

# Análisis y Simulación de Antenas para dispositivos IoT en la Banda ISM de 2.4 GHz

UOC

**Katya Mañez Marquina**

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación  
Tecnologías de Antenas.

**Dr. Jaume Anguera Pros**

**Dra. Aurora Andújar Linares**

**Dr. Germán Cobo Rodríguez**

24 de Junio de 2024

Universitat Oberta  
de Catalunya

---



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/)

## **Dedicatoria**

*A las estrellas que iluminan mi camino: Javi, Fran y Mara.*

## **Agradecimientos**

*A mis tutores el Doctor Jaume Anguera y la Doctora Aurora Andújar su brillante orientación y coherencia a lo largo de todo el trabajo.*

*Gracias a sus excelentes consejos hemos logrado dar forma a este proyecto.*

## FICHA DEL TRABAJO FINAL

<b>Título del trabajo:</b>	<i>Análisis y Simulación de Antenas para dispositivos IoT en la Banda ISM de 2.4 GHz</i>
<b>Nombre del autor:</b>	<i>Katya Máñez Marquina</i>
<b>Nombre del consultor/a:</b>	<i>Jaume Anguera Pros, Aurora Andújar Linares</i>
<b>Nombre del PRA:</b>	<i>Germán Cobo Rodríguez</i>
<b>Fecha de entrega (mm/aaaa):</b>	<i>06/2024</i>
<b>Titulación o programa:</b>	<i>Máster Ingeniería de Telecomunicación</i>
<b>Área del Trabajo Final:</b>	<i>Tecnologías de Antenas</i>
<b>Idioma del trabajo:</b>	<i>Castellano</i>
<b>Palabras clave</b>	<i>IoT, Antena, Matlab, CST, Simulación</i>

### Resumen del Trabajo

Internet de las Cosas (IoT) ha evolucionado desde la simple conexión de dispositivos a Internet para la comunicación y el intercambio de datos de forma remota, hasta la interconexión de dispositivos cotidianos, transformándolos en dispositivos inteligentes capaces de ser monitorizados y controlados remotamente. Este avance mejora la calidad de vida en ámbitos como el hogar, la industria y la salud. No obstante, esta rápida evolución exige que el diseño de antenas específicas para cada aplicación sea eficiente y ágil.

En el presente trabajo se realiza el diseño y análisis de una antena impresa con forma de meandro serpenteante para la banda industrial, científica y médica (ISM) de 2.4GHz con el fin de analizar la reusabilidad del dispositivo según su tamaño.

En estudios previos, se ha utilizado la herramienta *CST Studio Suite Learning Edition* para la automatización de simulaciones mediante macros. En este trabajo, además, se ha implementado la integración de CST con Matlab para optimizar el tiempo de diseño y análisis de datos.

El diseño de la antena se realiza utilizando el software CST y, gracias a la integración implementada con Matlab, se facilita el estudio de la reusabilidad. Dicho estudio se realizará de forma gráfica mediante un Mapa de Calor que representará el peor valor de  $S_{11}$  obtenido para cada plano de masa.

Adicionalmente, se diseña una antena *Booster* en CST mediante la integración con Matlab y se simula para evaluar su comportamiento.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos de la antena diseñada con antenas comerciales como la *Antenna Booster* y la Antena Espiral, para evaluar su desempeño en términos de ancho de banda, reusabilidad y eficiencia total.

## Abstract

The Internet of Things (IoT) has evolved from the simple connection of devices to the Internet for remote communication and data exchange, to the interconnection of everyday devices, transforming them into intelligent devices capable of being remotely monitored and controlled. This progress improves the quality of life in areas such as the home, industry and healthcare. However, this rapid evolution requires the design of specific antennas for each application to be efficient and agile.

In the present work, the design and analysis of a printed meander antenna for the 2.4GHz industrial, scientific and medical (ISM) band is carried out in order to analyze the reusability of the device according to its size.

In previous studies, the CST Studio Suite Learning Edition tool has been used to automate simulations using macros. In this work, in addition, the integration of CST with Matlab has been implemented to optimize the design time and data analysis.

The antenna design is performed using the CST software and, thanks to the integration implemented with Matlab, the reusability study is facilitated. Such study will be performed graphically by means of a heat map representing the worst  $S_{11}$  value obtained for each mass plane.

Additionally, a Booster antenna is designed in CST by integration with Matlab and simulated to evaluate its behavior.

Finally, the results obtained from the designed antenna are compared with commercial antennas such as the Antenna Booster and the Spiral Antenna, to evaluate their performance in terms of bandwidth, reusability and overall efficiency.

# Índice

1.	Introducción .....	7
1.1.	Contexto y justificación del Trabajo .....	7
1.2.	Objetivos del Trabajo.....	8
1.3.	Enfoque y método seguido.....	9
1.4.	Planificación del Trabajo.....	10
1.5.	Breve resumen de productos obtenidos .....	12
1.6.	Breve descripción de los otros capítulos de la memoria .....	12
2.	Estado del Arte .....	14
2.1	Introducción .....	14
2.2	Internet de las Cosas en la banda de 2.4 GHz .....	14
2.3	Parámetros de antenas .....	16
2.4	Antena Booster.....	22
2.5	Otros tipos de antenas para IoT .....	28
3.	Diseño antenas meandro y reusabilidad .....	35
3.1.	Enfoque de la solución .....	35
3.2.	Elección del tipo de antena a diseñar en CST y justificación.....	35
3.3.	Breves notas de uso de CST .....	35
3.4.	Diseño de la antena meandro .....	42
3.5.	Diseño final .....	60
3.6.	Automatización de simulaciones con macros CST .....	62
3.7.	Obtención Mapa Calor a partir de fichero exportado de CST .....	64
3.8.	Estudio de la reusabilidad .....	65
3.9.	Diseño final 2 .....	70
3.10.	Comparativa del ancho de banda con otras antenas.....	72
3.11.	Comparativa de la reusabilidad con otras antenas .....	73
3.12.	Conclusiones del capítulo .....	73
4.	Automatización con Matlab .....	74
4.1.	Reusabilidad distintos planos de masa con Matlab .....	74
4.2.	Diseño antena Booster con Matlab.....	78
4.3.	Conclusiones del capítulo .....	80
5.	Conclusiones y trabajos futuros .....	81
6.	Glosario.....	83
7.	Bibliografía.....	84
8.	Anexo I.....	86

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Planificación del proyecto .....	11
<b>Figura 2.</b> Internet of things.....	15
<b>Figura 3.</b> Curva del coeficiente de reflexión $S_{11}$ .....	19
<b>Figura 4.</b> Eficiencia de radiación y total .....	20
<b>Figura 5.</b> Carta de Smith .....	21
<b>Figura 6.</b> Antena Booster.....	22
<b>Figura 7.</b> Impedancia antena Booster sin red de adaptación .....	23
<b>Figura 8.</b> Red de adaptación para antena Booster.....	23
<b>Figura 9.</b> $S_{11}$ simulado de la antena Booster con red de adaptación.....	24
<b>Figura 10.</b> Diferentes tamaños planos de masa.....	24
<b>Figura 11.</b> Mapa de Calor antena Booster .....	25
<b>Figura 12.</b> Antena monopolo espiral (a) y Antena Booster (b) .....	26
<b>Figura 13.</b> Antena Booster vs Monopolo espiral: a) Impedancia de entrada b) $S_{11}$ .....	26
<b>Figura 14.</b> Antena PIFA .....	28
<b>Figura 15.</b> Antena con línea serpenteante y tira de cortocircuito .....	28
<b>Figura 16.</b> $S_{11}$ simulado y medido PIFA.....	29
<b>Figura 17.</b> Comparación entre las antenas PIFA, Walsin y Murata .....	29
<b>Figura 18.</b> Antena PIFA de banda única .....	30
<b>Figura 19.</b> Coeficiente de reflexión de antena PIFA.....	30
<b>Figura 20.</b> Estructura de la PIFA de doble banda optimizada .....	31
<b>Figura 21.</b> Coeficiente de reflexión (a) y eficiencia de radiación (b).....	31
<b>Figura 22.</b> Ancho de Banda y eficiencia de radiación PIFA optimizada .....	31
<b>Figura 23.</b> Geometría parche microstrip meandro .....	32
<b>Figura 24.</b> Coeficiente reflexión simulado (a) y Eficiencia y ganancia (b).....	32
<b>Figura 25.</b> Análisis paramétrico para diferentes tamaños de plano de masa.....	33
<b>Figura 26.</b> Análisis para distintos planos de masa.....	33
<b>Figura 27.</b> Antena meandro WLAN .....	34
<b>Figura 28.</b> Coeficiente de reflexión .....	34
<b>Figura 29.</b> CST Create Template .....	36
<b>Figura 30.</b> CST Workflow .....	36
<b>Figura 31.</b> CST Time Domain.....	37
<b>Figura 32.</b> CST Select Units .....	37
<b>Figura 33.</b> CST Settings .....	37
<b>Figura 34.</b> CST Brick .....	38
<b>Figura 35.</b> CST Brick dimensions.....	38
<b>Figura 36.</b> CST Define Parameter .....	39
<b>Figura 37.</b> CST Load from Material Library.....	39
<b>Figura 38.</b> CST Select Material.....	40
<b>Figura 39.</b> CST Substrato .....	40
<b>Figura 40.</b> CST Local WCS .....	41
<b>Figura 41.</b> CST Picks .....	41
<b>Figura 42.</b> Diseño preliminar meandro .....	42
<b>Figura 43.</b> $S_{11}$ diseño preliminar meandro .....	43
<b>Figura 44.</b> Eficiencias diseño preliminar meandro .....	43
<b>Figura 45.</b> Carta Smith diseño preliminar meandro .....	43

<b>Figura 46.</b> Diseño modificado 1.....	44
<b>Figura 47.</b> $S_{11}$ Diseño modificado 1 .....	44
<b>Figura 48.</b> Eficiencia radiación y total diseño modificado 1.....	45
<b>Figura 49.</b> Carta Smith diseño modificado 1 .....	45
<b>Figura 50.</b> Diseño modificado 2.....	46
<b>Figura 51.</b> $S_{11}$ Diseño modificado 2 .....	46
<b>Figura 52.</b> Eficiencia radiación y total diseño modificado 2.....	47
<b>Figura 53.</b> Carta Smith diseño modificado 2 .....	47
<b>Figura 54.</b> Diseño modificado 3.....	48
<b>Figura 55.</b> $S_{11}$ Diseño modificado 3 .....	48
<b>Figura 56.</b> Eficiencia radiación y total diseño modificado 3.....	49
<b>Figura 57.</b> Carta Smith diseño modificado 3 .....	49
<b>Figura 58.</b> Diseño modificado 4.....	50
<b>Figura 59.</b> $S_{11}$ Diseño modificado 4 .....	50
<b>Figura 60.</b> Eficiencia radiación y total diseño modificado 4.....	51
<b>Figura 61.</b> Carta Smith diseño modificado 4 .....	51
<b>Figura 62.</b> Modelo modificado 5 .....	52
<b>Figura 63.</b> $S_{11}$ Diseño modificado 5 .....	52
<b>Figura 64.</b> Eficiencia radiación y total diseño modificado 5.....	53
<b>Figura 65.</b> Carta Smith diseño modificado 5 .....	53
<b>Figura 66.</b> Modelo modificado 6 .....	54
<b>Figura 67.</b> $S_{11}$ Diseño modificado 6 .....	54
<b>Figura 68.</b> Eficiencia radiación y total diseño modificado 6.....	55
<b>Figura 69.</b> Carta Smith diseño modificado 6 .....	55
<b>Figura 70.</b> Modelo modificado 7 .....	56
<b>Figura 71.</b> $S_{11}$ Diseño modificado 7 .....	56
<b>Figura 72.</b> Eficiencias diseño modificado 7 .....	57
<b>Figura 73.</b> Carta Smith diseño modificado 7 .....	57
<b>Figura 74.</b> Modelo modificado 8 .....	58
<b>Figura 75.</b> $S_{11}$ Diseño modificado 8 .....	58
<b>Figura 76.</b> Eficiencias diseño modificado 8 .....	59
<b>Figura 77.</b> Carta Smith diseño modificado 8 .....	59
<b>Figura 78.</b> Modelo final .....	60
<b>Figura 79.</b> Parameter List modelo final .....	60
<b>Figura 80.</b> $S_{11}$ Diseño final .....	61
<b>Figura 81.</b> Eficiencias diseño final .....	62
<b>Figura 82.</b> Carta Smith diseño final .....	62
<b>Figura 83.</b> Parameter Sweep diseño final .....	63
<b>Figura 84.</b> Resultado simulaciones diseño final .....	63
<b>Figura 85.</b> Exportado simulaciones diseño final.....	64
<b>Figura 86.</b> Formato fichero simulaciones diseño final .....	64
<b>Figura 87.</b> Fragmento funcion mapa_total.m .....	65
<b>Figura 88.</b> Mapa Calor diseño final.....	65
<b>Figura 89.</b> Matriz $S_{11}$ peores diseño final .....	66
<b>Figura 90.</b> $S_{11}$ simulaciones diseño final.....	67
<b>Figura 91.</b> Matriz $S_{11}$ peores diseño final para 2.40 GHz .....	67
<b>Figura 92.</b> Mapa Calor diseño final para 2.4 GHz .....	68

<b>Figura 93.</b> Mapa Calor diseño final para 2.34 GHz .....	68
<b>Figura 94.</b> Mapa Calor diseño final para 2.37 GHz .....	69
<b>Figura 95.</b> Modelo final 2 .....	70
<b>Figura 96.</b> $S_{11}$ Diseño final 2.....	71
<b>Figura 97.</b> Eficiencias diseño final .....	71
<b>Figura 98.</b> Carta Smith diseño final 2 .....	71
<b>Figura 99.</b> Mapa Calor diseño final 2.....	72
<b>Figura 100.</b> Matlab reusabilidad 1.1 .....	74
<b>Figura 101.</b> Matlab reusabilidad 1.2 .....	75
<b>Figura 102.</b> Matlab reusabilidad 2.1 .....	75
<b>Figura 103.</b> Matlab reusabilidad 2.2 .....	76
<b>Figura 104.</b> Matlab reusabilidad 2.3 .....	76
<b>Figura 105.</b> Matlab reusabilidad $S_{11}$ .....	76
<b>Figura 106.</b> Matlab reusabilidad Mapa Calor .....	77
<b>Figura 107.</b> Matlab reusabilidad comparativa .....	77
<b>Figura 108.</b> Antena Booster dimensiones .....	78
<b>Figura 109.</b> Antena Booster script.....	79
<b>Figura 110.</b> Antena Booster modelo .....	79
<b>Figura 111.</b> Antena Booster simulación .....	79

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Comparativa BW con otras antenas	72
<b>Tabla 2.</b> Comparativa reusabilidad con otras antenas	73

## Lista de ecuaciones

Ecuación 1: Permitividad relativa	16
Ecuación 2: Tangente de pérdidas	17
Ecuación 3: Impedancia de entrada	17
Ecuación 4: Coeficiente de reflexión	18
Ecuación 5: Relación de onda estacionaria	18
Ecuación 6: Ancho de banda de impedancia	19
Ecuación 7: Eficiencia de radiación	19
Ecuación 8: Eficiencia de antena	20

# 1. Introducción

*“El Internet de las cosas tiene el potencial de cambiar el mundo, tal como lo hizo Internet. Quizás incluso más.”*

Kevin Ashton, cofundador y director ejecutivo del Auto-ID Center.

## 1.1. Contexto y justificación del Trabajo

El avance del Internet de las Cosas (IoT) ha transformado la conectividad de dispositivos convencionales en sistemas inteligentes capaces de comunicarse y operar de manera remota. Esta rápida evolución ha supuesto una considerable mejora en diversos aspectos de la vida cotidiana en entornos como el hogar, la industria y la salud. Sin embargo, esta rápida evolución requiere del diseño de antenas especializadas que sean eficientes y adaptables a las necesidades específicas de cada aplicación.

En este proyecto se aborda el diseño y análisis de una antena impresa con geometría de meandro serpenteante que está optimizada para operar en la banda ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) de 2.4 GHz. Esta banda de frecuencias es crucial para aplicaciones IoT debido a su penetración en estructuras y su capacidad para soportar comunicaciones inalámbricas de corto alcance con dispositivos inteligentes. Tecnologías como Bluetooth, BlueTooth Low Energy (BLE) y las basadas en el estándar IEE 802.15.4 (Zigbee y otras variantes) operan en la banda ISM de 2.45 GHz (2.4 a 2.5GHz). [10]

La elección del diseño de antena impresa con una línea serpenteante y una tira en cortocircuito se hace con el fin de eliminar la necesidad de incluir una red de adaptación, facilitando así la integración y reduciendo el tamaño del dispositivo. [3]

Además de realizar el estudio de los parámetros de diseño de la antena como son el ancho de banda del coeficiente de reflexión y la eficiencia total de la antena, se realiza la comparación con los valores que proporcionan antenas comerciales como la antena *Booster* [1] o la antena monopolo espiral [2]. Esta comparación proporciona una referencia clave para validar el rendimiento del diseño propuesto en términos de sus características eléctricas y de su reusabilidad.

En el trabajo se aborda también el análisis de la reusabilidad de la antena diseñada con el objetivo de valorar el correcto funcionamiento de esta para distintos tamaños del plano de masa sin modificar la geometría del meandro.

El proceso de diseñar antenas que cubran las necesidades que requieren las aplicaciones de IoT conlleva una carga de trabajo y tiempo elevados. En este sentido existen herramientas comerciales como el software CST Studio Suite LE [17] que permiten realizar ciertas automatizaciones mediante macros para agilizar las simulaciones electromagnéticas. En el presente trabajo, se pretende ampliar los estudios realizados hasta el momento [9] y también se desarrolla el código de Matlab que permita comunicarse con CST Studio Suite SE para facilitar y automatizar el diseño y análisis de datos.

