado las pérdidas.

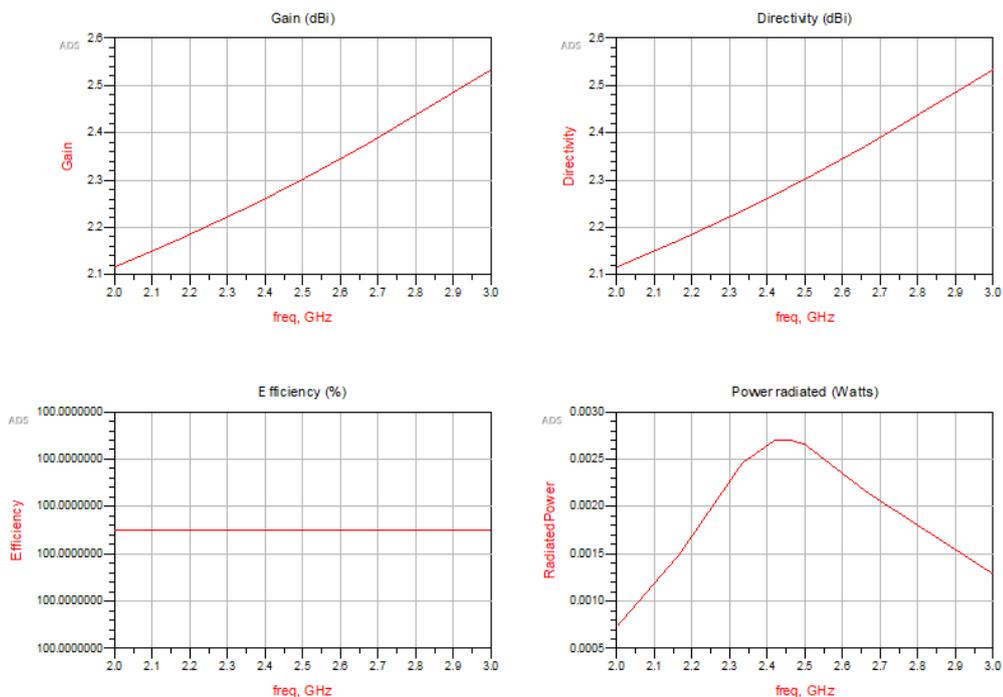


Figura 58. Representación gráfica de los parámetros de la antena tipo dipolo sobre sustrato de algodón

5. Diseño y simulación de la antena RFID sobre sustrato de papel

Para continuar con la misma estructura que en los casos anteriores, en este apartado se presenta el diseño, simulación y resultados de la antena propuesta. Además, se añade otro subapartado donde se aportan conclusiones.

5.1 Diseño

El objetivo de esta antena es que pueda ser usada para fines comerciales en el ámbito europeo, por ello esta antena opera en el rango de frecuencias de UHF para la región europea (865-868 MHz). Se ha elegido hacer un diseño de tipo dipolo dado que es una de las mejores topologías para este rango de frecuencias en cuanto a prestaciones se refiere. Además, la mayoría de las antenas en UHF están basadas en dicha tipología. En consecuencia, ha sido diseñada para la frecuencia central de 866 MHz y está impresa sobre un sustrato de papel cuyas dimensiones son 160mm x 50 mm x 0.1 mm.

La geometría propuesta es el resultado de multitud de pruebas. En un primer momento se partió desde un diseño básico de un dipolo de media onda y a partir de ahí, se añadieron elementos a los extremos laterales y superior para mejorar el desempeño de la antena. Mediante las figuras 59 y 60 se muestra la geometría y dimensiones de la antena propuesta.

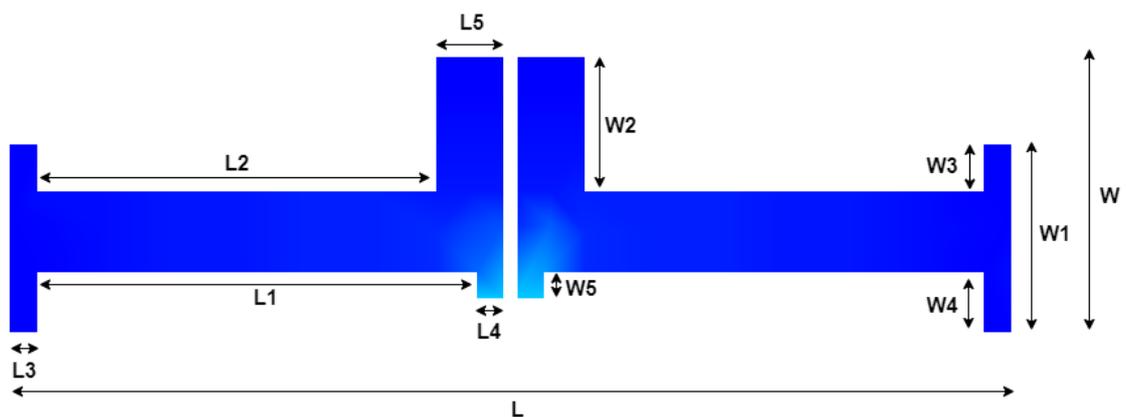


Figura 59. Geometría de la antena propuesta

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
L	148 mm	W	41 mm
L1	65 mm	W1	28 mm
L2	59 mm	W2	20 mm
L3	4 mm	W3	7 mm
L4	4 mm	W4	9 mm
L5	10 mm	W5	4 mm

Figura 60. Dimensiones de la antena propuesta

El papel elegido como sustrato es el que tiene un peso de 80 g/m^2 dado que es el más utilizado, más económico y más respetuoso con el medio ambiente. La constante dieléctrica de este sustrato es de 2.31, la tangente de pérdidas es 0.05 y el grosor de 0.1 mm tal y como muestra la figura 61:

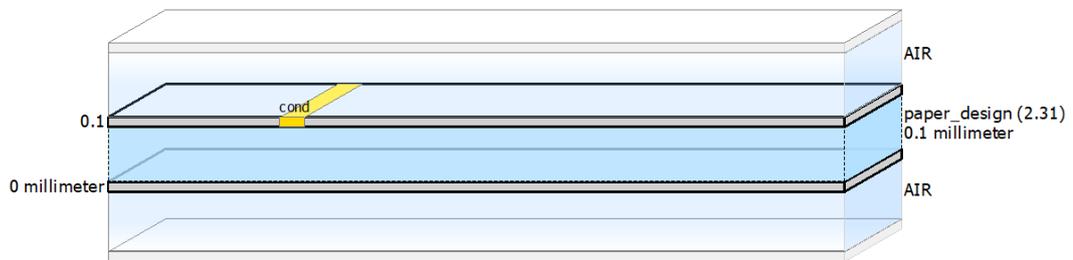


Figura 61. Sustrato de la antena propuesta

Finalmente, la antena propuesta sobre sustrato de papel se muestra en la figura 62 donde, además se puede ver donde está situado el puerto de medida:

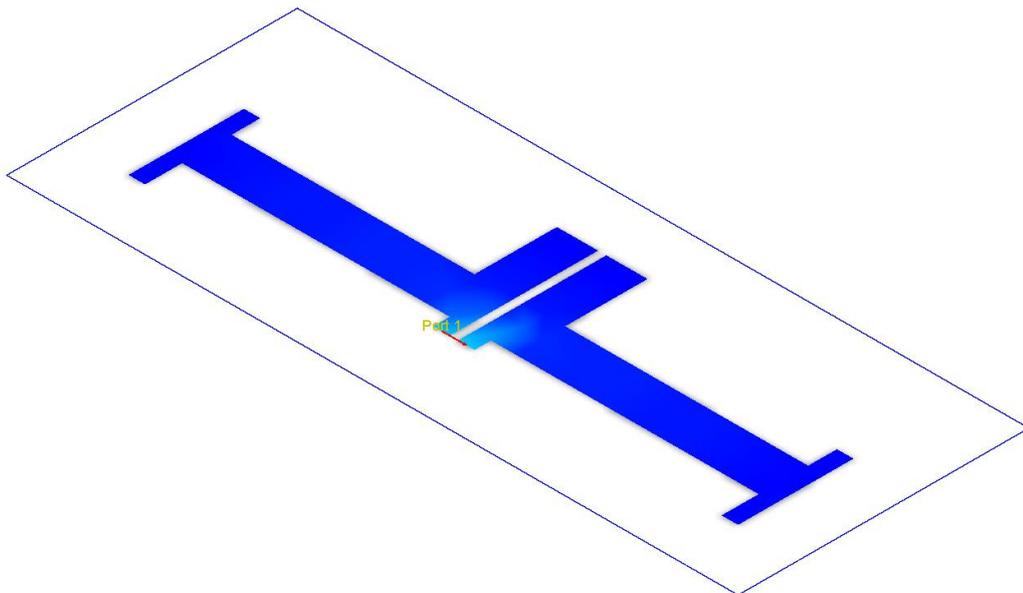


Figura 62. Diseño antena dipolo propuesta

5.2 Simulación

En este apartado se muestra la gráfica del parámetro S_{11} (figura 63), la impedancia de entrada en la carta Smith (figura 64), el diagrama de radiación en tres dimensiones (figura 65) y en dos dimensiones (figuras 66, 67 y 68).