Como casos de uso se diseña en CST mediante Matlab la antena *Booster* de forma automática y también se desarrollan las herramientas necesarias para poder ejecutar las simulaciones directamente desde Matlab, así como la representación gráfica de los valores del coeficiente de reflexión en un Mapa de Calor. Esta integración permite explorar diversas configuraciones y evaluar rápidamente el desempeño de la antena.

Finalmente, se realiza un análisis detallado de la reusabilidad de la antena mediante la creación de un Mapa de Calor que visualiza el peor valor de  $S_{11}$  obtenido para cada configuración del plano de masa. Este enfoque permite optimizar rápidamente el diseño para cumplir con los requisitos específicos de aplicaciones IoT cada vez más exigentes.

A modo resumen, este estudio se enfoca en desarrollar una antena eficiente para aplicaciones IoT, y en desarrollar las herramientas avanzadas de diseño y análisis para satisfacer las demandas actuales y futuras de conectividad inalámbrica inteligente.

## 1.2. Objetivos del Trabajo

Los principales objetivos que se buscan lograr durante el desarrollo del proyecto son los siguientes:

1. Diseñar una antena impresa con forma de meandro serpenteante para operar en la banda ISM 2.4 GHz. Se pretende encontrar una geometría resonante que no requiera red de adaptación y de tamaño reducido ( $\sim\lambda/30$ ).
2. Estudiar los parámetros de diseño de la antena como son el ancho de banda, la reusabilidad y la eficiencia total de la antena.
3. Comparar los parámetros de estudio indicados:  $S_{11}$  y eficiencia total con antenas comerciales como la antena *Booster* [1] o monopolo espiral [2].
4. Análisis de reusabilidad de la antena mediante mapa de calor donde se representa el peor valor de  $S_{11}$  obtenido para cada plano de masa.
5. Explorar todas las posibilidades de que dispone el software CST Studio Suite LE [17] para agilizar la creación de diseños y la ejecución de las simulaciones.
6. Desarrollar el código de Matlab necesario para comunicarse con CST Studio Suite LE para facilitar el diseño y análisis de datos.
7. Diseñar en CST mediante Matlab la antena *Booster*.
8. Simular con macro de CST el comportamiento de la antena para diferentes tamaños del plano de masa con el fin de analizar la reusabilidad. Comparar los resultados mediante script desarrollado en Matlab que dibuja el Mapa Calor.
9. Simular con Matlab mediante un script de Matlab que abre el proyecto CST indicado, realiza las simulaciones, realiza la gráfica de los  $S_{11}$ , almacena todos los datos en un fichero de texto plano y dibuja en Matlab el Mapa de Calor.
10. Realizar el análisis de datos para comparar los resultados.

### 1.3. Enfoque y método seguido

En el presente trabajo se pretende realizar el diseño y análisis de una antena impresa con geometría de meandro serpenteante optimizada para operar en la banda ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) de 2.4 GHz, crucial para aplicaciones IoT debido a su penetración en estructuras y capacidad para soportar comunicaciones inalámbricas de corto alcance. Para llevar a cabo este objetivo, se han seguido los siguientes pasos:

En primer lugar, se ha definido el tipo de antena a utilizar. En este caso, se trata de una antena impresa con forma de meandro serpenteante y una tira en cortocircuito. Se ha considerado que esta geometría elimina la necesidad de incluir una red de adaptación, facilitando así la integración y reduciendo el tamaño del dispositivo.[3]

En segundo lugar, se ha realizado el estudio de los parámetros de diseño de la antena, como son el ancho de banda del coeficiente de reflexión y la eficiencia total de la antena. Estos parámetros se han comparado con los proporcionados por antenas comerciales, como la antena *Booster* [1] y la antena monopolo Espiral [2], con el fin de validar el rendimiento del diseño propuesto en términos de sus características eléctricas y de su reusabilidad.

Además, se ha llevado a cabo un análisis de la reusabilidad de la antena diseñada. Este proceso ha consistido en evaluar el correcto funcionamiento de la antena para distintos tamaños del plano de masa sin modificar la geometría del meandro. Para ello, se ha creado un Mapa de Calor que permita visualizar el peor valor de  $S_{11}$  obtenido para cada configuración del plano de masa, permitiendo identificar rápidamente las áreas críticas y optimizar el diseño.

Para facilitar el proceso de diseño y análisis, se ha implementado una interfaz en Matlab que permite la comunicación con el software de simulación CST Studio Suite LE. Mediante instrucciones de código Matlab, se genera automáticamente el proyecto CST con el modelo a simular.

En ambos casos, se ha seleccionado software con licencia de estudiante para evitar costes adicionales. Se ha diseñado en CST mediante Matlab la antena *Booster* de forma automática, y se han desarrollado las herramientas necesarias para ejecutar las simulaciones directamente desde Matlab, así como para representar gráficamente los valores del coeficiente de reflexión en un Mapa de Calor.

Finalmente, con el estudio realizado a lo largo del proyecto, se pretende obtener diseños de antenas funcionales en la banda ISM de 2.4 GHz que ofrezcan ventajas sobre las actuales antenas disponibles en el mercado, específicamente para aplicaciones IoT. Este enfoque busca satisfacer las demandas actuales y futuras de conectividad inalámbrica inteligente mediante el uso de herramientas avanzadas de diseño y análisis.

## 1.4. Planificación del Trabajo

Los recursos utilizados para llevar a cabo este proyecto incluyen artículos de investigación recientes en el campo del diseño de antenas meandro, así como la documentación técnica de dispositivos relacionados con aplicaciones IoT. Como herramientas de diseño y análisis, se han empleado los programas **Matlab R2022a** (9.12.0.1884302) y **CST Studio Suite 2023 (Student Edition)**, ambos con licencias de estudiante.

El detalle de cada una de las tareas es el siguiente:

### PEC1 Planificación e inicio del trabajo

Fecha inicio: 29/02/2024

Fecha fin: 18/03/2024

Tareas realizadas:

1. Propuesta TFM
2. Reunión inicial
3. Lectura artículos relacionados
4. Búsqueda artículos diseño antena meandro
5. Aprendizaje Software CST Studio Suite Learning Edition
6. Diseños iniciales antenas meandro ISM
7. Reunión revisión Estado de la cuestión

### PEC2 Seguimiento del trabajo I:

Fecha inicio: 19/03/2024

Fecha fin: 15/04/2024

Tareas realizadas:

1. Búsqueda *datasheets* diseño antena meandro
2. Revisión diseños posibles y selección del definitivo
3. Estado del arte y bibliografía
4. Creación y simulación diseño preliminar en CST
5. Reunión de seguimiento

### PEC3 Entrega preliminar:

Fecha inicio: 16/04/2024

Fecha fin: 20/05/2024

Tareas realizadas:

1. Ajustes diseño preliminar CST y simulaciones
2. Macros CST
3. Diseño antena *Booster* en Matlab
4. Desarrollo Mapa Calor Matlab

5. Desarrollo Script Simular y generar Mapa Calor Matlab
6. Comparación de diseños.
7. Reunión de seguimiento

**PEC4 Entrega final del trabajo:**

Fecha inicio: 21/05/2024

Fecha fin: 24/06/2024

Tareas realizadas:

1. Redacción presentación
2. Redacción memoria
3. Reunión final

En el diagrama de Gantt se muestra la planificación temporal de cada una de las tareas realizadas, con el detalle de los días y las horas de trabajo invertidas.

TAREAS	HORAS	INICIO	FIN	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
<b>PEC1 Planificación e inicio del trabajo</b>	<b>116</b>	<b>29-02</b>	<b>18-03</b>					
Propuesta TFM	25	29-02	02-03					
Lectura artículos relacionados	20	02-03	05-03					
Búsqueda artículos diseño antena meandro	20	05-03	08-03					
Aprendizaje Software CST Studio Suite Learning Edition	20	09-03	12-03					
Diseños iniciales antenas meandro ISM	30	12-03	18-03					
Reunión revisión Estado del Arte	1	18-03	18-03					
<b>PEC2 Seguimiento del trabajo I</b>	<b>121</b>	<b>19-03</b>	<b>15-04</b>					
Búsqueda <del>datos</del> diseño antena meandro	25	21-03	14-04					
Revisión diseños posibles y selección del definitivo	25	01-04	15-04					
Estado del arte y bibliografía	30	21-03	14-04					
Creación y simulación diseño preliminar en CST	40	12-04	15-04					
Reunión de seguimiento	1	15-04	15-04					
<b>PEC3 Entrega preliminar</b>	<b>151</b>	<b>16-04</b>	<b>20-05</b>					
Ajustes diseño preliminar CST y simulaciones	20	16-04	01-05					
Macros CST	25	01-05	09-05					
Diseño antena booster Matlab	25	03-05	15-05					
Desarrollo Mapa Calor Matlab	30	05-05	20-05					
Desarrollo script Simular y generar Mapa Calor Matlab	40	01-05	20-05					
Comparación diseños	10	15-05	20-05					
Reunión de seguimiento	1	20-05	20-05					
<b>PEC4 Entrega final del trabajo</b>	<b>101</b>	<b>21-05</b>	<b>24-06</b>					
Redacción presentación	25	21-05	15-06					
Redacción memoria	75	21-05	24-06					
Reunión final	1	21-05	24-06					
<b>Defensa sincrona</b>	<b>1</b>	<b>25-06</b>	<b>05-07</b>					
Defensa	1	25-06	05-07					

**Figura 1.** Planificación del proyecto

## **1.5. Breve resumen de productos obtenidos**

En el trabajo se ha diseñado una antena impresa con forma de meandro serpenteante sobre un sustrato FR-4 para operar en la banda ISM 2.4 GHz (de 2.4 GHz a 2.5GHz). La geometría obtenida ha resultado resonante sin necesidad de hacer uso de una red de adaptación. Este diseño consigue una reusabilidad del 1% a la frecuencia de resonancia de 2.45 GHz y una eficiencia del 74% en la banda de interés.

Se ha decidido seguir investigando con este diseño el caso de la reusabilidad para una frecuencia un poco menor, llegando a conseguir con este diseño una reusabilidad del 12% para la frecuencia de 2.37 GHz.

Se ha propuesto un segundo diseño con el fin de analizar si mejora la reusabilidad al variar la frecuencia de resonancia y mostrar así también un caso de uso de las herramientas de análisis de datos que se han creado en Matlab en el desarrollo de este proyecto.

Se han programado las funciones de Matlab necesarias para automatizar la ejecución de simulaciones y posterior post procesado de datos sobre un modelo ya existente.

También se ha querido mostrar la posibilidad de automatizar la creación de diseños mediante Matlab y para ello, se ha diseñado y simulado en CST mediante Matlab la antena *Booster*.

Además de utilizar las herramientas proporcionadas por CST para automatización de simulaciones y diseños, se ha querido dar un paso más y se ha conseguido automatizar todo el proceso en Matlab. Sirva este último producto como punto de partida para otros proyectos que requieran herramientas eficientes de análisis de datos de los diseños de antenas con CST.

## **1.6. Breve descripción de los otros capítulos de la memoria**

La memoria está dividida en cinco capítulos. En primer capítulo se describe de forma general el contexto del proyecto, los métodos utilizados, los objetivos a conseguir y se incluye la planificación seguida, así como un resumen de los resultados obtenidos.

En el segundo capítulo se detalla la necesidad de diseñar de forma ágil y eficiente antenas que puedan ser utilizadas en diversos ámbitos como consecuencia del rápido desarrollo de las aplicaciones IoT. En el mismo capítulo se definen los conceptos básicos de los parámetros de antenas y se realiza un recorrido por los distintos artículos de investigación relacionados para completar el Estado del Arte.

En el siguiente capítulo se expone el diseño de la antena y se presentan los fundamentos teóricos y prácticos que respaldan el diseño elegido. Se incluye un análisis detallado de la reusabilidad del diseño inicial. Aquí también se presenta un segundo diseño alternativo, analizando si mejora la reusabilidad al variar la frecuencia de resonancia.

El cuarto capítulo se dedica a la automatización del diseño y simulación en CST mediante Matlab. Se explica cómo se ha logrado automatizar todo el proceso en Matlab y se describe el uso de las herramientas de análisis de datos creadas en Matlab para el desarrollo del proyecto.

En el último capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo y se proporcionan planteamientos para futuras líneas de investigación.

## 2. Estado del Arte

### 2.1 Introducción

En este capítulo se justifica la necesidad de diseñar antenas para aplicaciones de *Internet of Things*, (en adelante IoT) de manera ágil y eficiente. Como consecuencia del rápido avance de las tecnologías IoT, los diseños de mercado deben tener la capacidad de adaptarse a la amplia gama de aplicaciones emergentes.

Aquí también se explican los parámetros básicos teóricos de antenas para entender el funcionamiento de estas y así comprender el desarrollo del proyecto realizado.

Para finalizar el capítulo, se revisan los artículos de investigación más recientes sobre el diseño de antenas para IoT. Entre los documentados se destacan aquellos que abordan desafíos como la miniaturización, eficiencia energética y la reutilización de antenas para diferentes tamaños de dispositivos. Se comentan diversos enfoques y tipos de antenas relevantes en el ámbito comercial actual, donde destaca por sus prestaciones la antena *Booster*.<sup>[1]</sup>

### 2.2 Internet de las Cosas en la banda de 2.4 GHz

#### Definición de IoT

El concepto de Internet de las Cosas hace referencia a la interconexión digital de dispositivos de nuestra vida cotidiana a través de Internet, de modo que éstos adquieren la capacidad de enviar y recibir datos. Los dispositivos pueden ser desde electrodomésticos hasta sensores de vehículos o de maquinaria industrial. La idea principal de este concepto es que los dispositivos puedan recopilar y compartir información con el fin de realizar ciertas tareas de forma más eficiente e incluso autónoma. Los dispositivos IoT se pueden utilizar en medicina para mejorar la calidad de vida de las personas y en la industria para optimizar y automatizar ciertos procesos industriales.

Cabe destacar que en el contexto de la industria 4.0 el Internet de las Cosas juega un papel fundamental al permitir la comunicación entre máquinas, así como la monitorización remota en tiempo real de procesos y, por ende, la automatización de toma de decisiones. Esto contribuye a la creación de entornos de producción más eficientes y dotados de inteligencia, con lo que se reduce el coste de los procesos de producción al poder automatizar parte de las tareas.

Dado que el IoT se basa en la conectividad, la recopilación de datos, el análisis de datos y la automatización de procesos, el hecho de disponer de diseños funcionales de antenas que sean “rápidamente” adaptables a las nuevas aplicaciones se hace fundamental. Aquí

es donde entra el concepto de reusabilidad de una antena para distintos tamaños de dispositivos ampliamente estudiado a lo largo del proyecto.

A medida que la tecnología avanza, el desarrollo de IoT se vuelve cada vez más relevante en diversos sectores y está consiguiendo transformar la forma en la que interactuamos con el mundo que nos rodea.



Figura 2. Internet of things [24]

### **Banda ISM 2.4GHz libre de licencia**

Las bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) son frecuencias de radio que se utilizan para comunicaciones inalámbricas en todo el mundo sin necesidad de una licencia específica, aunque sí están reguladas para garantizar un buen uso de estas. Se pueden utilizar para aplicaciones industriales, científicas y experimentales, así como para aplicaciones médicas. [10]

Una de las bandas ISM más comunes es la centrada en 2.45 GHz, cuya banda está definida entre los 2.4 GHz y 2.5 GHz y que está disponible en todo el mundo. Además de su amplia disponibilidad es la que se usa en tecnologías como Bluetooth, Wi-Fi y Zigbee.

Igualmente, la banda de 2.4 GHz es utilizada en una variedad de dispositivos y tecnologías, desde teléfonos inteligentes y computadores hasta dispositivos domésticos inteligentes y equipos industriales. Su amplia disponibilidad y capacidad para soportar múltiples dispositivos la convierten en una opción atractiva para aplicaciones inalámbricas en diversos entornos.

En definitiva, la banda de 2.4 GHz que forma parte de las bandas ISM sin licencia, es clave para el avance y la aplicación de tecnologías inalámbricas modernas. Esta banda ofrece una plataforma robusta y versátil para la comunicación inalámbrica de una gran variedad de dispositivos y aplicaciones.

A continuación, se muestran las tecnologías asociadas a la banda ISM 2.4 GHz.

## Tecnologías banda ISM 2.4GHz

Las tecnologías que utilizan la banda ISM de 2.4 GHz son fundamentales en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas debido a su amplia disponibilidad y capacidad para soportar una considerable variedad de aplicaciones. Algunas de las tecnologías destacadas que operan en la banda de 2.4 GHz son:

- 1. Wi-Fi:** Utilizada para redes locales inalámbricas, el estándar IEEE 802.11 permite la conexión a Internet y la comunicación entre dispositivos dentro de un área determinada.
- 2. Bluetooth:** Empleado en dispositivos de corto alcance para la transmisión de datos entre dispositivos como teléfonos móviles, auriculares inalámbricos y dispositivos IoT.
- 3. Zigbee:** Utilizado en aplicaciones de redes de sensores inalámbricos para la monitorización y control de dispositivos en entornos domésticos, industriales y comerciales.
- 4. Tecnologías LPWA (Low Power Wide Area):** Como Sigfox y LoRa, que se utilizan para comunicaciones de larga distancia y bajo consumo de energía en aplicaciones de IoT.