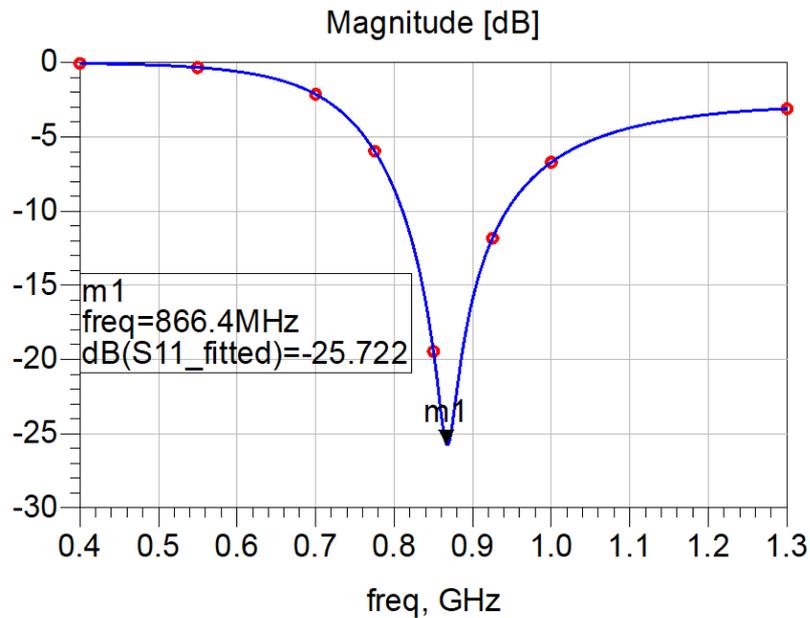


Figura 63. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena tipo dipolo

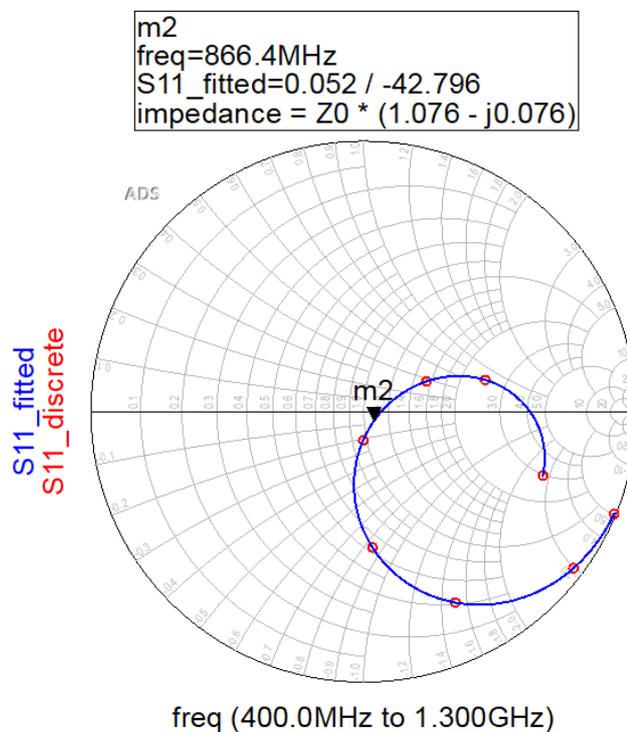


Figura 64. Impedancia de entrada en la carta Smith

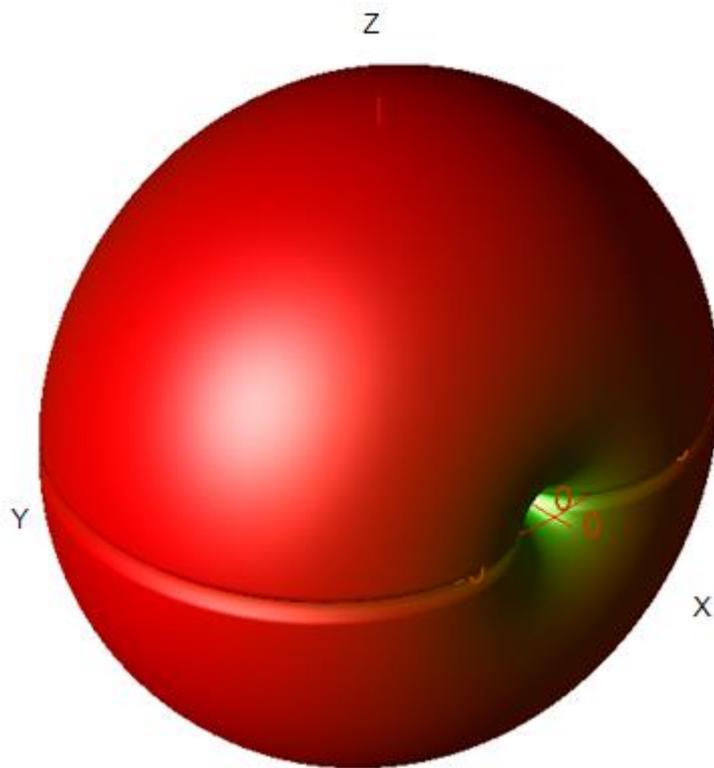


Figura 65. Diagrama de radiación de la antena propuesta

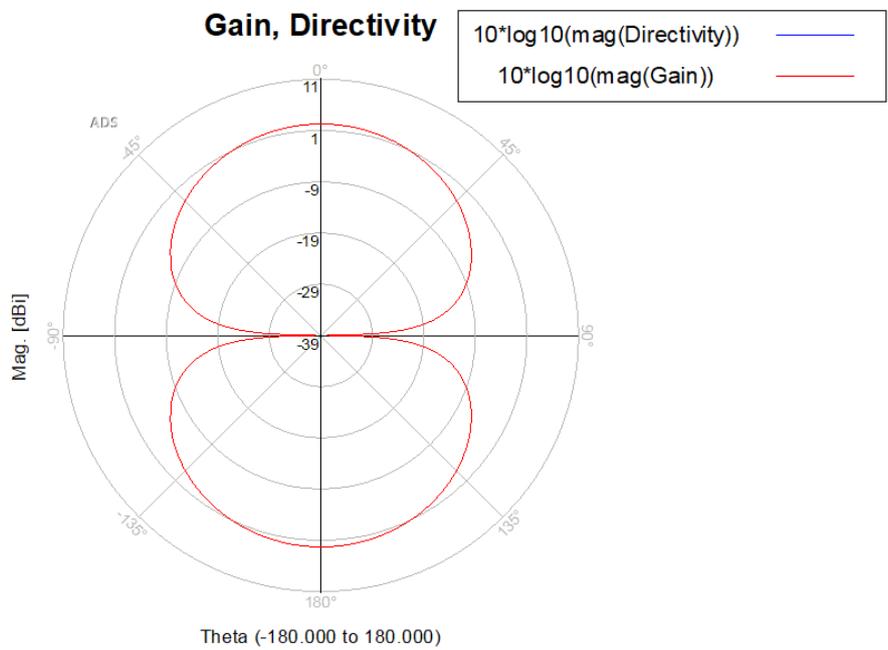


Figura 66. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena propuesta

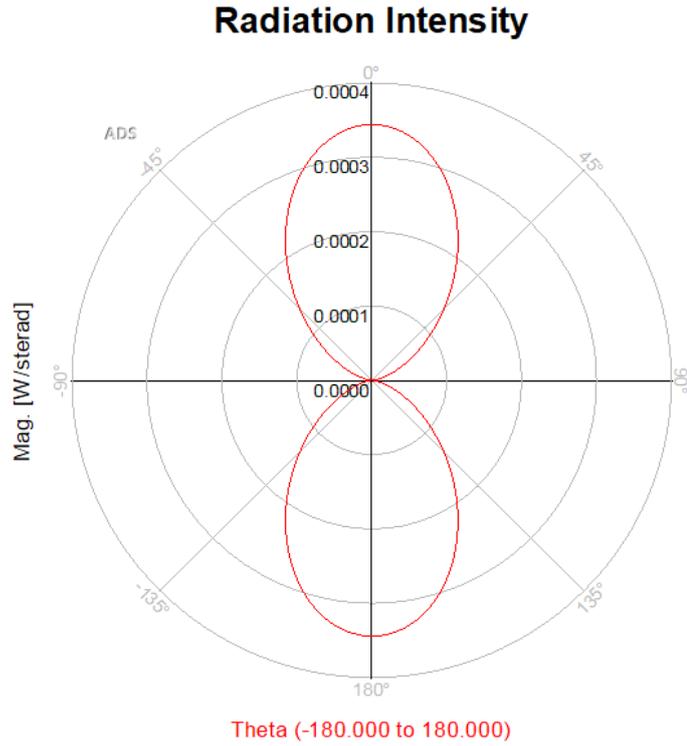


Figura 67. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena propuesta

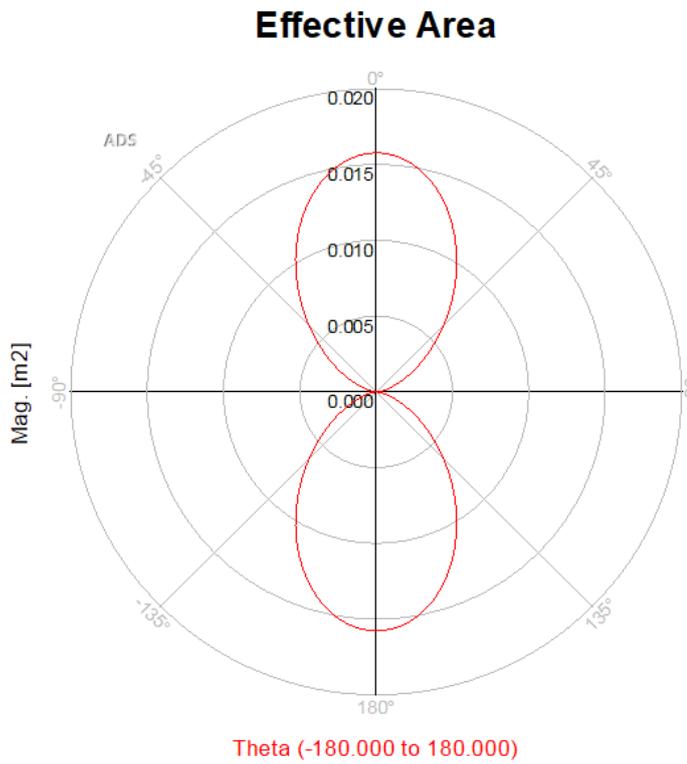


Figura 68. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena propuesta

5.3 Resultados

En este apartado se muestran los resultados de la simulación anterior. En primer lugar, mediante la figura 63 se observa que el parámetro S_{11} es igual a -25 dB. Mediante las figuras 65 y 66 se observan máximos en la potencia transmitida en las direcciones positivas y negativas de los ejes Z e Y mientras que, en el eje X aparecen los mínimos. Por lo tanto, esta antena es omnidireccional. En la figura 66 está representado el eje XZ donde se aprecian mejor los máximos del eje Z y los mínimos del eje X.

En las figuras 69 y 70 se muestran los parámetros más importantes:

Frequency (GHz)	0.8664
Input power (Watts)	0.00261684
Radiated power (Watts)	0.00261684
Directivity(dBi)	2.17767
Gain (dBi)	2.17767
Radiation efficiency (%)	100
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000343822
Effective angle (Steradians)	7.61103

Figura 69. Parámetros de la antena propuesta

Tal y como muestra la figura 69, esta antena opera a la frecuencia central de 866,4 MHz, tiene una directividad de 2,17 dBi, una ganancia de 2,17 dBi y una eficiencia de radiación del 100 %. La eficiencia es del 100 % dado que se trata de un diseño teórico y no se han considerado las pérdidas en la simulación para la frecuencia de operación. Estas pérdidas si están incluidas en el próximo apartado de optimización de la antena. Analizando de nuevo el parámetro S_{11} se observa que a -10 dB (en las antenas RFID se establece que una antena tiene un correcto funcionamiento a -10 dB o menos) las frecuencias son 930 MHz y 810 MHz. Es decir, entre esas frecuencias la antena opera de forma satisfactoria y, por lo tanto, su ancho de banda es de 120 MHz.

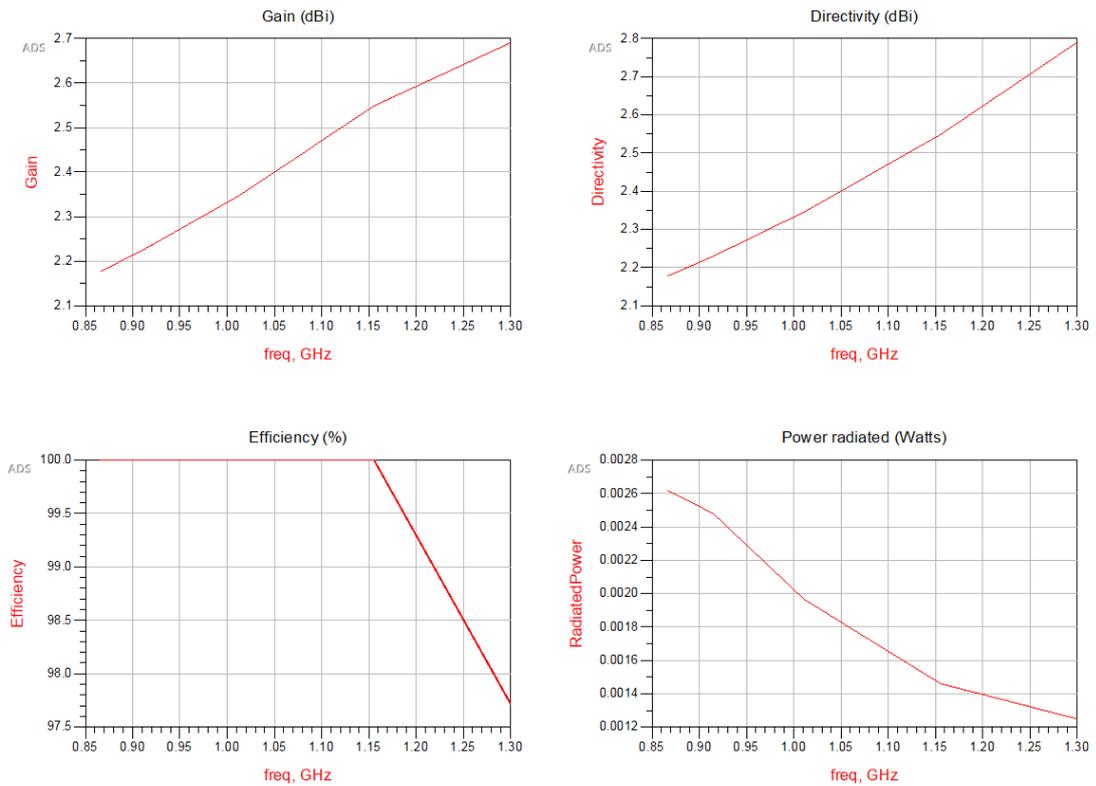


Figura 70. Representación gráfica de los parámetros de la antena propuesta

5.4 Conclusiones

En este apartado se resumen de forma breve los resultados obtenidos en este capítulo. En primer lugar, se ha propuesto una antena RFID UHF para usar con fines comerciales en la región de Europa. Esta antena, que opera a la frecuencia central de 866.4 MHz, está situada sobre sustrato de papel y tiene un tamaño de 160mm x 50 mm x 0.1 mm. Este tamaño es muy grande, aún, para utilizar comercialmente, pero con buenas prestaciones descritas en apartados anteriores y que se resumen a continuación. A la frecuencia central se ha obtenido una ganancia de 2.17 dBi, un coeficiente de reflexión de -25.72 dB y un ancho de banda de 120 MHz. Por lo tanto, el siguiente capítulo trata de optimizar la antena realizando un proceso de miniaturización sin perder prestaciones para un chip comercial concreto.