Estas tecnologías aprovechan la banda de 2.4 GHz para proporcionar una conectividad inalámbrica fiable y eficiente en una amplia gama de dispositivos y aplicaciones, desde redes domésticas hasta entornos industriales. Gracias a su versatilidad y capacidad para soportar diferentes tipos de comunicación, son fundamentales en el desarrollo y la implementación de soluciones inalámbricas en la actualidad.

## 2.3 Parámetros de antenas

### Parámetros intrínsecos de los materiales [11]

En el presente apartado se definen los parámetros básicos que son necesarios tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de una antena, en el caso de este proyecto, una antena meandro impresa sobre un sustrato dieléctrico.

Como se ha indicado anteriormente, el sustrato es un material dieléctrico sobre el que se imprime la antena, por lo cual sus características intrínsecas influyen en los parámetros de diseño de la antena, como en su ancho de banda, su eficiencia de radiación y su diagrama de radiación. El sustrato es un material no conductor que puede fabricarse con determinadas resinas epoxi con fibras de vidrio, como es el caso del sustrato FR-4, con cerámica, con poliamida o con teflón. Sus características más importantes son:

**La permitividad relativa o constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ )** que indica cómo el sustrato afecta a la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Matemáticamente se define como la relación entre la permitividad absoluta del material ( $\epsilon$ ) y la permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) según la ecuación:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Donde:

$\epsilon_r$  es la permitividad o constante dieléctrica.

$\epsilon$  es la permitividad absoluta del material.

$\epsilon_0$  es la permitividad del vacío. Su valor aproximado es:  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

Una constante alta permite reducir el tamaño de la antena, pero puede aumentar las pérdidas y disminuir el ancho de banda.

**El espesor del sustrato** también afecta la eficiencia y la impedancia de la antena. Un sustrato más grueso puede aumentar el ancho de banda, pero también puede causar pérdidas y radiación indeseada.

La **tangente de pérdidas (tan  $\delta$ )** también es otro parámetro característico del material sustrato que se utilice e indica la eficiencia del material dieléctrico en términos de pérdida de energía. Se define matemáticamente con la relación:

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_r} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma$  es la conductividad (S/m).

$\omega$  es la velocidad angular (rad/s).

$\epsilon_r$  es la constante dieléctrica.

Con respecto al material conductor con el que se diseñe la antena, se ha de tener en cuenta el parámetro **conductividad ( $\sigma$ )** y que como puede verse en la anterior ecuación, también está relacionado con la tangente de pérdidas. La conductividad describe la habilidad de los materiales para facilitar el paso de corriente eléctrica. Se trata de un parámetro fundamental de diseño.

Todos los parámetros indicados hasta ahora son propios de los materiales y puesto que condicionan el diseño y funcionamiento de las antenas, deben elegirse considerando la aplicación en la que se utilizará la antena, para ajustar la eficiencia de radiación, el ancho de banda o el tamaño.

### Parámetros que definen las antenas [11][12]

La **impedancia de entrada ( $Z_{in}$ )** de una antena puede definirse como la relación entre la tensión y la corriente presente en el puerto de entrada de la antena. Matemáticamente se describe:

$$Z_{in} = R_{in} + X_{in} = (R_{rad} + R_{\Omega}) + X_{in} \quad (3)$$

Donde:

$R_{in}$  es la parte real que está compuesta de la resistencia de radiación ( $R_{rad}$ ) y de la resistencia de pérdidas óhmicas  $R_{\Omega}$ .

$X_{in}$  es la parte imaginaria que depende de la frecuencia. Dependiendo de si el signo de esta impedancia es positivo se tiene que la energía que almacena la antena es magnética, y si es negativo, la energía que almacena es eléctrica.

Con el **coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ )** se evalúa el grado de adaptación entre la impedancia de la línea de transmisión que conecta la fuente y la antena, con la impedancia de entrada. Este coeficiente indica si toda la potencia entregada por la fuente se disipa efectivamente en la carga.

Se describe con la relación:

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

Donde:

$S_{11}$  o  $\Gamma$  es el coeficiente de reflexión. Se mide en lineal [-1, 1] o dB  $(-\infty, 0]$

$Z_{in}$  es la impedancia de entrada de la antena.

$Z_0$  es la impedancia característica y normalmente es de  $50 \Omega$

Si el valor del coeficiente de reflexión igual a 0 indica que la antena está perfectamente adaptada al generador. Esta es la situación deseable ya que toda la potencia suministrada por el generador se transfiere eficientemente a la antena sin reflexiones y sucede cuando la impedancia de la antena  $Z_{in}$  es igual a la impedancia característica  $Z_0$ . Si el coeficiente de reflexión tiene un valor cercano a 1 indica desadaptación de impedancias, lo que significa que parte de la potencia se pierde debido a reflexiones.

Además del coeficiente de reflexión, se utiliza comúnmente la **relación de onda estacionaria (ROE o VSWR)** para medir la desadaptación de impedancias. Matemáticamente puede describirse como:

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

Se tiene adaptación perfecta si:  $S_{11} = 0$  ;  $ROE = 1$

Se tiene desadaptación total si:  $|S_{11}| = 1$  ;  $ROE = \infty$

El **ancho de banda de impedancia ( $BW(\%)$ )** se define como el margen de frecuencias en el que el coeficiente de reflexión de la antena es igual o inferior a un valor de referencia. En el diseño del trabajo se ha utilizado  $S_{11} \leq -6dB$  por ser el valor mínimo aceptable para aplicaciones de IoT o de telefonía móvil [3]. Se han tomado los valores de frecuencia máxima y mínima donde cortan con este valor para obtener  $BW(\%)$ .

Matemáticamente puede describirse como:

$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{\frac{f_2 + f_1}{2}} \cdot 100 \quad (6)$$

Donde:

$BW$  es el ancho de banda de impedancia

$f_2$  es la frecuencia de corte superior

$f_1$  es la frecuencia de corte inferior

Como ejemplo se muestra la curva de adaptación de uno de los diseños presentados en función de la frecuencia. En la gráfica se puede observar el valor del coeficiente de reflexión en dB a lo largo de la frecuencia. En los valores donde de  $S_{11} \leq -6dB$  se ha marcado la frecuencia de corte superior y la frecuencia de corte inferior:

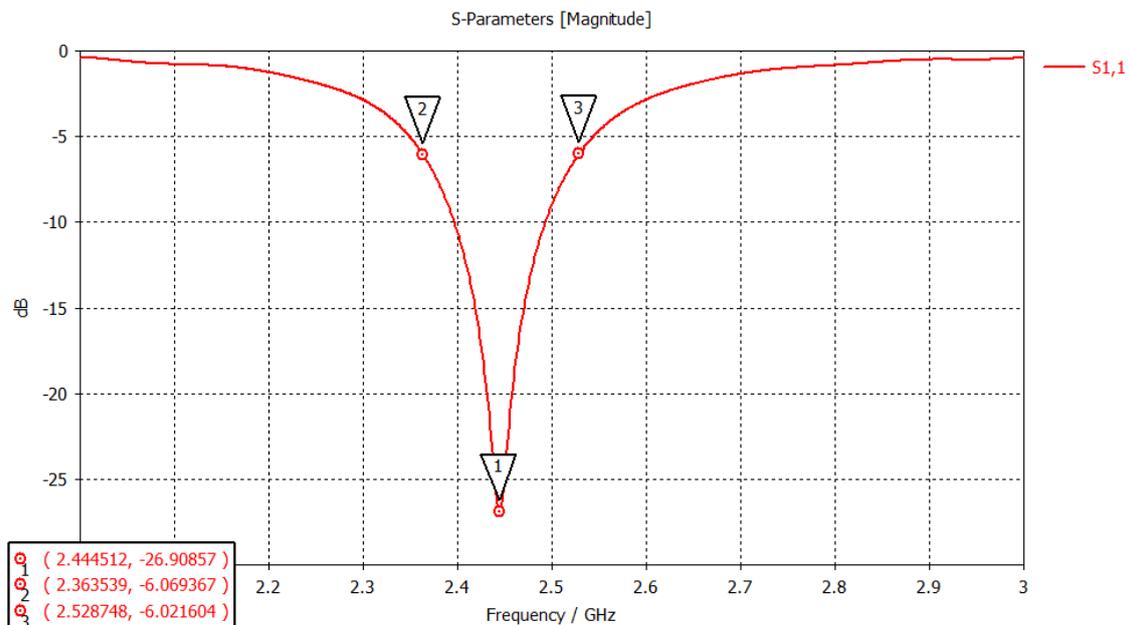


Figura 3. Curva del coeficiente de reflexión  $S_{11}$

Por lo que el valor del ancho de banda es:

$$BW(\%) = \frac{2.53 - 2.36}{\frac{2.53 + 2.36}{2}} \cdot 100 = 6.9\%$$

La **eficiencia de radiación ( $\eta_r$ )** es la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena. Este parámetro mide la proporción de la potencia de entrada que una antena convierte en energía radiada. Matemáticamente puede describirse:

$$\eta_r = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad (7)$$

Donde:

$\eta_r$  es la eficiencia de radiación.

$R_r$  es la resistencia de radiación.

$R_\Omega$  es la resistencia de pérdidas óhmicas.

La **eficiencia de antena ( $\eta_a$ )** relaciona la potencia radiada por la antena al espacio con la potencia entregada por el generador, por lo que su expresión matemática incluye la pérdida de potencia producida por la desadaptación de impedancias:

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

Donde:

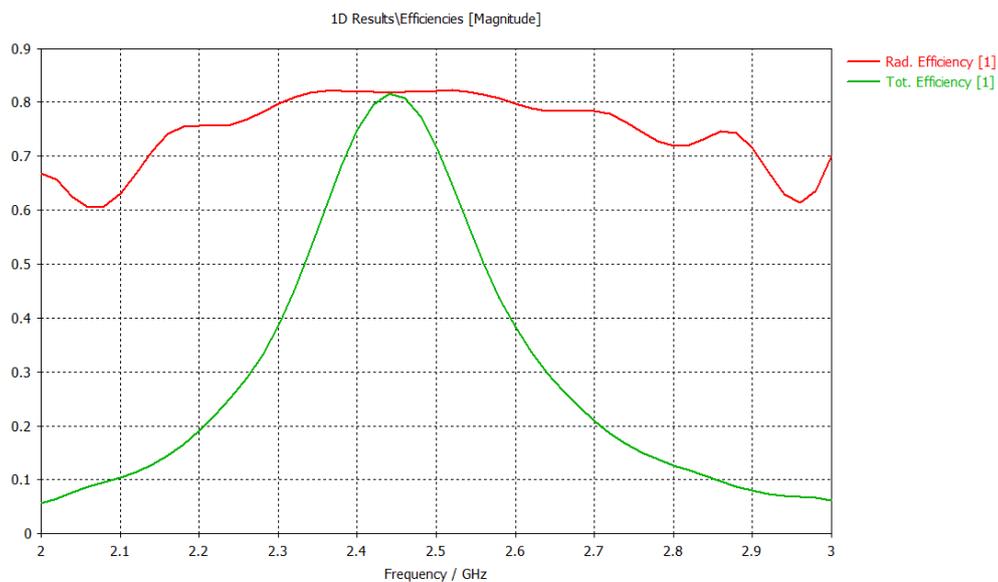
$\eta_a$  es la eficiencia de la antena.

$\eta_r$  es la eficiencia de radiación.

$S_{11}$  es el coeficiente de reflexión.

El término  $(1 - |S_{11}|^2)$  cuantifica las pérdidas por desadaptación.

La máxima eficiencia se conseguiría si no hubiese pérdidas por desadaptación, estando las pérdidas únicamente asociadas a las propiedades geométricas y a los materiales de la antena. Sin embargo, en la práctica, es necesario considerar las pérdidas por desadaptación, ya que un coeficiente de reflexión de 0 no es posible para un amplio rango de frecuencias, reduciendo así la eficiencia de radiación a la eficiencia de antena.



**Figura 4.** Eficiencia de radiación y total

A lo largo del trabajo se utiliza la **Carta de Smith** para visualizar la impedancia compleja de la antena con el fin de determinar la correcta adaptación del diseño analizado. La Carta de Smith es una herramienta gráfica utilizada en ingeniería de radiofrecuencia y microondas para resolver problemas de adaptación de impedancias. Representa las relaciones de impedancia y admitancia en un plano complejo, de modo que facilita el diseño y análisis de circuitos de transmisión. Es una herramienta que permite optimizar la adaptación y por lo tanto permite mejorar la eficiencia en la transferencia de potencia.

En la siguiente imagen se muestra la Carta de Smith obtenida con CST Studio Suite para uno de los diseños. En el eje horizontal se muestra la parte real y en el eje vertical la parte imaginaria de la impedancia de entrada de la antena. Los puntos por encima del eje horizontal son inductivos y los que están por bajo son capacitivos. Al barrer el rango de frecuencias de 0 GHz a 5 GHz se pueden visualizar los valores de impedancia para cada frecuencia. En el centro de la carta, donde la parte imaginaria es casi nula y la real es 1, la impedancia está adaptada, con un coeficiente de reflexión cercano a 0. Mediante técnicas de adaptación de impedancias, se pueden adaptar antenas no resonantes usando elementos pasivos o pistas sobre el sustrato, como es el caso mostrado.

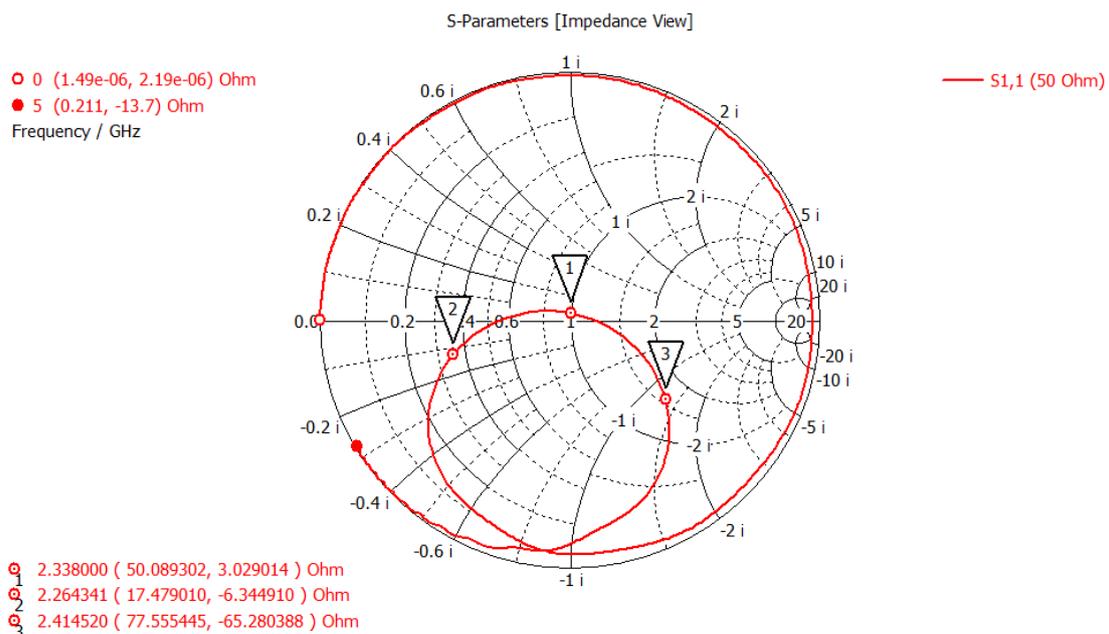


Figura 5. Carta de Smith

En este proyecto se hace uso de los parámetros:  $S_{11}$ , ancho de banda de antena y eficiencia de radiación.

## 2.4 Antena Booster

La antena *Booster* es una solución comercial ampliamente utilizada que consiste en una antena con geometría de paralelepípedo no resonante pero que es fácilmente adaptable con una sencilla red de adaptación compuesta por elementos pasivos.

Esta antena presenta un tamaño reducido 12 mm x 3 mm x 2.4 mm ( $\sim\lambda/30$ ) y su banda de frecuencias de funcionamiento va de 863 MHz a 928 MHz, por lo que esta antena opera en la banda de los 900 MHz.



Figura 6. Antena *Booster*

A continuación, se describen brevemente los artículos de investigación que han servido como punto de partida del presente proyecto.

### **Trabajo: “On the Reuse of a Matching Network for IoT Devices Operating at 900 MHz Embedding Antenna Boosters” [1]**

El Internet de las Cosas avanza a velocidad de vértigo y se da la circunstancia de que muchos dispositivos tienen antenas que operan en la banda de 863 a 928 MHz. Como consecuencia del crecimiento de dispositivos IoT que cuentan con muchos sensores que envían continuamente datos, surge la necesidad de que estos dispositivos IoT a 900 MHz tengan antenas eficientes que permitan enviar datos a la nube, que garanticen un buen alcance y una duración de la batería aceptable.

En este artículo se propone la tecnología de antena *Booster* y se muestra como esta antena es capaz de ser reutilizada para distintos tamaños de dispositivos. La antena no es resonante por sí misma y requiere de una red de adaptación con elementos pasivos. En el estudio se demuestra la elevada reusabilidad de la antena *Booster* para distintos tamaños del plano de masa, sin necesidad de modificar la red de adaptación. Esto permite agilizar el diseño de dispositivos IoT puesto que es posible utilizar el mismo sistema de antena sin requerir modificaciones adicionales.

La antena *Booster* es un elemento con forma de paralelepípedo, de tamaño reducido 12 mm x 3 mm x 2.4 mm ( $\sim\lambda/30$ ) y no resonante que permite el funcionamiento en la banda de frecuencia de LoRa (863 a 928 MHz) con la inclusión de una sencilla red de adaptación de impedancias. Se requiere que la antena tenga un valor del coeficiente de reflexión  $S_{11} \leq -6dB$  en la banda de interés.