6. Optimización de la antena RFID sobre sustrato de papel

En el presente apartado se ha realizado un trabajo de optimización de la antena para adaptarla a la impedancia de un chip comercial concreto. Para ello, la antena se ha rediseñado y miniaturizado para obtener unos resultados óptimos. También, se analiza el rango de lectura de la antena propuesta.

6.1 Diseño

Del mismo modo que en el apartado anterior, esta antena opera en el rango de frecuencias de UHF para la región de Europa. Todas las características son como las del apartado anterior salvo las dimensiones. La antena se ha redimensionado cuyas nuevas dimensiones son 65mm x 20mm x 0.1mm.

La nueva geometría de la antena propuesta es la mostrada por la figura 71 con las dimensiones de la figura 72:

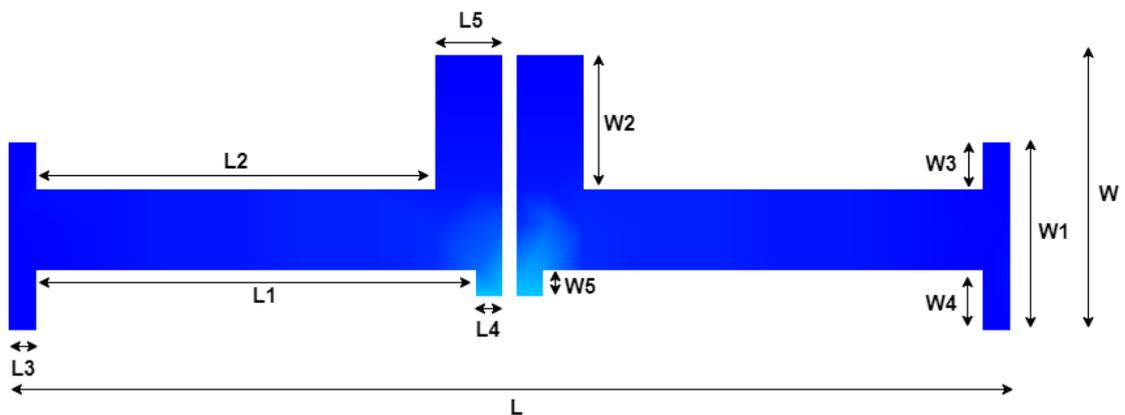


Figura 71. Geometría de la antena propuesta optimizada

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
L	60.5 mm	W	14.95 mm
L1	27 mm	W1	12.5 mm
L2	24.5 mm	W2	6 mm
L3	1.5 mm	W3	3.55 mm
L4	1.5 mm	W4	3.55 mm
L5	6 mm	W5	1.8 mm

Figura 72. Dimensiones de la antena propuesta optimizada

El sustrato es el mismo que el de la figura 61 con las mismas características. Por lo tanto, la antena optimizada con el chip es la que muestra la figura 73:

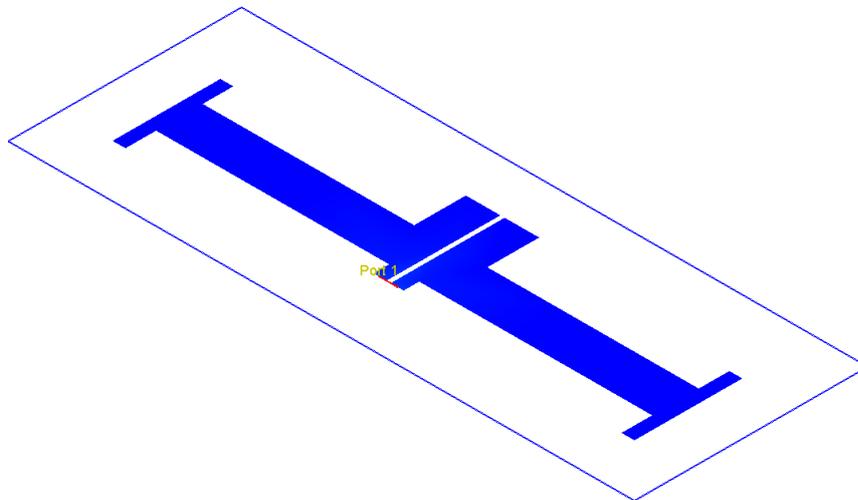


Figura 73. Diseño antena dipolo propuesta optimizada

Esta antena esta optimizada para un chip en concreto, este es el SL3S1204 del fabricante NXP Semiconductors [37]. Este chip tiene un tamaño de 0.490mm x 0.445mm, una impedancia de $14.5 - j293 \Omega$ para la frecuencia de operación de 866 MHz y está representado como “Port 1” en la figura 73. Este puerto está definido con la impedancia del chip. El criterio que se ha seguido para definir el puerto con esa impedancia es que, el puerto simule el chip estando directamente conectado con la antena. El puerto finalmente queda tal y como muestra la figura 74:

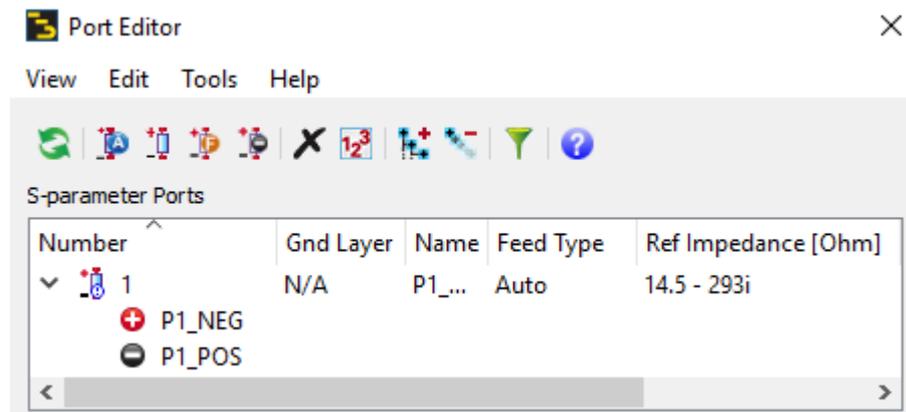


Figura 74. Configuración del puerto en ADS

6.2 Simulación

En este apartado, al igual que en apartados anteriores, se muestra la gráfica del parámetro S_{11} (figura 75), la impedancia de entrada en la carta Smith (figura 76), el diagrama de radiación en tres dimensiones (figura 77) y en dos dimensiones (figuras 78, 79 y 80).