En la siguiente figura puede verse el comportamiento de la impedancia en la Carta de Smith de esta antena sin la red de adaptación.

Se tiene la antena *Booster* de 12 mm x 3 mm x 2.4 mm sobre un plano de masa de tamaño 120 mm x 60 mm y sin una red de adaptación. El sustrato tiene 1 mm de espesor con  $\epsilon_r=4.15$  y  $\tan\delta = 0.017$ . El amplificador de antena se modela como un paralelepípedo conductor con una conductividad de  $\sigma = 5.9 \cdot 10^7$  S/m.

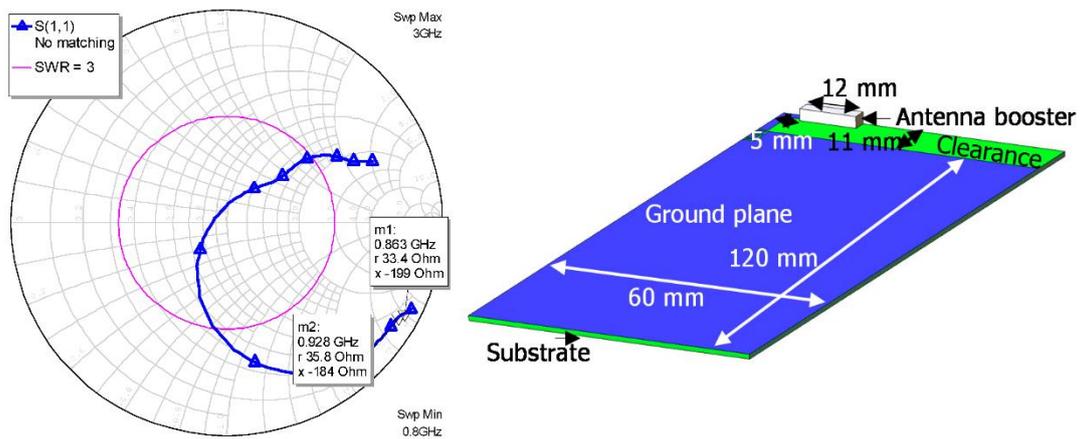


Figura 7. Impedancia antena *Booster* sin red de adaptación

De la Carta de Smith se observa que para la frecuencia 863 MHz se obtiene una impedancia  $Z_{in} = 33.4 - 199j$  y a la frecuencia de 928 MHz, la impedancia es  $Z_{in} = 35.8 - 184j$ . Por ello se incluye la red de adaptación compuesta por una inductancia paralela de 16nH y una inductancia serie de 33nH que se obtuvo mediante el software Cadence Microwave Office.

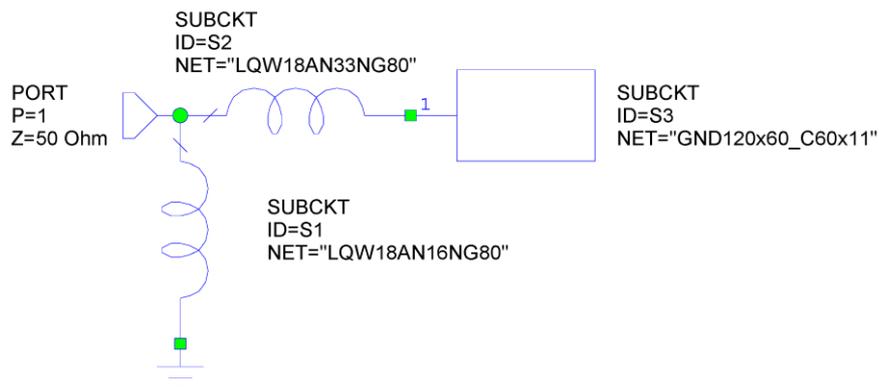


Figura 8. Red de adaptación para antena *Booster*

Con la red de adaptación el funcionamiento de la antena es correcto puesto que el valor del coeficiente de reflexión cumple  $S_{11} \leq -6dB$  para toda la banda de interés:

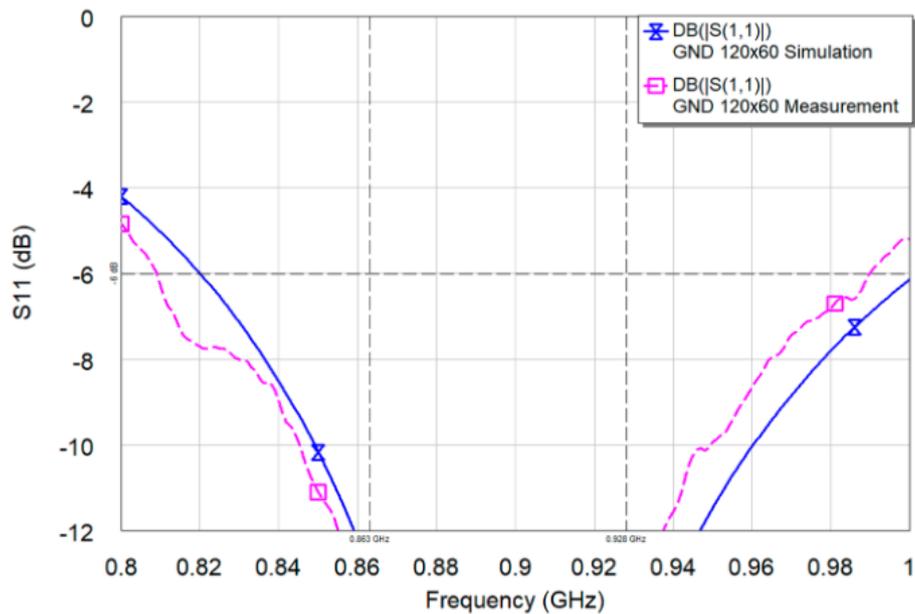


Figura 9.  $S_{11}$  simulado de la antena *Booster* con red de adaptación.

Como puede observarse en la imagen anterior, el ancho de banda incluso superó la banda de los 863 - 928 MHz, esto indica que cambiando el tamaño del actual plano de masa (120 mm x 60 mm) a otros tamaños el funcionamiento seguiría siendo correcto.

En la investigación se realiza la simulación del comportamiento de la antena para 361 planos de tierra distintos. Los planos de tierra probados cubrieron un espacio de 20 mm x 20 mm a 200 mm x 200 mm, con una diferencia de 10 mm entre ellos.

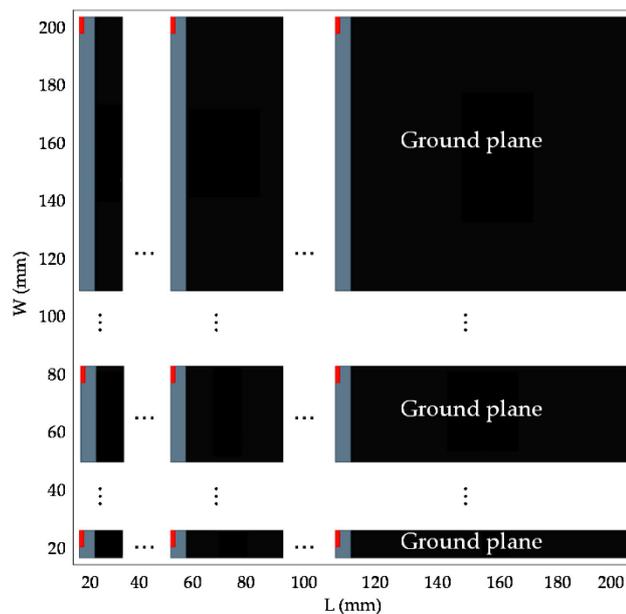


Figura 10. Diferentes tamaños planos de masa

Se registra el valor del peor coeficiente de reflexión  $S_{11}$  en la banda de interés y se representan los valores en un Mapa de Calor donde el eje vertical representa el valor de  $W$ (mm) y el eje horizontal el valor de  $L$  (mm) del plano de masa. De modo que los tonos azules representan los valores que cumplen la condición buscada  $S_{11} \leq -6dB$ .

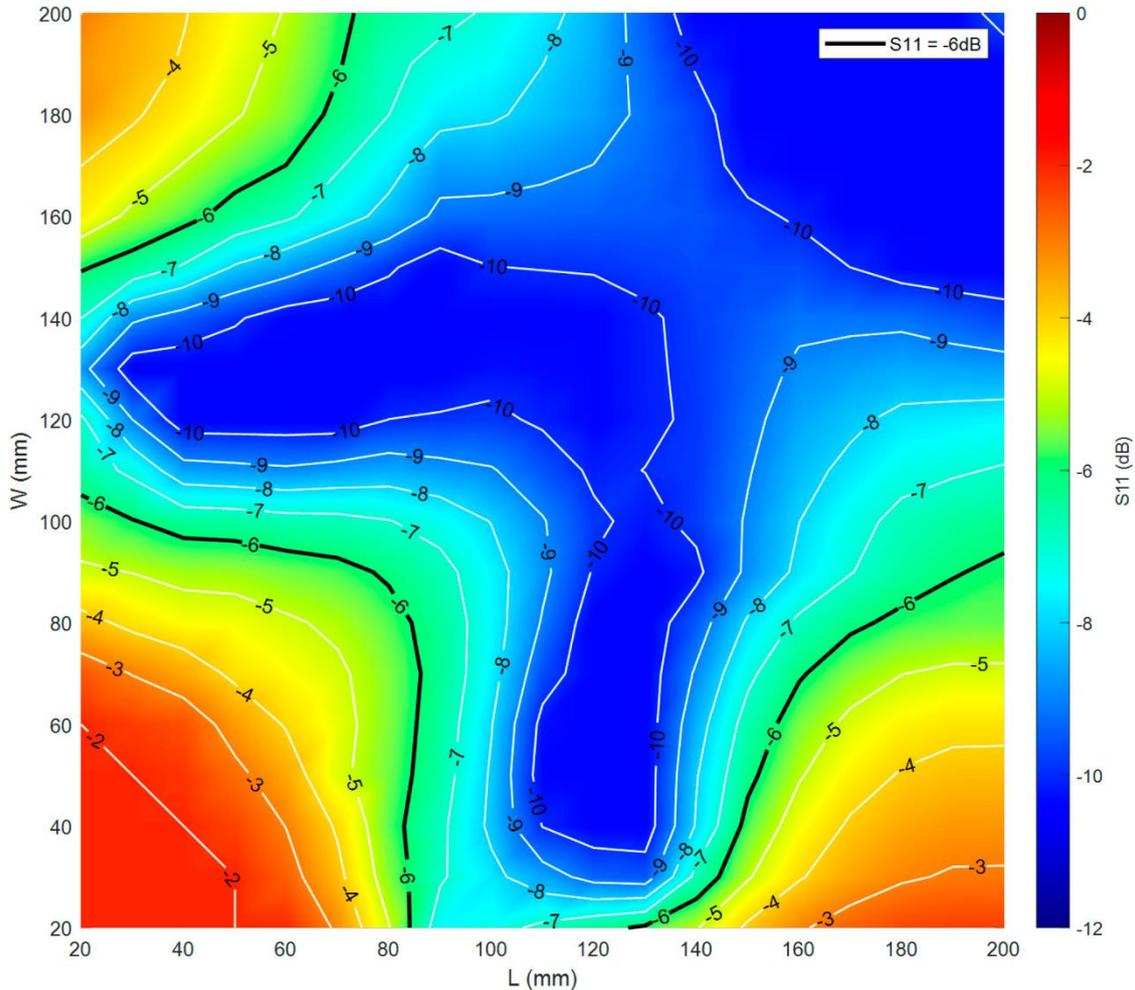


Figura 11. Mapa de Calor antena *Booster*

De los 361 planos de masa distintos, cumplen la condición un total de 241 planos por lo que la reusabilidad de esta antena es del **66.8%**. Este resultado es tremendamente interesante puesto que significa que, con la misma antena y red de adaptación, se podría tener dispositivos de los tamaños correspondientes a los 241 planos de masa. Esto agiliza considerablemente el diseño de dispositivos IoT.

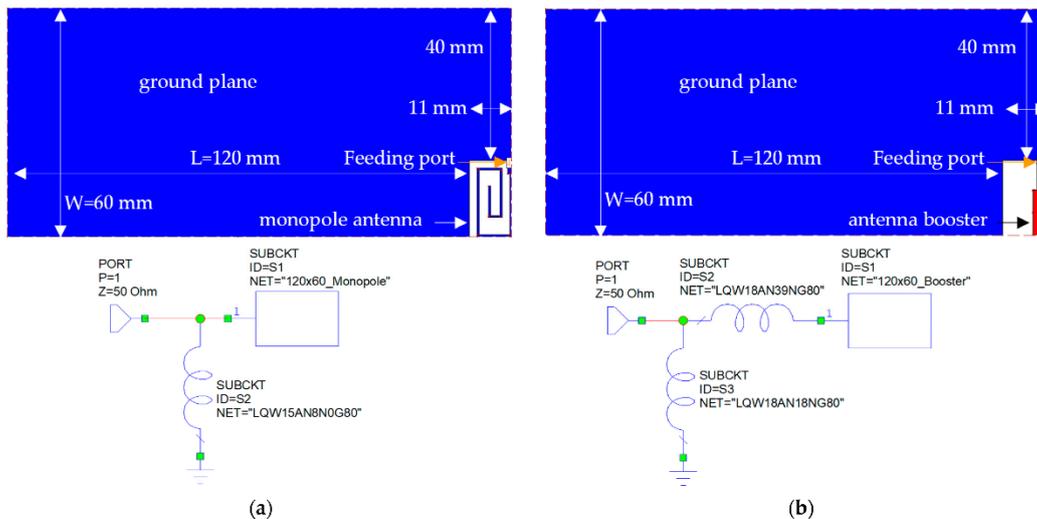
Tal y como se ha mostrado, la antena *Booster* es muy interesante en el diseño de dispositivos IoT por su alta reusabilidad.

En el presente trabajo se hace uso de la representación mediante Mapa de Calor mostrada en este artículo, para poder comparar los resultados con las antenas diseñadas y las antenas comerciales.

**Trabajo: "Antenna Booster Versus a Spiral Monopole Antenna for Single-Band Operation at 900 MHz" [2]**

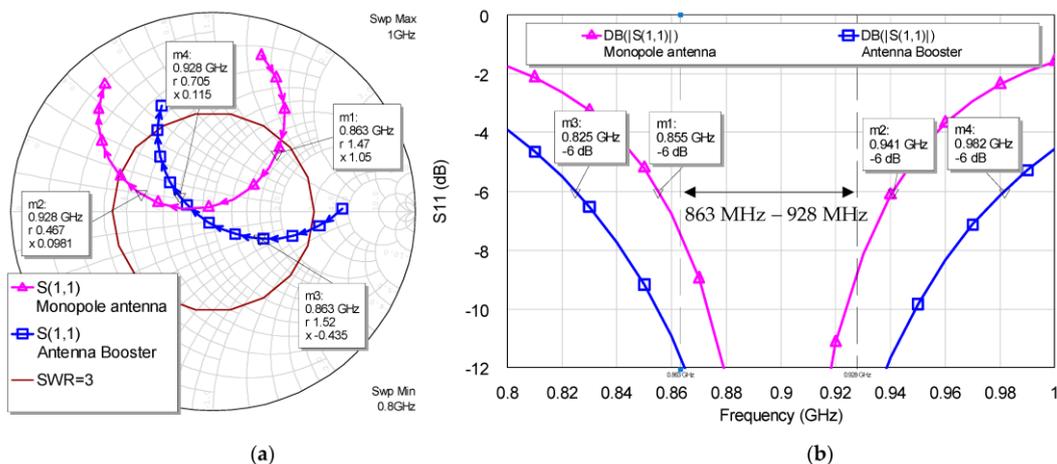
El segundo trabajo revisado compara la antena *Booster* con una antena monopolo con forma de espiral cuando funcionan a 900MHz y posteriormente realiza la comparación en cuanto a reusabilidad para la misma banda de interés, de 863 MHz a 928 MHz.

Los diseños utilizados son los mostrados en la figura siguiente donde el plano de masa (cobre con  $\sigma = 5.9 \cdot 10^7$  S/m) se imprime sobre un sustrato FR4 de 1 mm de espesor, con  $\epsilon_r=4.15$  y  $\tan\delta = 0.017$ .



**Figura 12.** Antena monopolo espiral (a) y Antena *Booster* (b)

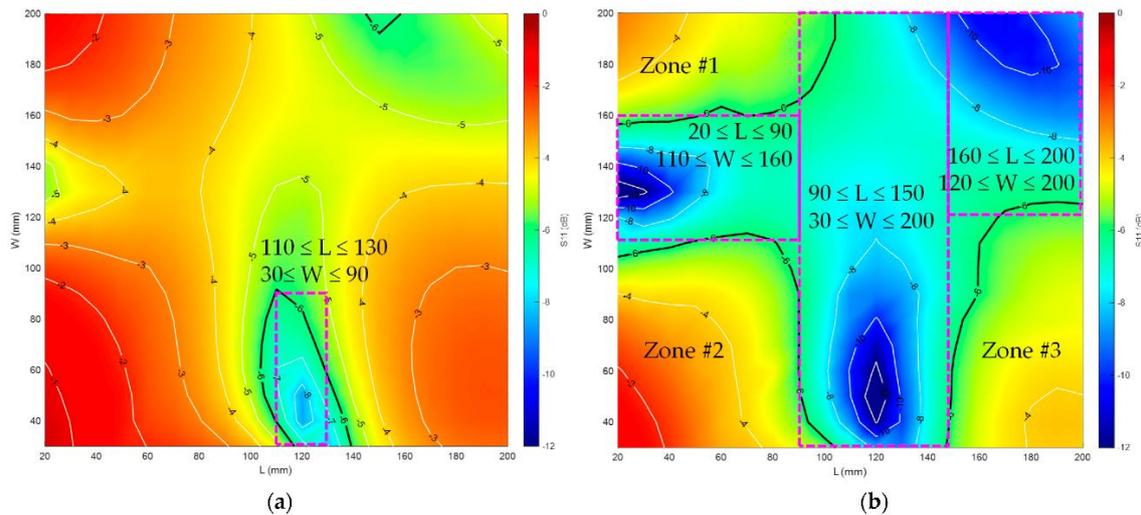
Ambos diseños requieren de una red de adaptación para que el funcionamiento de la antena sea correcto. Además, a la antena monopolo se le añade una línea  $\lambda/4$  para que encaje en la banda de frecuencia y una red de adaptación que es un inductor en derivación de valor 8 nH. Con estas modificaciones, se consigue que el valor del coeficiente de reflexión cumpla  $S_{11} \leq -6\text{dB}$  para toda la banda de interés:



**Figura 13.** Antena *Booster* vs Monopolo espiral: a) Impedancia de entrada b)  $S_{11}$

La red de adaptación de la antena *Booster* también se recalcula puesto que el punto de excitación ahora es otro y queda compuesta por una inductancia paralela de 18nH y una inductancia serie de 39nH.

Para la comparación se utiliza el mismo procedimiento, primero se toma un plano de tierra de referencia de 120 mm × 60 mm, después se analizan los mismos diseños, pero cambiando el tamaño del plano de masa de 20 mm × 30 mm a 200 mm × 200 mm usando pasos de 10 mm. Se revisará en cuántos casos cumplirá el coeficiente de reflexión la condición  $S_{11} \leq -6dB$  para ambos diseños. Al igual que antes, la información se muestra de forma gráfica en un Mapa de Calor.



En el estudio se observa que la antena *Booster* se puede reutilizar en el **53.8%** de los planos de tierra con  $S_{11} \leq -6dB$  sin realizar ningún cambio en el sistema de antena. Sin embargo, la antena monopolo sólo se puede reutilizar en un **4.6%**. Además, la antena *Booster* presenta mejores eficiencias totales de hasta 2.3 dB y es más robusta frente a variaciones de la permitividad del sustrato.

Por lo que la antena *Booster* es un diseño robusto y versátil que permite reducir el tiempo de diseño de dispositivos IoT y además simplifica la fase de fabricación.

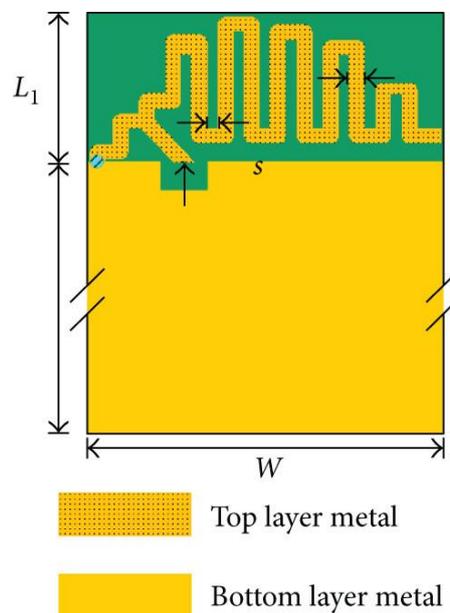
## 2.5 Otros tipos de antenas para IoT

En este apartado se han querido mostrar otros trabajos de investigación sobre distintos tipos de antenas útiles para IoT.

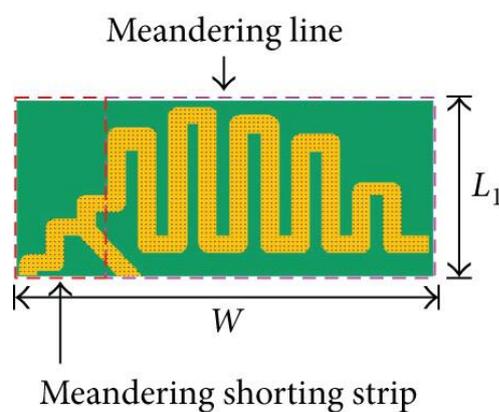
El primero de los artículos descritos muestra una geometría que ha servido de inspiración para la realización de los diseños mostrados en este trabajo.

**Trabajo: “Miniaturized Printed Inverted-F Antenna for Internet of Things: A Design on PCB with a Meandering Line and Shorting Strip” [3]**

En este artículo se propone un diseño de antena PIFA miniaturizado y adecuado para IoT y otras aplicaciones de la banda ISM. La antena impresa tiene una geometría de meandro serpenteante con una tira en cortocircuito. La geometría de la antena es:



**Figura 14.** Antena PIFA



**Figura 15.** Antena con línea serpenteante y tira de cortocircuito

La antena está simulada y diseñada en una PCB de tipo FR4 con constante dieléctrica de valor 4.6 y con un espesor de la PCB de 0.3 mm. La geometría serpenteante aumenta la eficiencia, pero con la desventaja de conseguir un ancho de banda más estrecho. Con el segmento en cortocircuito se consigue aumentar el ancho de banda. Si el segmento serpenteante usa un patrón logarítmico periódico, se mejora la adaptación de impedancia de la antena.

El tamaño de la antena es reducido, en concreto el área de la antena es de  $15 \times 6 \text{ mm}^2$  y el área del plano de masa es de  $15 \times 30 \text{ mm}^2$ . En los resultados de simulación y experimentales se observa que el valor de  $S_{11} \leq -35 \text{ dB}$  en la banda ISM.

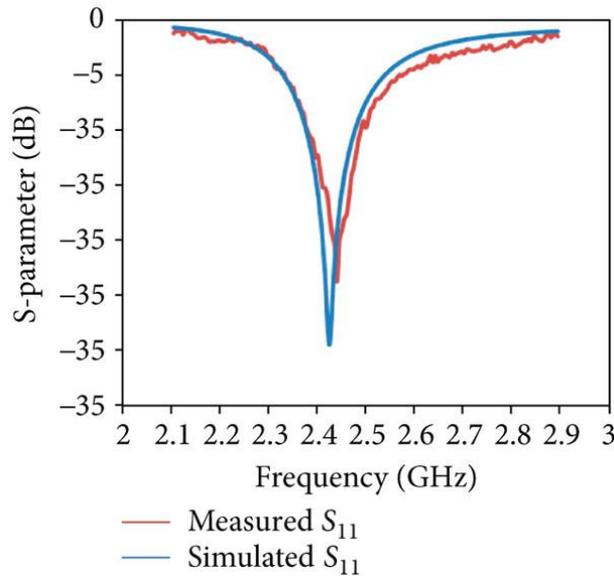


Figura 16.  $S_{11}$  simulado y medido PIFA

Como conclusión del trabajo se tiene que el resultado de la medición de los rendimientos de ganancia y pérdida de retorno ha demostrado que son mejores en comparación con las antenas LTCC (Cerámica de Baja Temperatura Cocida), Walsin y Murata, y además no se requieren componentes adicionales para una buena adaptación de impedancia. Este tipo de antenas se pueden utilizar para aplicaciones IoT que utilicen la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE) en la banda ISM.

Antena	Tipo	Volumen (incluya la red coincidente)	Componentes adicionales
PIFA propuesta	tarjeta de circuito impreso	$15 \times 6,0 \times 0,035 \text{ mm}^3$	No se requiere costo adicional
Walsin	LTCC	$12 \times 5,0 \times 1,2 \text{ mm}^3$	1 antena y 2 componentes pasivos
Murata	LTCC	$12 \times 5,0 \times 1,2 \text{ mm}^3$	1 antena y 2 componentes pasivos

Figura 17. Comparación entre las antenas PIFA, Walsin y Murata

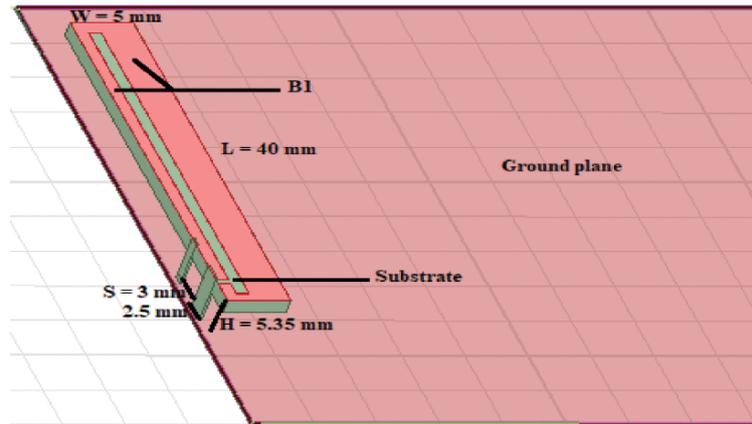
Puesto que en este trabajo no se valora la reusabilidad de la antena para diferentes tamaños del plano de masa, se considera como un punto de partida para ampliarlo.

**Trabajo: “Efficient dual-band PIFA antenna for the Internet of Things (IoT)” [4]**

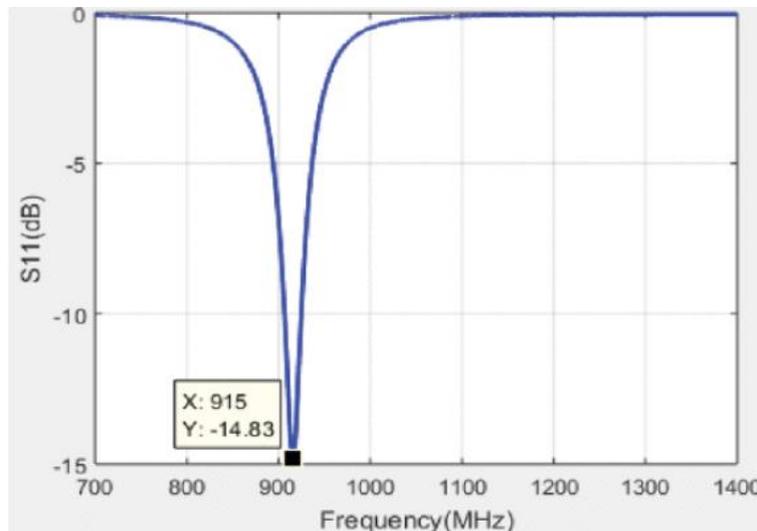
En este artículo se realiza el diseño y optimización de una antena con geometría planar invertida- F (PIFA) de doble banda.

El tamaño de la antena propuesto es reducido, de  $40 \times 5 \times 5.35 \text{ mm}^3$  y la banda de frecuencias en la que opera es la banda ISM sin licencia de 868 a 915 MHz.

En primer lugar, se diseña la antena para banda única, de modo que el siguiente diseño está optimizado en la banda de 915 MHz.

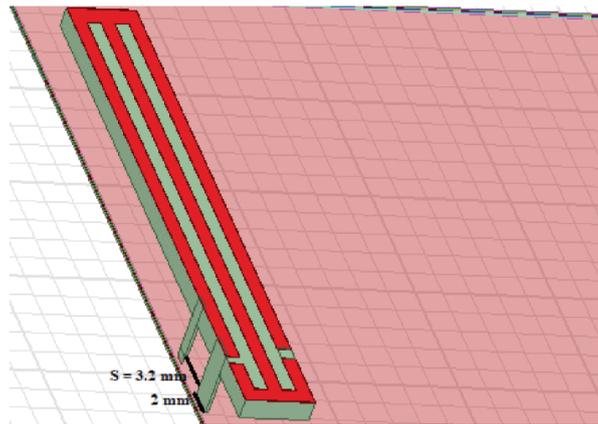


**Figura 18.** Antena PIFA de banda única



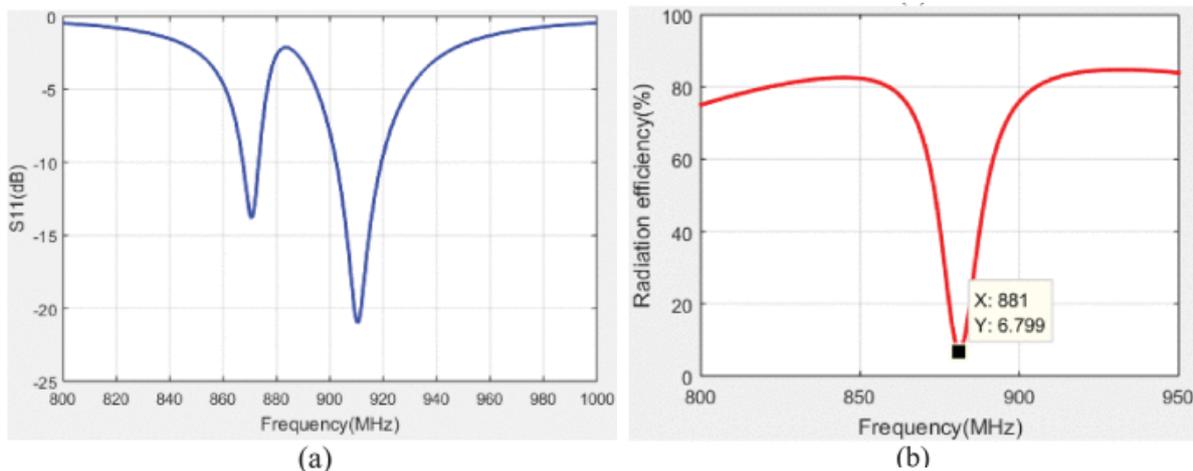
**Figura 19.** Coeficiente de reflexión de antena PIFA

Posteriormente, se modifica la geometría para conseguir comportamiento de banda dual. El método utilizado es la agregación de ranuras al diseño original y la agregación de una red de adaptación compuesta por un capacitor de 0.8 pF. Con estas modificaciones se consigue una segunda frecuencia de resonancia a 868 MHz.



**Figura 20.** Estructura de la PIFA de doble banda optimizada

En los resultados de simulación y experimentales se observa que el valor de cumple  $S_{11} \leq -20 \text{ dB}$  para 915 MHz y  $S_{11} \leq -14 \text{ dB}$  para 868 MHz



**Figura 21.** Coeficiente de reflexión (a) y eficiencia de radiación (b)

En el trabajo se ha obtenido el diseño de una antena PIFA meandro impreso cuya longitud se ha optimizado para funcionar a una frecuencia de 915 MHz con una buena adaptación y una alta eficiencia de radiación. Se ha modificado este diseño con una segunda rama conectada al PIFA serpenteante y cargada por un condensador de 0.8pF que ha permitido crear una segunda resonancia a 868MHz pero con una caída de la eficiencia de radiación cerca de la banda y esto provoca una reducción del ancho de banda. Para aumentar esta eficiencia, se ha optimizado el ancho del cortocircuito y la distancia entre el cortocircuito y la tira de alimentación. La estructura final presenta una buena adaptación de impedancia y una alta eficiencia de radiación.

BW at 868 MHz	BW at 915 MHz	$\eta_{\text{rad}}$ at 868 MHz	$\eta_{\text{rad}}$ at 915 MHz
13 MHz	29 MHz	69 %	83 %

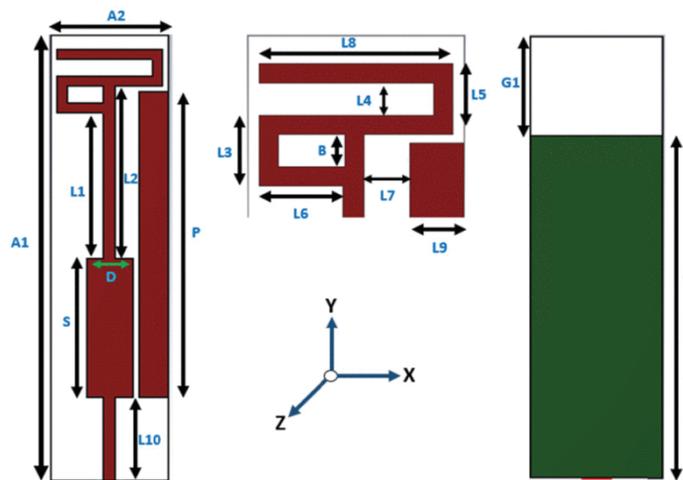
**Figura 22.** Ancho de Banda y eficiencia de radiación PIFA optimizada

Los casos de uso de esta antena son para aplicaciones IoT en las dos bandas y en este *paper* tampoco se ha valorado la reusabilidad.

**Trabajo: “A Modified Meander Line Microstrip Patch Antenna With Enhanced Bandwidth for 2.4 GHz ISM-Band Internet of Things (IoT) Applications” [5]**

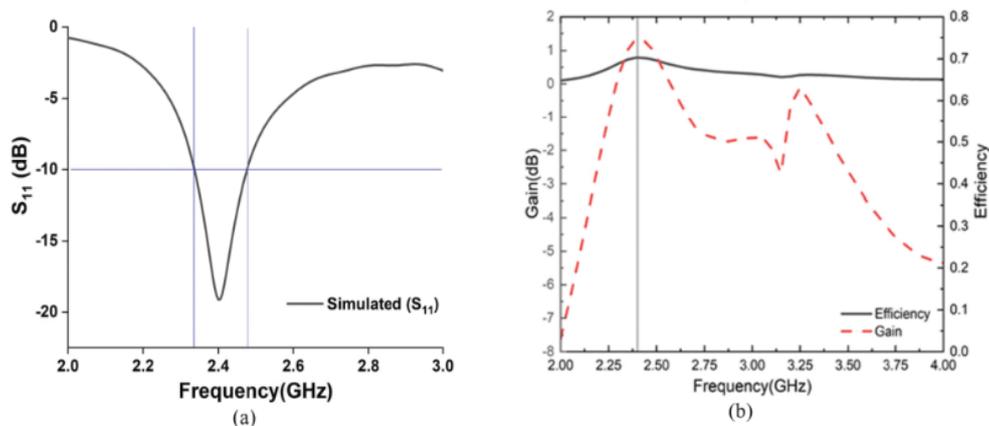
En este trabajo se analiza una antena con geometría de parche *microstrip* con línea en forma de meandro con ancho de banda mejorado para aplicaciones IoT en la banda ISM de 2.4 GHz.