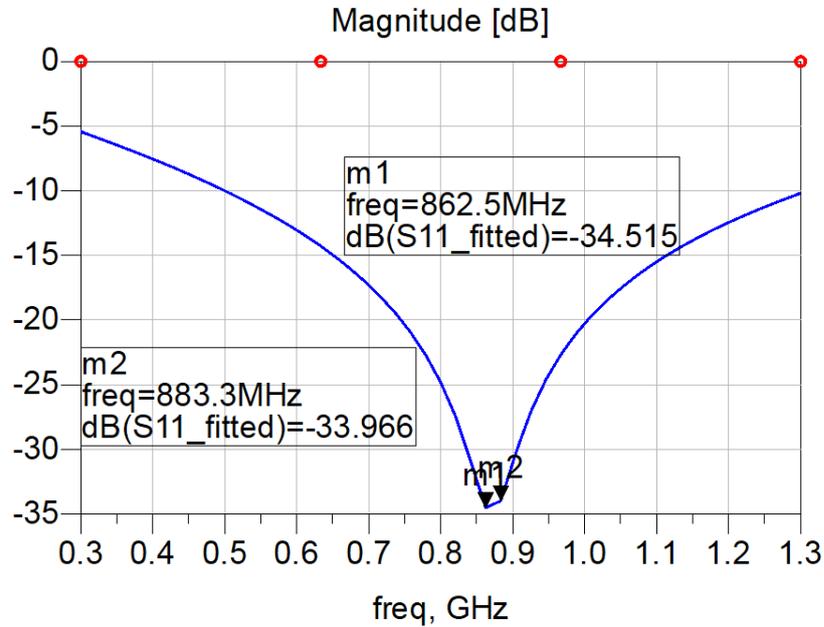


Figura 75. Gráfica del parámetro S_{11} de la antena propuesta optimizada

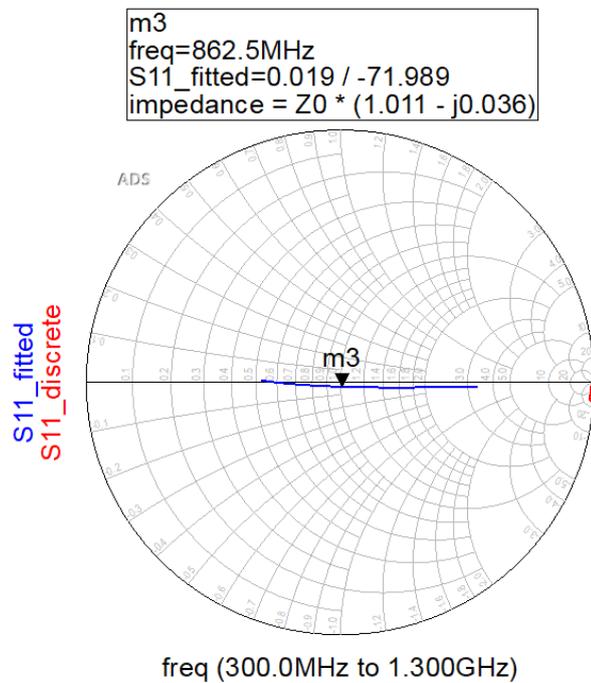


Figura 76. Impedancia de entrada en la carta Smith

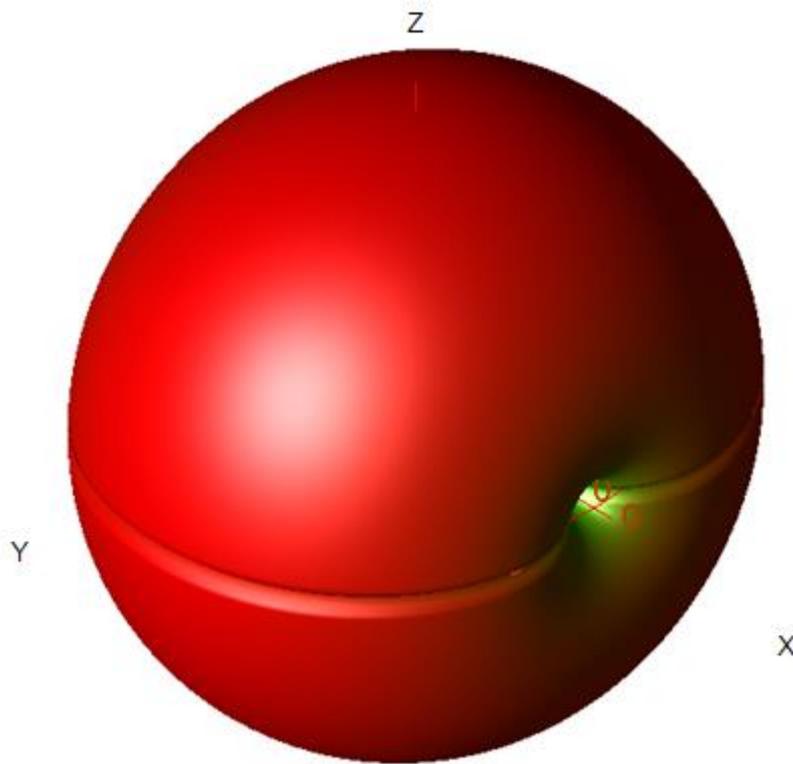


Figura 77. Diagrama de radiación de la antena propuesta optimizada

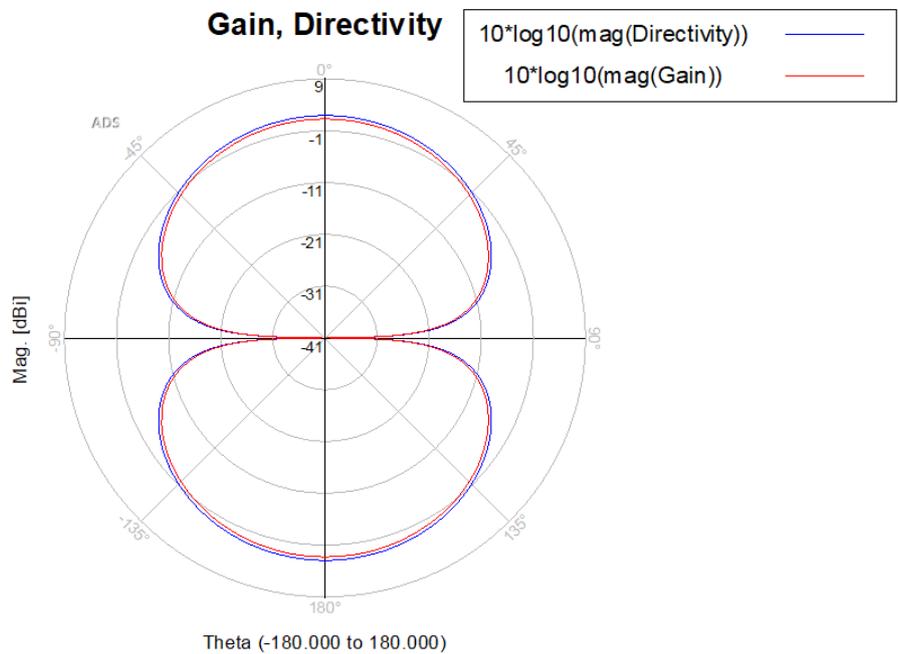
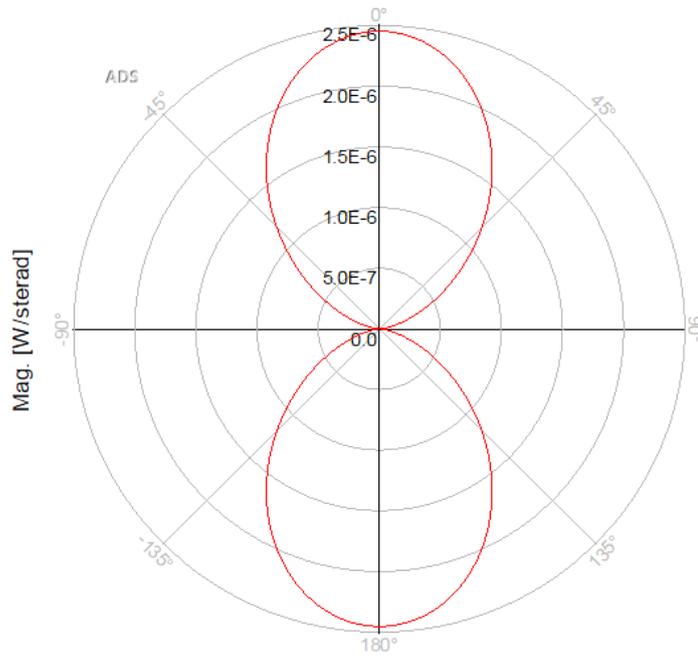