La dimensión de la antena es reducida, en concreto, su tamaño para el área de la antena es de 40 x 10 mm<sup>2</sup> y para el plano de masa es de 31 x 9 mm<sup>2</sup>.



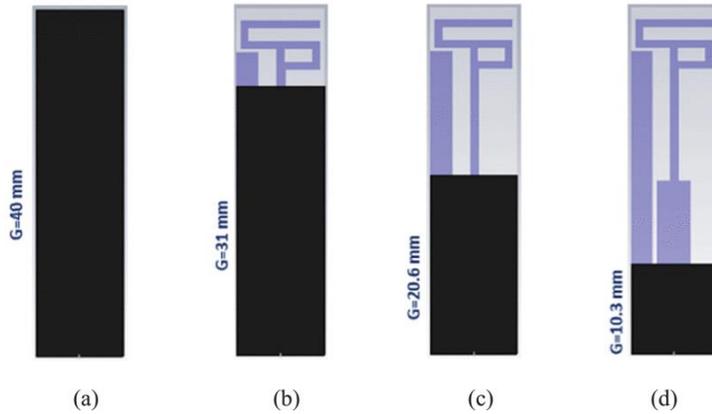
**Figura 23.** Geometría parche microstrip meandro

El coeficiente de reflexión en simulación da unos valores  $S_{11} \leq -19 \text{ dB}$  para 2.4 GHz



**Figura 24.** Coeficiente reflexión simulado (a) y Eficiencia y ganancia (b)

En el trabajo se realizan diversos análisis paramétricos: para diferentes tamaños de la carga S, para diferentes tamaños de parche parásito P, para diferentes tamaños de la estructura B y finalmente, el más interesante, también se realiza el análisis paramétrico para distintos tamaños de plano de masa y se obtienen los resultados:



**Figura 25.** Análisis paramétrico para diferentes tamaños de plano de masa

Uno de los análisis paramétricos realizados en este estudio es validar el mismo diseño de antena para distintos tamaños planos de masa. Así pues, se consigue determinar que la ganancia es mayor que la de antenas ya comerciales en algunos casos y que el coeficiente de reflexión se mantiene en valores aceptables siendo  $S_{11} \leq -8.5 \text{ dB}$  en el peor de los casos.

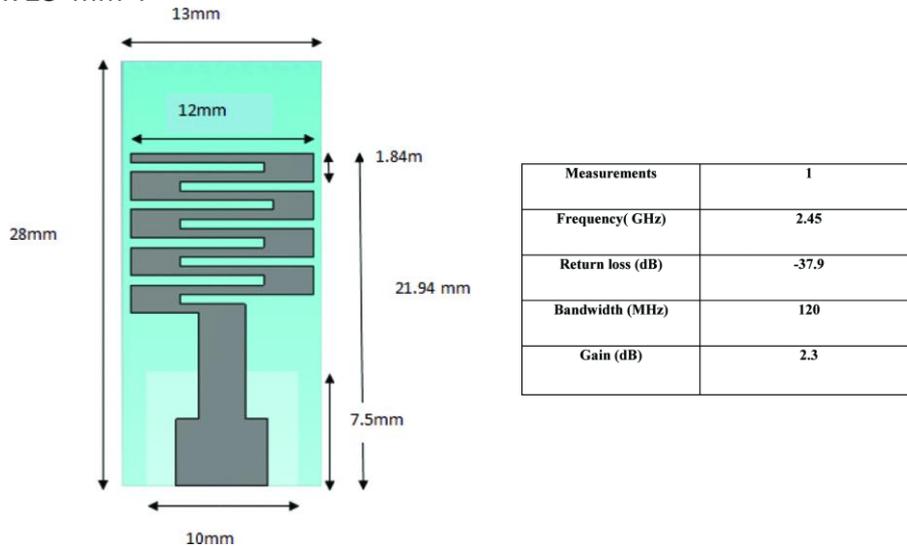
Properties	Antenna 10	Proposed	Antenna 11	Antenna 12
Frequency (GHz)	4.06	2.40	2.34	2.3
$S_{11}$ (dB)	-27.19	-19.11	-20.74	-8.5
Bandwidth (MHz)	69	146	114	Not Applicable (Below -10dB)
Radiation Efficiency	07	79	79	71
Realized Gain (dB)	-7.3	1.347	1.35	0.73

**Figura 26.** Análisis para distintos planos de masa

Como casos de uso de esta antena se ha validado que puede ser utilizada en sensores IoT a 2.4 GHz en la banda industrial, científica y médica (ISM).

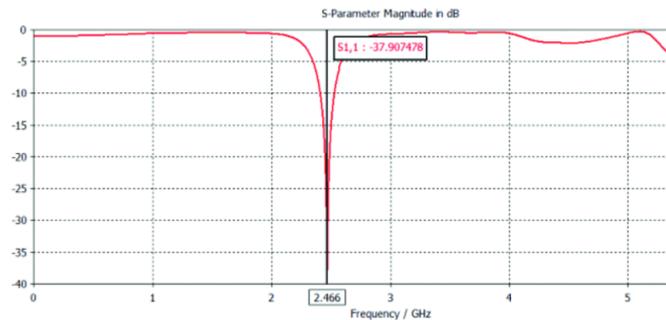
**Trabajo: “Design of meander line antenna for wearable applications” [6]**

Para finalizar la revisión el Estado del Arte, se ha querido incluir este trabajo como ejemplo de caso de uso de antena en forma de meandro, aunque sea para aplicaciones WLAN. La antena propuesta aquí tiene geometría de línea de meandro y está diseñada para funcionar a la frecuencia de 2.45 GHz para aplicaciones de WLAN. Su tamaño es reducido, en concreto, el área de la antena mide 12 x 21.94 mm<sup>2</sup> y el área del plano de masa 13 x 28 mm<sup>2</sup>.



**Figura 27.** Antena meandro WLAN

La banda de frecuencias de funcionamiento es la banda industrial, científica y médica (ISM) 2.4 GHz. En el resultado de simulación se puede observar que llega a  $S_{11} \leq -37.9\text{dB}$ .



**Figura 28.** Coeficiente de reflexión

En resumen, la antena de línea de meandro presentada en este trabajo destaca por ser compacta y portátil. Su diseño ofrece un buen rendimiento con un coeficiente de reflexión simulado es  $-37,9\text{ dB}$ . La antena opera en la banda de frecuencia de 2,40 – 2,52 GHz, proporcionando un ancho de banda de 120 MHz. Esta antena es ideal para aplicaciones WLAN a 2.45 GHz y se adapta perfectamente como antena portátil.

## 3. Diseño antenas meandro y reusabilidad

### 3.1. Enfoque de la solución

El presente capítulo consta de varias partes,

En primer lugar, se justifica la geometría de la antena seleccionada en CST.

En segundo lugar, se aportan algunas notas breves sobre el funcionamiento de CST y las principales funcionalidades que se utilizarán a lo largo del capítulo para realizar los diseños de antenas.

A continuación, siguen dos capítulos en los que se mostrará el diseño seleccionado y un segundo diseño elegido para ampliar la información.

En el siguiente capítulo se explicará la utilidad de CST para automatizar simulaciones mediante macros.

En el penúltimo capítulo se obtendrá el Mapa de Calor a partir de la creación de un script de Matlab y obteniendo los datos con el fichero exportado desde CST.

El último punto se dedicará al estudio de la reusabilidad y a comparar los diseños seleccionados con los parámetros de las antenas comerciales.

### 3.2. Elección del tipo de antena a diseñar en CST y justificación

En este proyecto se quiere realizar el diseño y análisis de una antena impresa con geometría de meandro serpenteante y que sea capaz de operar en la banda ISM de 2.4 GHz. Es por ello que la antena debe tener su frecuencia de resonancia en torno a los 2.45 GHz y debe presentar adaptación de impedancias.

La justificación de la elección del diseño de antena impresa con una línea serpenteante en forma de meandro y una tira en cortocircuito, es para obtener un diseño que no requiera del uso de una red de adaptación con elementos pasivos. Esta elección da ventaja en cuanto a facilitar la integración y la posibilidad de reducir el tamaño del dispositivo. En este sentido se ha partido de un diseño muy similar al mostrado en [3].

### 3.3. Breves notas de uso de CST

La herramienta software de diseño utilizada en este proyecto es **CST Studio Suite 2023 (Student Edition)** cuya licencia es gratuita para estudiantes mediante el correo de la universidad. Este software se utiliza para simulación electromagnética y en concreto esta versión está diseñada específicamente para estudiantes. Consta de un paquete de herramientas de simulación muy utilizado en aplicaciones como: el diseño y análisis de antenas, simulación de componentes de RF y microondas, estudio de compatibilidad

electromagnética (EMC), modelado de dispositivos ópticos y en determinados análisis de interferencias de sistemas eléctricos.

En el caso de este proyecto se utiliza para el diseño 3D de la antena, la realización de las simulaciones en el dominio del tiempo y la visualización de resultados mediante la Carta de Smith, el coeficiente de reflexión o las eficiencias de radiación de la antena y total. Además, se hará uso de la librería de materiales y de determinadas herramientas de post-procesado como son las macros o el exportado del resultado de las simulaciones.

La documentación de CST es muy completa y detallada, por lo que en este apartado solamente se pretende dar una breve guía para comenzar a utilizar CST para el diseño de antenas.

En primer lugar, se debe crear una plantilla de proyecto, que en nuestro caso particular de diseño de antena impresa con forma de meandro ha de ser:

New -> Create Project Template -> Microwaves & RF/Optical -> Antennas

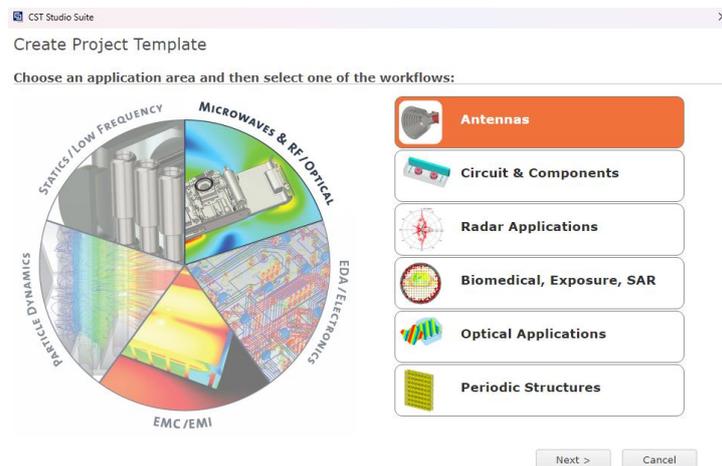


Figura 29. CST Create Template

Según el tipo de diseño que se quiera realizar, se deberá elegir una u otra plantilla. En este caso se debe seleccionar “Planar (Patch, Slot, etc)”

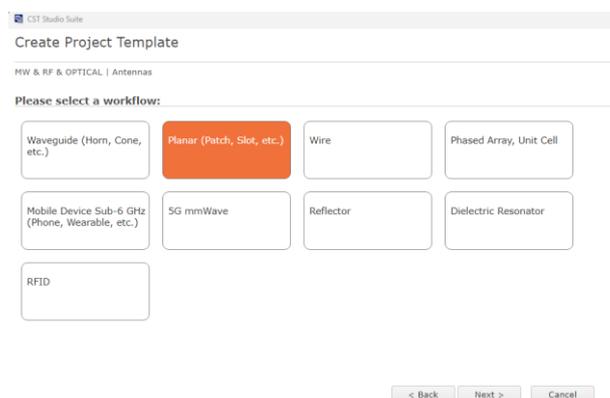


Figura 30. CST Workflow

El análisis a realizar será en el dominio del tiempo:

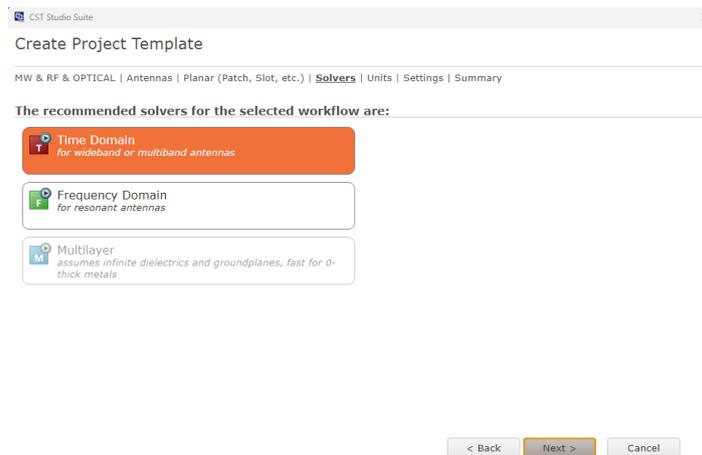


Figura 31. CST Time Domain

Se seleccionan las unidades:

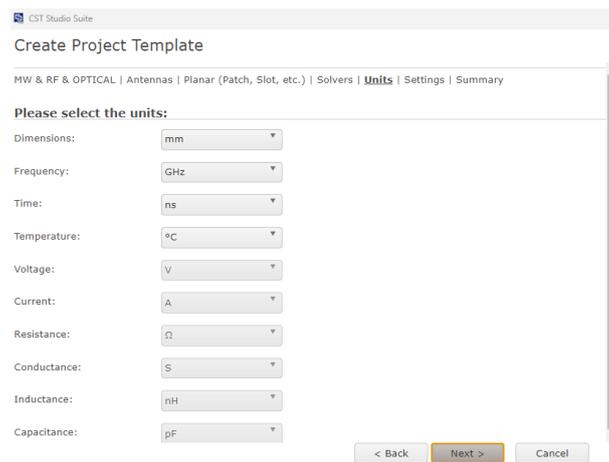


Figura 32. CST Select Units

Se selecciona el rango de frecuencias de interés y los monitores para la simulación:

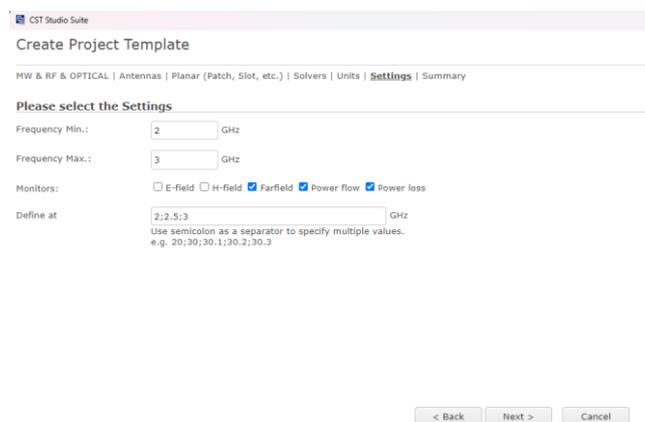


Figura 33. CST Settings

Con esto se abre un nuevo proyecto y ya se puede comenzar a diseñar la antena en 3D. El diseño de una antena se hace utilizando las opciones del menú “Modeling” y aunque resulta complejo detallar todo el diseño completo, se tratará de dar unas nociones para que sirvan de punto de partida. Se realiza como ejemplo la creación del sustrato:

En primer lugar, se crea un sólido con la “shape” llamada “Brick”:

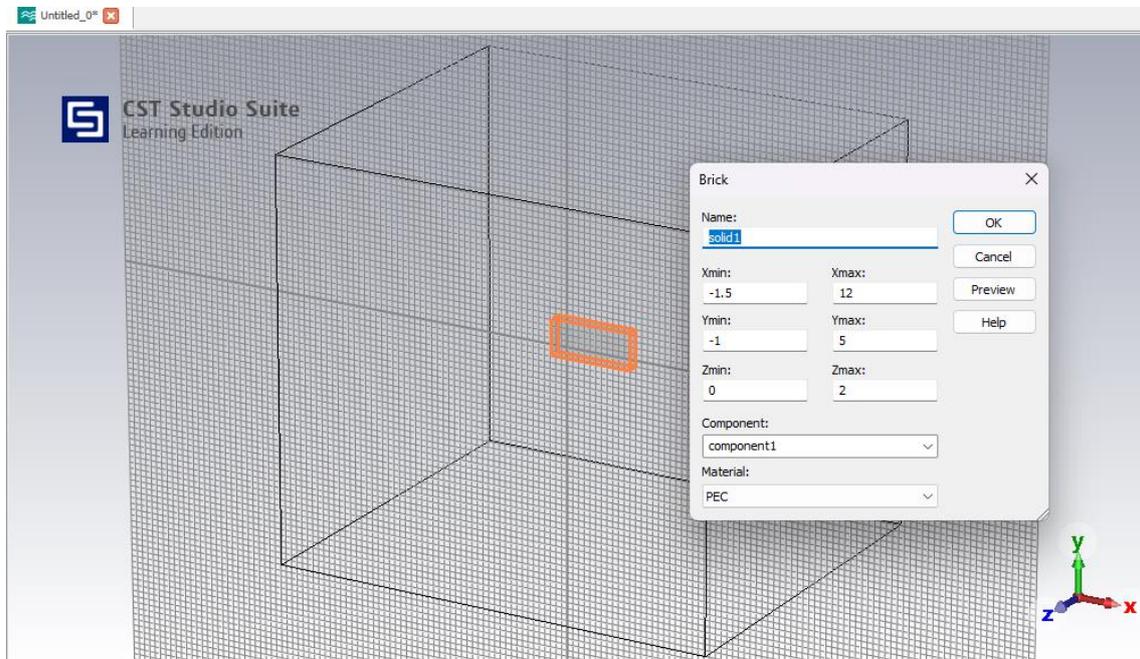


Figura 34. CST Brick

Para que sea más eficiente el diseño, se pueden utilizar variables para las dimensiones llamadas parámetros, estas se incluyen en la propia creación del sólido. Así para crear un sustrato de tamaño  $L_s$  de largo y  $W_s$  de ancho, con  $H_s$  de grosor y material FR-4, se debería configurar:

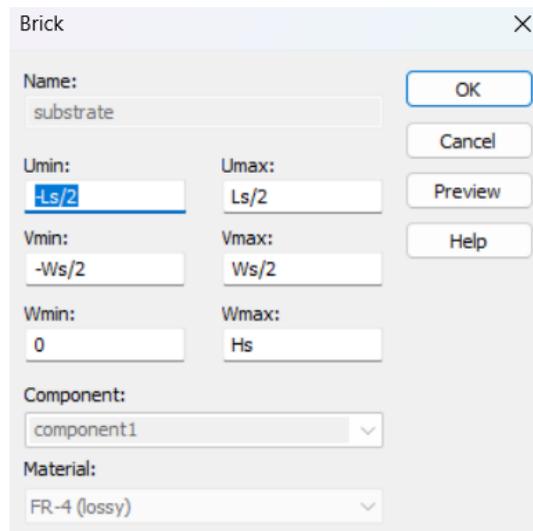


Figura 35. CST Brick dimensions

Cuando se da a “Ok” una ventana emergente va solicitando los valores y descripción de los parámetros:

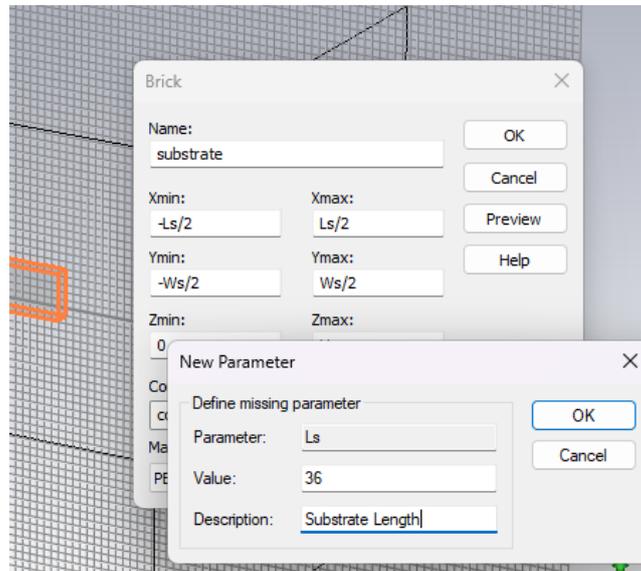


Figura 36. CST Define Parameter

Es mucho mejor trabajar con parámetros porque si posteriormente se quieren utilizar las macros para automatizar simulaciones o simplemente cambiar rápidamente las dimensiones de algún objeto, esto facilita la tarea.

También se debe seleccionar el material del sustrato y para ello se ha de cargar de la librería de materiales:

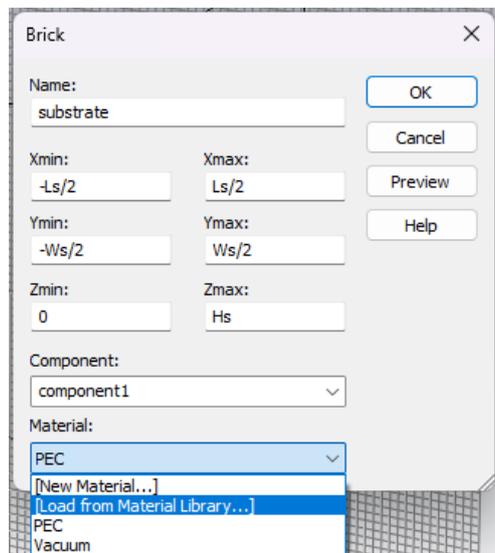


Figura 37. CST Load from Material Library

Y se debe buscar por nombre y seleccionar el material:

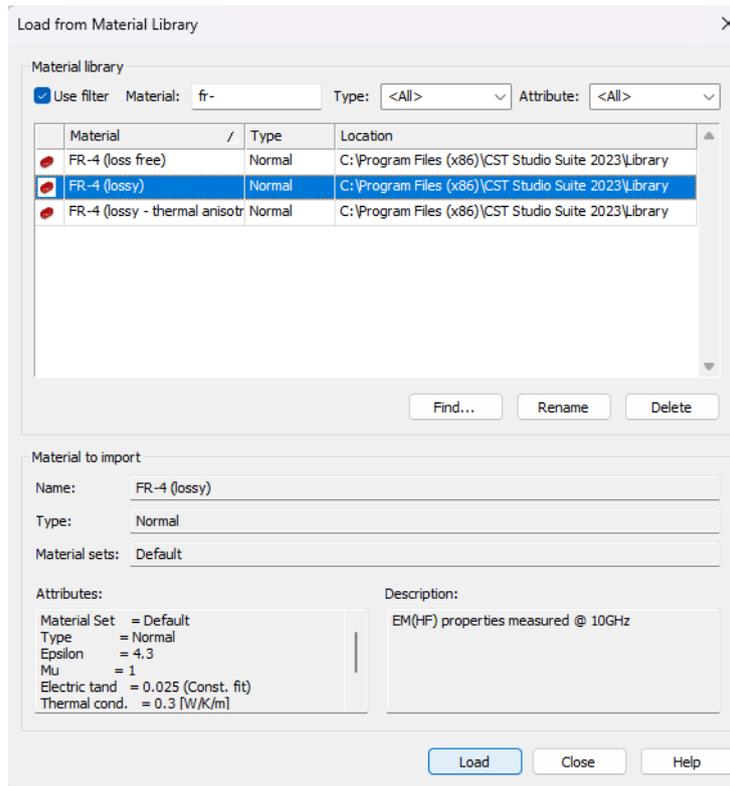


Figura 38. CST Select Material

Ahora ya se ha diseñado el sustrato y se puede ver en el "Parameter List" las variables:

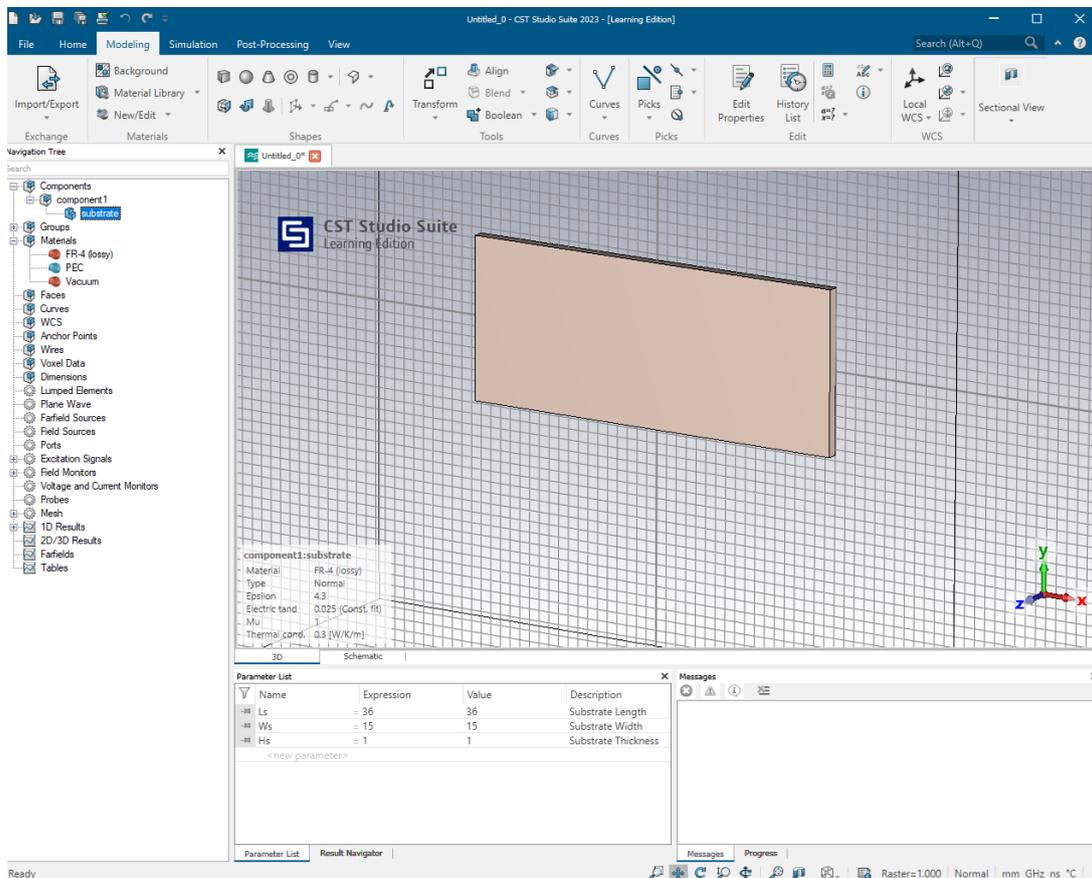


Figura 39. CST Substrato

Es conveniente utilizar las coordenadas relativas para ir añadiendo el resto de los elementos al diseño, se seleccionan con la opción “Local WCS”:

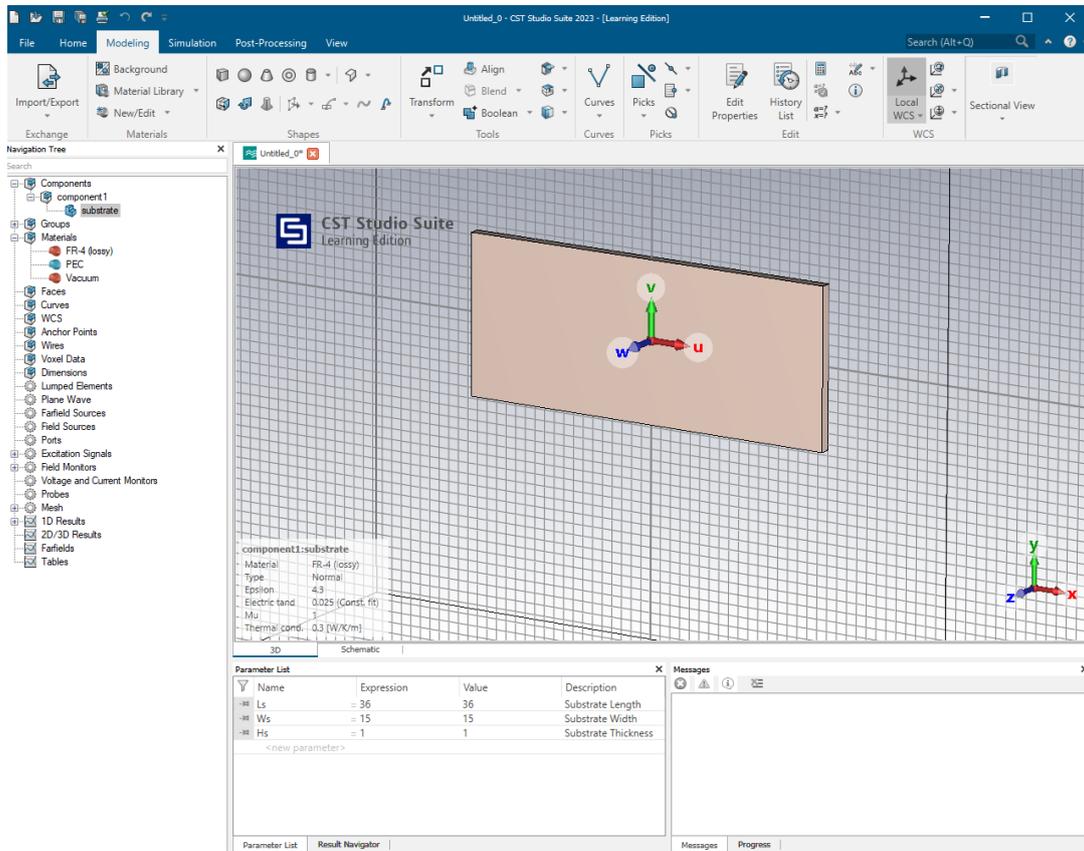


Figura 40. CST Local WCS

También es interesante utilizar “Picks” para ir seleccionando caras, lados o puntos en el diseño, de modo que se puedan ir añadiendo los distintos elementos:

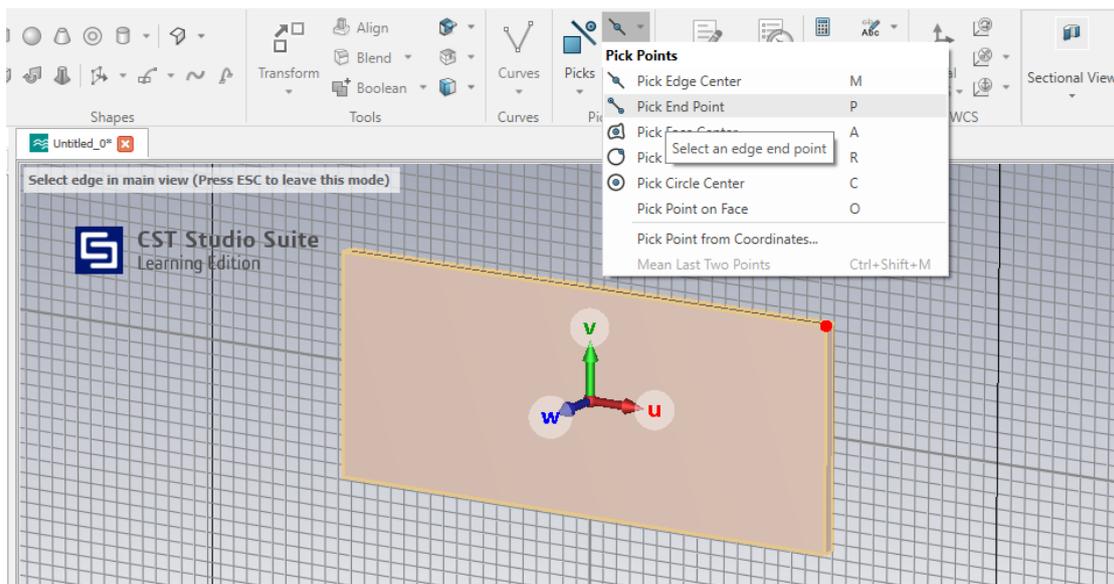


Figura 41. CST Picks

### 3.4. Diseño de la antena meandro

El proceso de diseño que se ha utilizado es el comentado anteriormente, mediante el “Modeler 3D” de CST se ha configurado la estructura de antena con variables para poder optimizar los cambios y realizar más eficientemente las simulaciones.

El diseño de la antena seleccionado es del de antena impresa con forma de meandro serpenteante y tira en cortocircuito con el fin de conseguir adaptación de impedancias sin requerir de una red de adaptación de elementos pasivos.

El diseño está inspirado en [3] pero con los parámetros, dimensiones y materiales diferentes. El proceso de diseño ha sido partir de un diseño preliminar e ir ajustándolo hasta conseguir un diseño óptimo.