Figura 78. Diagrama de radiación de la ganancia y directividad de la antena propuesta optimizada

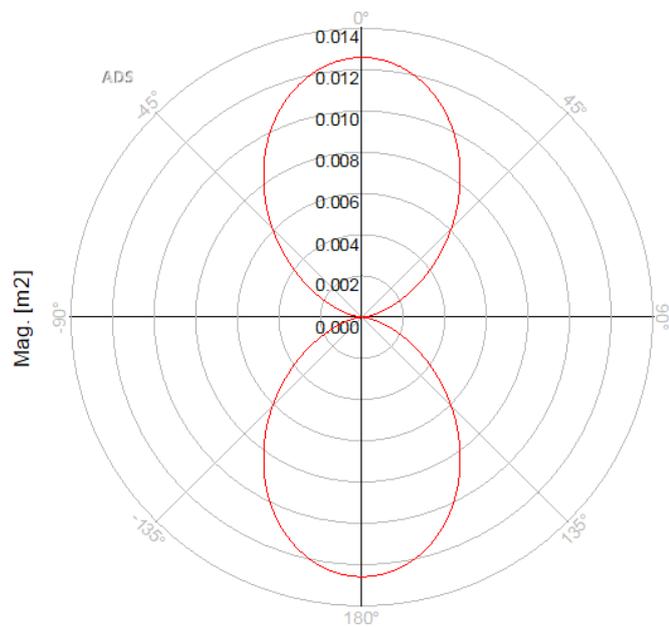
Radiation Intensity



Theta (-180.000 to 180.000)

Figura 79. Diagrama de radiación de la intensidad de la antena propuesta optimizada

Effective Area



Theta (-180.000 to 180.000)

Figura 80. Diagrama de radiación del área efectiva de la antena propuesta optimizada

6.3 Resultados

En este apartado, al igual que el capítulo anterior, se muestran los resultados de la simulación. En primer lugar, mediante la figura 75 se observa que el parámetro S_{11} aproximadamente -34 dB. Mediante las figuras 77 y 78 se observan máximos en la potencia transmitida en las direcciones positivas y negativas de los ejes Z e Y mientras que, en el eje X aparecen los mínimos. Por lo tanto, esta antena es omnidireccional. Estos resultados son los esperados ya que son coherentes con la simulación del capítulo anterior.

En las figuras 81 y 80 se muestran los parámetros más importantes:

Frequency (GHz)	0.8664
Input power (Watts)	2.33661e-05
Radiated power (Watts)	2.00959e-05
Directivity(dBi)	1.8477
Gain (dBi)	1.19293
Radiation efficiency (%)	86.0048
Maximum intensity (Watts/Steradian)	2.4472e-06
Effective angle (Steradians)	8.21182

Figura 81. Parámetros de la antena propuesta optimizada

Tal y como muestra la figura 81, esta antena opera a la frecuencia central de 866,4 MHz, tiene una directividad de 1,84 dBi, una ganancia de 1,19 dBi y una eficiencia de radiación del 86 %. La eficiencia en este caso si incluye las perdidas. Con todo y con eso, se consigue una buena eficiencia. Analizando de nuevo el parámetro S_{11} se observa que a -10 dB (en las antenas RFID se establece que una antena tiene un correcto funcionamiento a -10 dB o menos) las frecuencias son 500 MHz y 1300 MHz. Es decir, entre esas frecuencias la antena opera de forma satisfactoria y, por lo tanto, su ancho de banda es de 800 MHz.

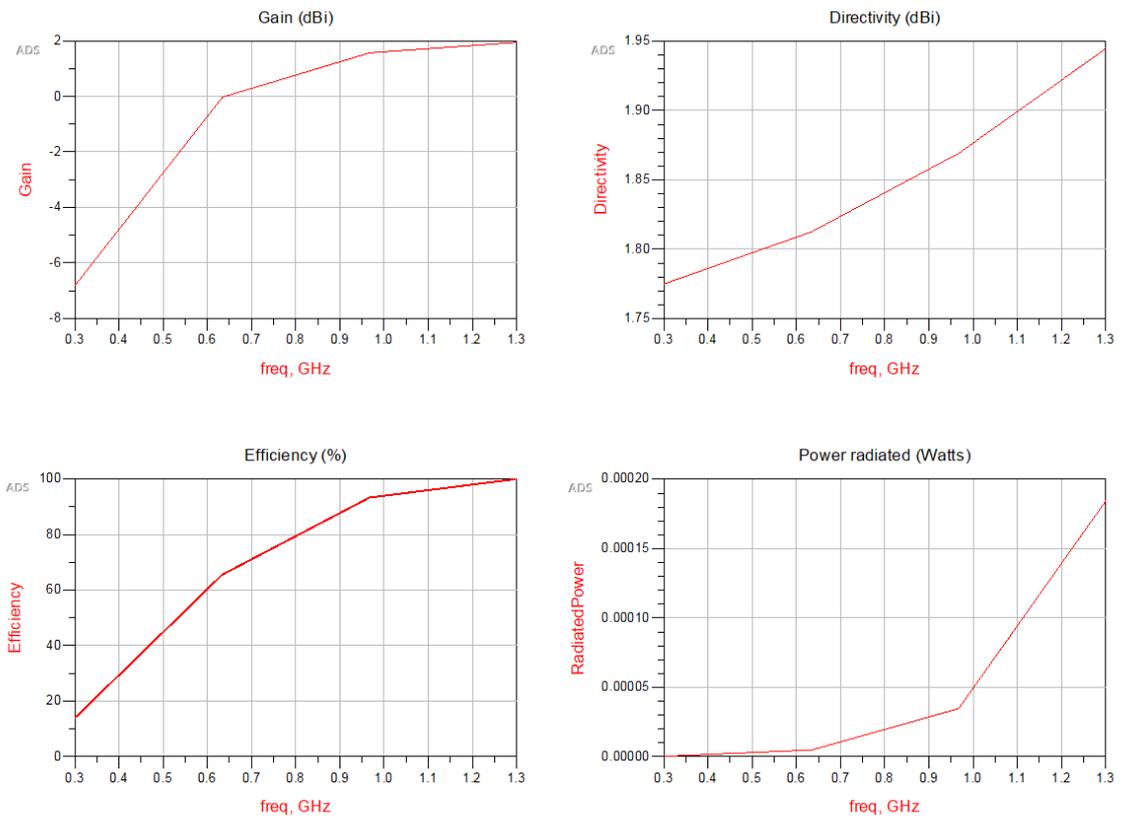


Figura 82. Representación gráfica de los parámetros de la antena propuesta optimizada

6.4 Rango de lectura

Para calcular el rango de lectura es necesario utilizar un lector RFID como el que muestra la figura 83 [38]. Este lector funciona en el rango de frecuencias de 865-868 MHz, con una potencia de 30 dBm a una impedancia de carga de 50 Ω . Por último, la ganancia de la antena de este lector es de 2,5 dBiC (especificaciones técnicas en el anexo 10.2).



Figura 83. Lector RFID Kathrein MIRA-100-circular-ETSI [38]

Para calcular la longitud máxima de lectura se ha utilizado el valor máximo de potencia del lector, es decir, 30 dBm. Finalmente, la potencia mínima para activar la etiqueta es de -21 dBm. Con estos valores y mediante la fórmula 13 se obtiene un alcance máximo de lectura de 15,76 m. Este valor resulta un poco alto dado que no se han considerado las pérdidas de polarización o los efectos de la propagación multicamino, por ejemplo.

$$R_{forward} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{TX} G_r G_{tag} \tau}{P_{min,tag}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4\pi} \sqrt{\frac{1 \cdot 1.77 \cdot 1.31}{0.007943 \cdot 10^{-3}}} = 15,76 \text{ m}$$

6.5 Conclusiones

En este apartado, se ha realizado una profunda adaptación de la antena propuesta en el apartado anterior. Esta adaptación ha sido realizada para un chip en concreto con una impedancia de $14.5 -j293 \Omega$ para la frecuencia de 866 MHz y unas dimensiones físicas de 0.490mm x 0.445mm.

Se ha conseguido reducir el tamaño de la antena a más de la mitad hasta los 65mm x 20mm x 0.1mm manteniendo unos valores óptimos de funcionamiento. Se han obtenido un coeficiente de reflexión de -32.5 dB y una ganancia de 1.19 dBi con una eficiencia de radiación del 86 %.

Como punto negativo, cabe destacar en amplio ancho de banda obtenido que es de 800 MHz.

Por último, se ha logrado un alcance máximo de 15,76 metros, un valor típico en las etiquetas RFID UHF donde no se han considerado las pérdidas de polarización o la propagación multicamino.

7. Conclusiones

Este trabajo de fin de grado se enmarca en la tecnología RFID con especial énfasis en el diseño de antenas. Para este propósito se han analizado varias antenas con distintas topologías y frecuencias de operación. Después de este profundo análisis, se ha realizado un diseño propio de una antena RFID UHF para el rango de frecuencias europeas. Con ello, a continuación, se resumen los objetivos del punto 1.2 aportando una breve valoración si se han logrado o no:

- Estudiar el estado del arte en técnicas RFID como sustratos flexibles.
- Determinar reglas de diseño de antenas a nivel de layout.
- Familiarizarse con herramientas de simulación.
- Diseñar una antena RFID sobre papel mediante Momentum.
- Optimizar la antena mediante rediseño paramétrico.

Los objetivos propuestos se han logrado en su gran mayoría. A lo largo de este trabajo se ha aportado una completa revisión de la tecnología RFID, los parámetros más importantes a analizar en las antenas, se ha logrado también un alto manejo del software de simulación ADS y se ha diseñado una antena RFID sobre sustrato de papel. Por otro lado, se ha logrado una optimización de la antena, pero no al completo dado que el ancho de banda es bastante alto.

7.1 Líneas futuras

El presente trabajo está centrado en el diseño y simulación de una antena propia mediante software específico. Si bien esto es lo más importante a la hora de afrontar un proceso como este, no deja de ser el primer paso. En este trabajo no se ha podido abordar lo siguiente:

- Reducción del ancho de banda de la antena.
- Fabricación de la antena.
- Realización de pruebas experimentales en un laboratorio.
- Realización de pruebas en entornos reales.

Por ejemplo, los mismos parámetros analizados como el coeficiente de reflexión o el rango de lectura deberían analizarse en un laboratorio.

Una vez realizadas dichas pruebas, estas etiquetas podrían ser colocadas en los artículos disponibles en un almacén para hacer un seguimiento y un control eficiente del stock.

8. Glosario

- 5G: Quinta generación de tecnologías de telefonía móvil
- ADS: Advanced Design System, software de diseño electrónico de Keysight Technologies
- CEPT: Conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications, organismo internacional que agrupa a las entidades responsables en la administración pública de cada país europeo de las políticas y la regulación de las comunicaciones, tanto postales como de telecomunicaciones.
- ERP: Effective Radiated Power, potencia efectiva emitida en el lóbulo principal de una antena transmisora relativa a la directividad máxima de una antena dipolo de media onda.
- ETSI: European Telecommunications Standards Institute, organización de estandarización independiente, sin fines de lucro de la industria de las telecomunicaciones de Europa.
- FBR: relación delante-atrás, cociente entre el valor de máxima radiación y el de la misma dirección y sentido opuesto.
- FCC: Federal Communications Commission, agencia estatal encargada de la regulación de telecomunicaciones.
- HF: High Frequency, rango de frecuencias entre 3 MHz y 30 MHz.
- LF: Low Frequency, rango de frecuencias entre 30 kHz y 300 kHz.
- EIRP: Effective Isotropic Radiated Power, potencia efectiva emitida en el lóbulo principal de una antena transmisora relativa a un radiador isotrópico que tiene 0 dB de ganancia.
- RFID: Radio Frequency Identification, sistema de almacenamiento y recuperación de datos remoto que usa dispositivos denominados etiquetas.
- ROE: Relación de Onda Estacionaria, razón geométrica existente entre el valor máximo y el calor mínimo de la amplitud de voltaje observado en una condición de onda estacionaria eléctrica.
- SHF: Super High Frequency, rango de frecuencias entre 3 GHz y 30 GHz.
- UHF: Ultra High Frequency, rango de frecuencias entre 300 MHz y 3000 MHz.

9. Bibliografía

1. Título: Bandas de frecuencias de telefonía móvil
Fecha de consulta: octubre, 2019
Fuente:
https://wiki.bandaancho.st/Frecuencias_telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil
2. Título: What is RFID?
Autor: Bob Violino
Fecha de publicación: 16 enero 2005
Fuente de información: <https://www.rfidjournal.com/articles/view?1339>
3. Título: ¿Cómo comenzó la tecnología RFID?
Autor: Trace ID (fabricante)
Fecha de publicación: 26 septiembre 2017
Fuente de información: <http://trace-id.com/es/comenzo-la-tecnologia-rfid/>
4. Título: Communication by Means of Reflected Power
Autor: H. Stockman
Fecha de publicación: octubre 1948
Fuente de información: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1697527>
5. Fabricante: Kimaldi
Fecha de consulta: 9 de octubre, 2019
Enlace:
https://www.kimaldi.com/productos/sistemas_rfid/lector_de_tarjetas_rfid_y_tags_13_56_mhz/pulseras_y_llaveros_rfid_de_13_56_mhz/pulsera_rfid_elypse_de_silicona/
6. Fabricante: akrocard
Fecha de consulta: 9 de octubre, 2019
Enlace: <https://akrocard.com/producto/tarjeta-proximidad-rfid-a-1356mhz/>
7. Fabricante: NextPoints
Fecha de consulta: 9 de octubre, 2019
Enlace: <https://nextpoints.com/es/productos-rfid/etiquetas-rfid/etiquetas-rfid-smartrac-r6r4/>
8. Título: An Enhanced Chipless RFID System in 60 GHz Using Pattern Recognition Techniques
Autor: Larry M. Arjomandi, Nemai C. Karmakar
Fecha de publicación: 22 noviembre, 2018
Fuente de información:
<https://0-ieeeexplore-ieee-org.cataleg.uoc.edu/document/8541656>

9. Fabricante: Kimaldi
Fecha de consulta: 9 de octubre, 2019
Enlace: https://www.kimaldi.com/productos/sistemas_rfid/lector_de_tarjetas_rfid_y_tags_activos/tags_rfid_activos/tag_rfid_activo_sytag245_2f5/
10. Título: Tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID): aplicaciones en el ámbito de la salud
Autor: Javier I. Portillo García, Ana Belén Bermejo Nieto, Ana M. Bernardos Barbolla
Fecha de publicación: 2008
Fuente de información: https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT13_RFID.pdf
11. Organización: Internationa Organization for Standardization (ISO)
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.iso.org/home.html>
12. Organización: International Electrotechnical Commision (IEC)
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.iec.ch/>
13. Organización: ASTM International
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.astm.org/>
14. Organización: EPCglobal
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.gs1.org/epcglobal>
15. Organización: European Telecommunications Standars Institute (ETSI)
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.etsi.org/>
16. Título: Radio-frecuency identification
Autor: Wikipedia contributors
Fecha de publicación: 2019
Fuente de información: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio-frequency_identification#Regulation_and_standardization
17. Fabricante: Televés
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.televes.com/es/14892x-ellipse700-antena-ellipse.html>

18. Fuente: RC TECNIC
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.rctecnic.com/fpv/antena-polarizada-circular-24ghz-para-emisor-fpv-rp-sma>
19. Fuente: Radio Comunicaciones
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <http://www.radiocomunicaciones.net/antenas-omnidireccionales/36-antena-omnidireccional-rbc2455-5g.html>
20. Fuente: OSCARO
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.oscaro.es/tallo-recambio-antena-10566-gu>
21. Fuente: Planeta Do Radio
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://planetadoradio.com/radio/antena-dipolo-fm-2-elementos/>
22. Fuente: telescopios.org
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: http://www.telescopios.org/very_large_array.html
23. Título: Design of an UHF RFID Tag Antenna with a Paper Substrate
Autor: Xiao Jia Huang, Shi Cong Wang, Feng Xie, Mei Song Tong
Fecha de publicación: 14 enero, 2019
Fuente de información:
<https://0-ieeeexplore-ieee-org.cataleg.uoc.edu/document/8609257>
24. Título: Design and fabrication of RFID antenna tag using paper substrate for low-cost RFID applications
Autor: Iswarya. A, B. Priyalakshmi
Fecha de publicación: 4 mayo, 2017
Fuente de información:
<https://0-ieeeexplore-ieee-org.cataleg.uoc.edu/document/7916716>
25. Fuente: XMinnov
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <http://www.rfidtagdevelop.com/network/rfid-tag5/non-transfer-converter-rfid-tag.html>
26. Título: Inkjet-printed RF energy harvesting and Wireless power transmission devices on paper substrate
Autor: Sangkil Kim, Rushi Vyas, Apostolos Georgiadis, Ana Collado, Manos M. Tentzeris
Fecha de publicación: 23 diciembre, 2013
Fuente de información:
<https://0-ieeeexplore-ieee-org.cataleg.uoc.edu/document/6686824>

27. Título: Conductive Inkjet-Printed Antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WSN Application
Autor: Amin Rida, Li Yang, Rushi Vyas, Manos M. Tentzeris
Fecha de publicación: 18 septiembre, 2009
Fuente de información:
<https://0-ieeeexplore-ieee-org.catalog.uoc.edu/document/5251188>
28. Fabricante: FUJIFILM
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace:
https://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/depositi-on-products/dmp-2800/index.html
29. Título: La antena en un sistema de telecomunicación
Autor: Aurora Andújar Linares
Fecha de publicación: 2018
Fuente de información: Apuntes de la asignatura Antenas, Oberta UOC Publishing, SL
30. Organismo: European Conference of Postal And Telecommunications Administrations
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://cept.org>
31. Organismo: Federal Communications Commission
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <https://www.fcc.gov>
32. Fuente: HyperPhysics
Fecha de consulta: 1 noviembre, 2019
Enlace: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polclas.html>
33. Fuente: todoantenas
Fecha de consulta: 9 octubre, 2019
Enlace: <http://todoantenas.weebly.com/diagrama-de-radiacioacuten.html>
34. Título: Inkjet Printed Paper Based Quadrate Bowtie Antennas For UHF RFID Tags
Autores: Yasar Amin, Satu Prokkola, Botao Shao, Julius Hallstedt, Hannu Tenhunen, Li-Rong Zheng
Fecha de publicación: febrero, 2009
Fuente de información:
<https://0-ieeeexplore-ieee-org.catalog.uoc.edu/document/4809913>
35. Título: Disseny de components de micrones passius en paper
Autor: Alejandro Cabot Contreras
Fecha de publicación: junio, 2019
Fuente de información: <http://hdl.handle.net/10609/96927>

36. Título: Embroidery manufacturing techniques for textile dipole antenna applied to wireless body area network
Autor: Ignacio Gil, Raul Fernández-García, José Antonio Tornero
Fecha de publicación: abril, 2019
Fuente de información: <https://doi.org/10.1177/0040517518770682>
37. Nombre: SL3S1204
Fabricante: NXP Semiconductors N.V.
Fecha de consulta: diciembre, 2019
Fuente: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/SL3S1204.pdf>
38. Nombre: Kathrein MIRA-100-circular-ETSI
Fabricante: Cisper Electronics B.V.
Fecha de consulta: diciembre, 2019
Fuente:
<https://www.cisper.nl/en/kathrein-mira-100-circular-etsi-mid-range-antenna-2-5-dbic-circular-tnc-socket-etsi>

10. Anexos

10.1 Presupuesto

En este apartado se incluyen los precios de todos los recursos utilizados para la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

UNIDADES	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	SUBTOTAL
h	Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones	300	65,00	19500,00
u	Ordenador portátil con Windows	1	600,00	600,00
u	Licencia ADS Keysight para universidad	1	2500,00	2500,00
u	Licencia Office 365	1	149,00	149,00
u	Gantt PRO	1	15	15
u	Monitor 23,5"	1	92,99	92,99
		SUBTOTAL		24197,99
IVA		1	21%	5081,58
		TOTAL		29279,57

10.2 Especificaciones técnicas Kathrein MIRA-100-circular-ETSI

Mid Range RFID UHF Antenna | Page 1 of 2
MIRA Circular Antenna Unit

KATHREIN

Features

- Compact design and small dimensions
- Typical read range*: up to 2 m (* depending on tag properties, environment and requirements)
- Various transponder types possible to use
- Integration possible in applications where space is limited
- Use in transition range between near field and far field application
- Suitable for use in industrial environments, suitable for bulk and single tag applications
- High IP67 degree of protection, suitable for outdoor use



General specifications

Order No.		52010082	52010083
Type		MIRA-100-circular-ETSI	MIRA-100-circular-FCC
Frequency range	[MHz]	865-868	902-928
©KRAI			-
Polarization		circular	circular
Antenna gain	[dBiC]	2.5 (at 866 MHz)	2.5 (at 915 MHz)
Axial ratio	[dB]	typ. 1.5	typ. 2.5
VSWR		typ. 1.3:1	typ. 1.5:1
Front-to-back ratio	[dB]	typ. 10	> 10
Impedance antennaport	[Ohm]		50
Max. input power	[dBm]	-	+30 (at antenna port) (FCC15.247)
Max. radiated power	[dBm]	+30 e.r.p. (ETSI EN 302 208)	-
Far field half-power beam width (if mounted like picture)	[°]		100
Connection			TNC female
Weight	[kg]		0.32
Degree of protection			IP67
Operating temperature range	[°C]		-20 to +55
Storage temperature range	[°C]		-40 to +85
Dimensions (L x W x H)	[mm]		156 x 143.8 x 36
Packing size (L x W x H)	[mm]		approx. 230 x 160 x 81
Material			
	Antenna cover		tough, weather-resistant polymer blend, colour: RAL7045

Remarks

Mounting options

- Four through-holes Ø 4.2 mm for M4 screws

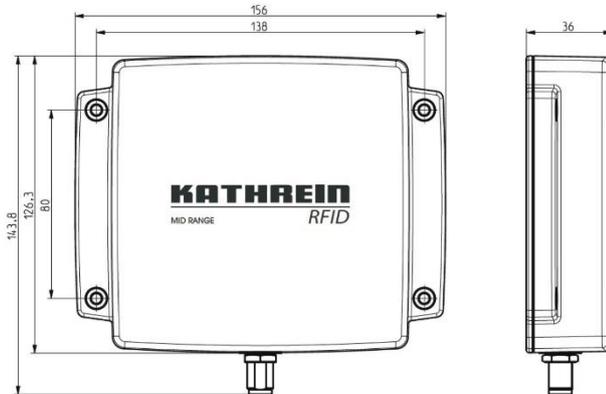
Accessories optional

- All accessories can be found at: <https://http://www.kathrein-solutions.com/products/hardware/accessories>

939E116A | Subject to changes
date of creation: 28.08.2011

Kathrein Solutions GmbH, Kronstaudener Weg 1, 83071 Stephanskirchen, Germany
Phone: +49 8036 90831 20 | Fax: +49 8036 90831 69
www.kathrein-solutions.com

➤ **Dimensions [mm]**



Description

The mid-range antenna (MIRA) was developed for applications in range between the near and far field. The focus of the compact design was for integration in space-critical applications. Reading distances of up to 5 m are still possible with dimensions of 143.8 x 156 mm. In this case, however, the reading range is very wide.

In most cases the MIRA is used for reading distances up to 2 m, for which it features sufficient selectivity. Therefore, this antenna design is especially suitable for applications in the so-called transition area with different tag types.

Key Application

Logistics applications: installing to corridor conveyor vehicles

Materials handling applications

Gate applications for goods registration

Bulk and single tag applications

Access systems (e.g. ski lifts, control systems for tickets)