#### Diseño preliminar

Se implementa el diseño seleccionado en CST con los parámetros:

**Material substrato:** FR4 1 mm de grosor

constante dieléctrica  $\epsilon_r = 4.15$

tangente de pérdidas  $\tan\delta = 0.017$

**Material conductor:** cobre 0.035 mm de grosor

conductividad  $\sigma = 5.9 \cdot 10^7$  S/m

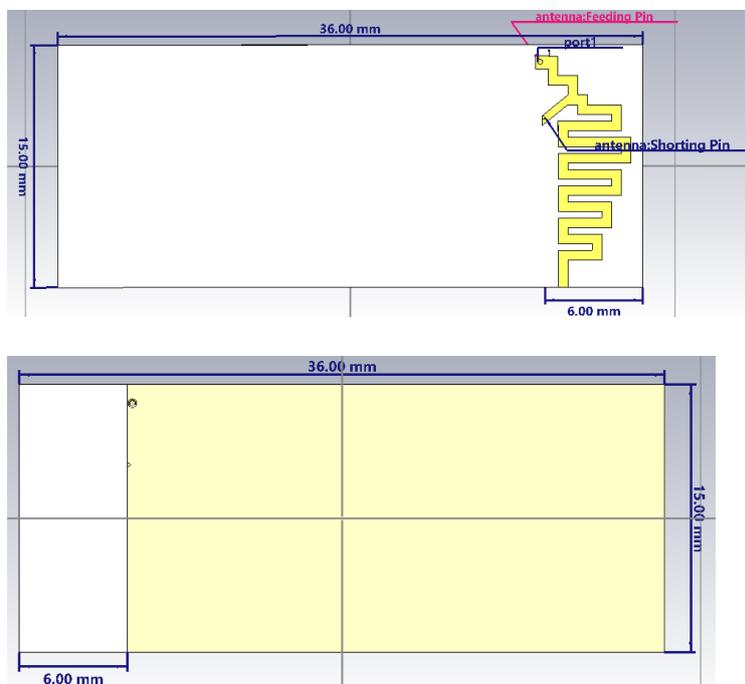


Figura 42. Diseño preliminar meandro

Se realizan las primeras simulaciones y se observa que a la frecuencia de 2.55GHz la antena tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -11.8 \text{ dB}$

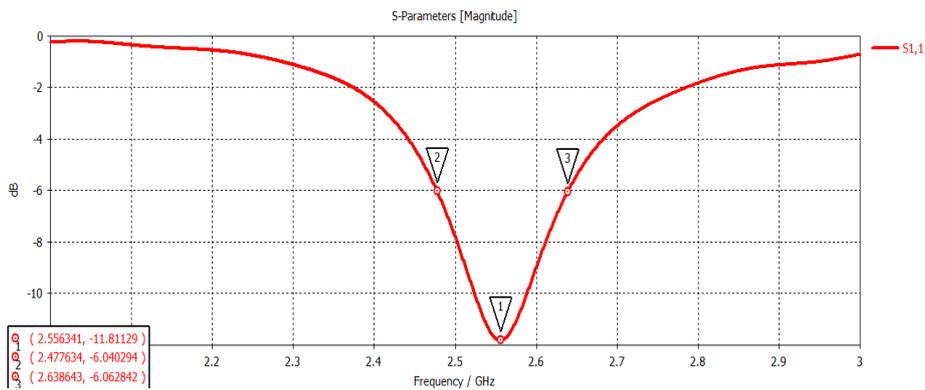


Figura 43.  $S_{11}$  diseño preliminar meandro

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.64 - 2.47}{\frac{2.64 + 2.47}{2}} \cdot 100 = 6.65\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:

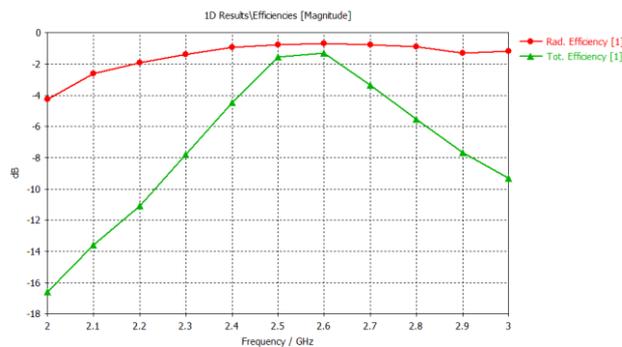


Figura 44. Eficiencias diseño preliminar meandro

Se observa en la Carta de Smith que el diseño no presenta adaptación de impedancias:

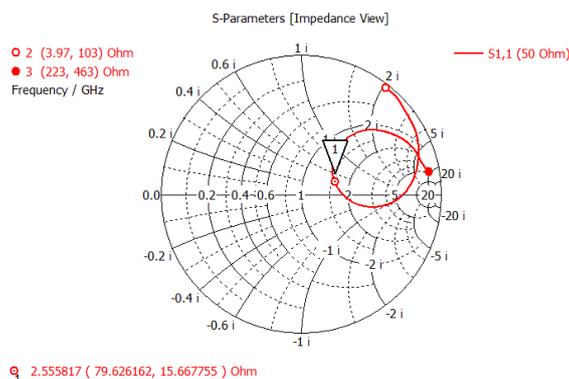


Figura 45. Carta Smith diseño preliminar meandro

A continuación, se realizan diversos diseños modificando el diseño preliminar hasta conseguir llegar a un modelo en el que se está prácticamente en adaptación de impedancias. Se enumeran algunos de ellos, aunque en la realidad la cantidad de diseños y pruebas ha sido muchísimo más elevada de las que se puedan mostrar en la memoria.

### Diseño modificado 1

Partiendo del diseño inicial, se intercambian *shorting pin* y *feeding pin*, así como se prolongan las pistas del meandro en forma serpenteante y el *strip* en cortocircuito. Se observa que mejora el ancho de banda de la antena, pero todavía no se logra adaptación:

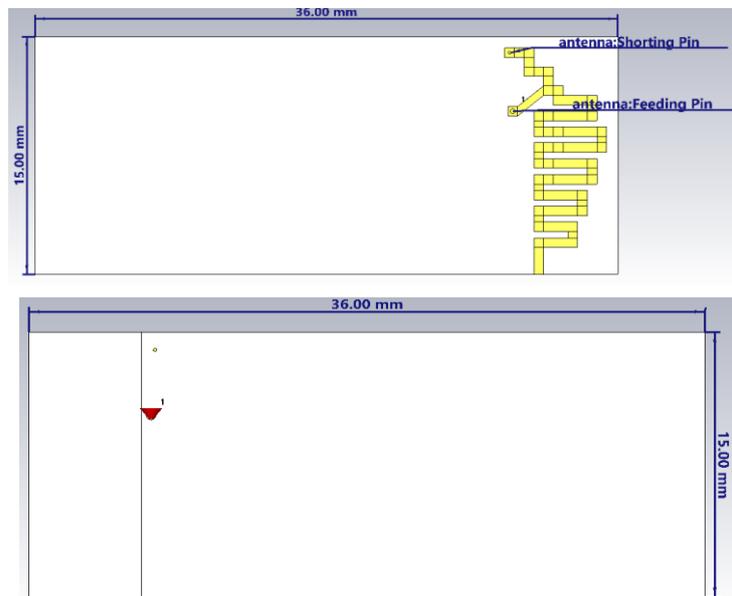


Figura 46. Diseño modificado 1

Se simula el diseño y se observa que a la frecuencia de 2.73GHz la antena tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -13.67 \text{ dB}$

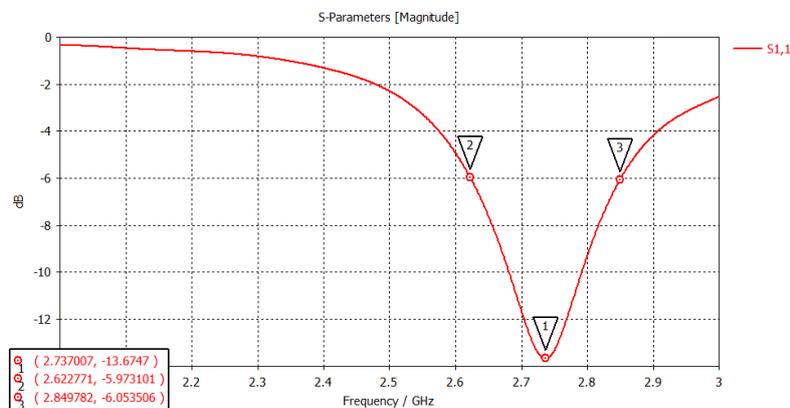


Figura 47. S<sub>11</sub> Diseño modificado 1

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.85 - 2.62}{\frac{2.85 + 2.62}{2}} \cdot 100 = 8.41\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:

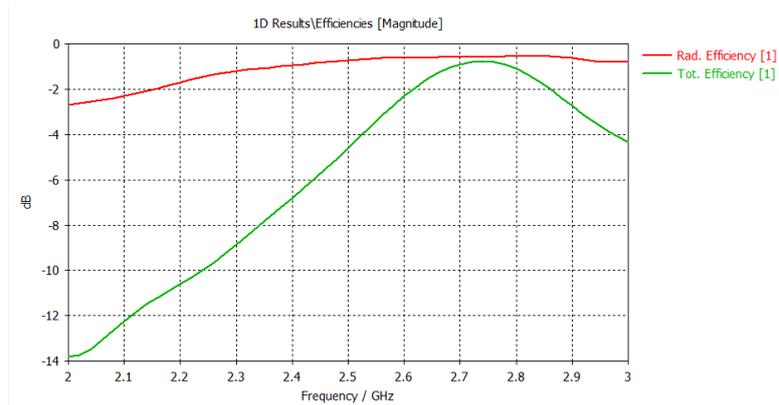


Figura 48. Eficiencia radiación y total diseño modificado 1

Se observa en la Carta de Smith que el diseño no presenta adaptación de impedancias, aunque la frecuencia central está más cerca del centro de la carta.

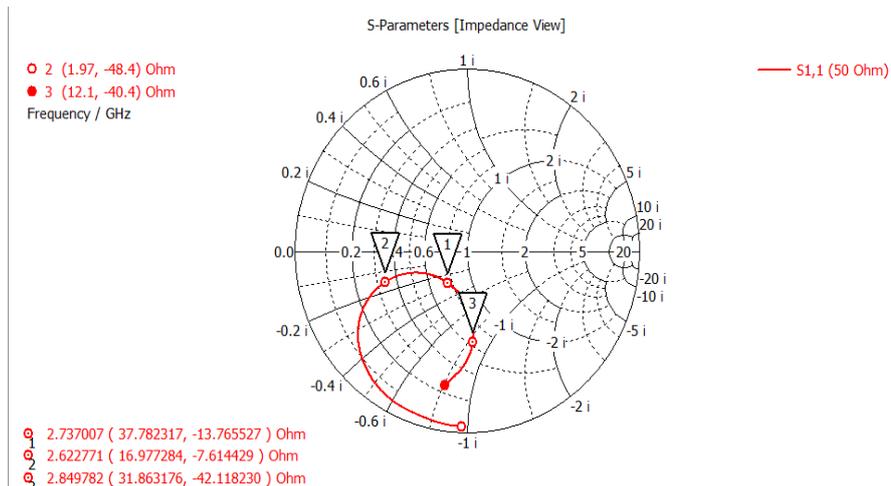


Figura 49. Carta Smith diseño modificado 1

## Diseño modificado 2

Partiendo del diseño inicial, se implementa un cortocircuito en *shorting* con meandro para simular reactancia en paralelo y mover en la Carta de Smith la frecuencia de resonancia al centro.

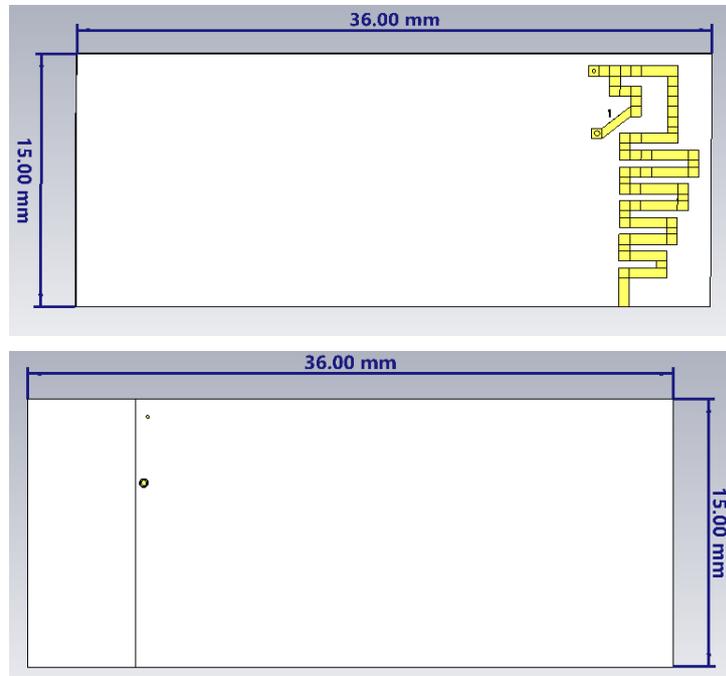


Figura 50. Diseño modificado 2

Se simula el diseño y se observa que a la frecuencia de 2.31GHz la antena tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -44 \text{ dB}$

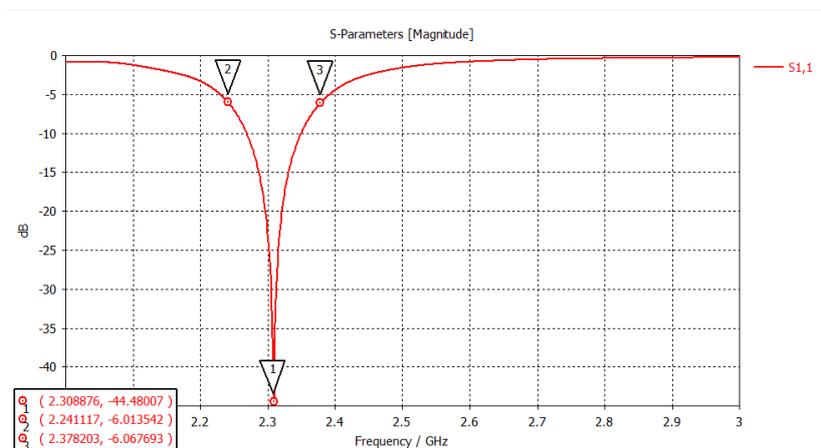


Figura 51.  $S_{11}$  Diseño modificado 2

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.38 - 2.2}{\frac{2.38 + 2.2}{2}} \cdot 100 = 7.8\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:

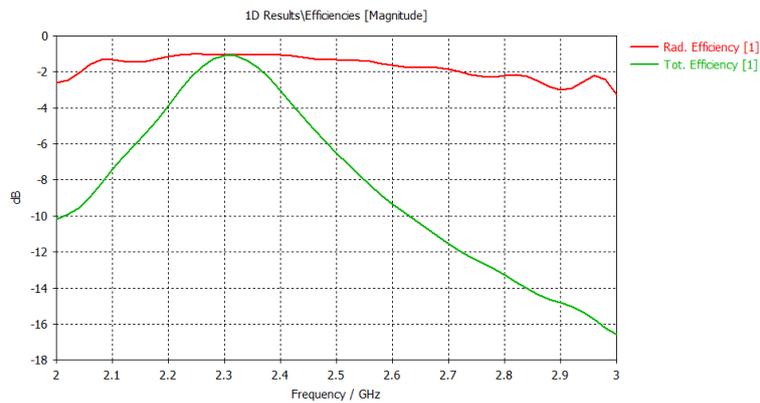


Figura 52. Eficiencia radiación y total diseño modificado 2

Se observa en la Carta de Smith que el diseño sí presenta adaptación de impedancias:

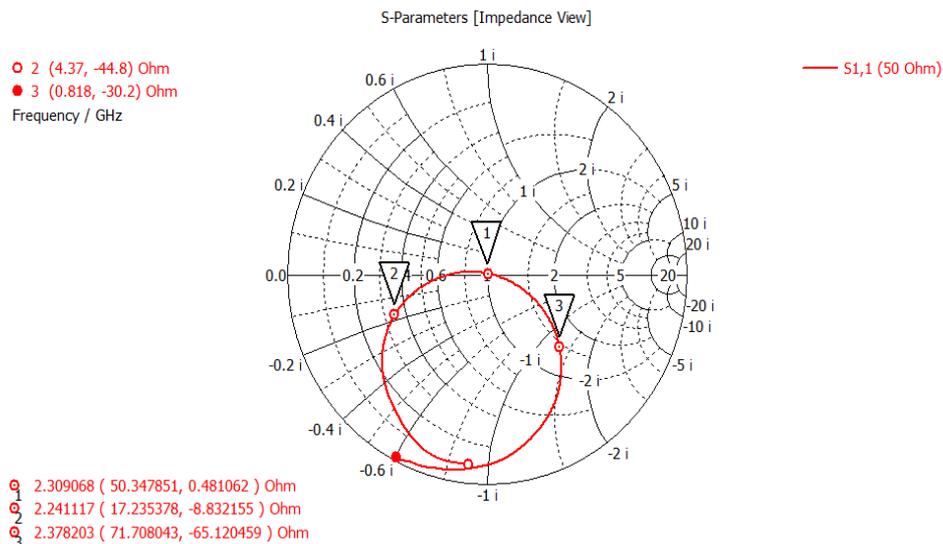


Figura 53. Carta Smith diseño modificado 2

En este diseño se observa que empeora ligeramente el ancho de banda de la antena, pero se consigue adaptación.

### Diseño modificado 3

Partiendo del diseño inicial, se implementa un cortocircuito en *shorting* pero con otra configuración distinta a la anterior, para simular reactancia en paralelo y mover en la Carta de Smith la frecuencia de resonancia al centro.

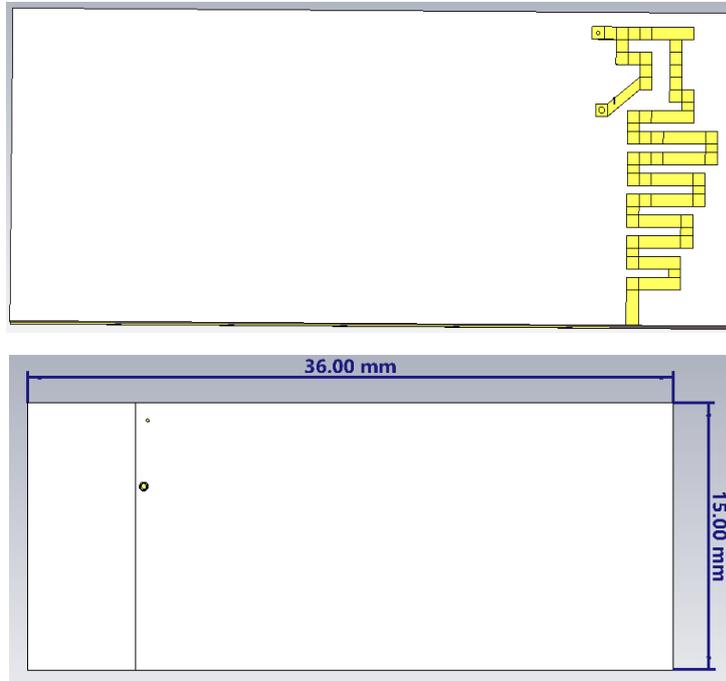


Figura 54. Diseño modificado 3

Se simula el diseño y se observa que a la frecuencia de 2.39GHz la antenna tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -23 \text{ dB}$

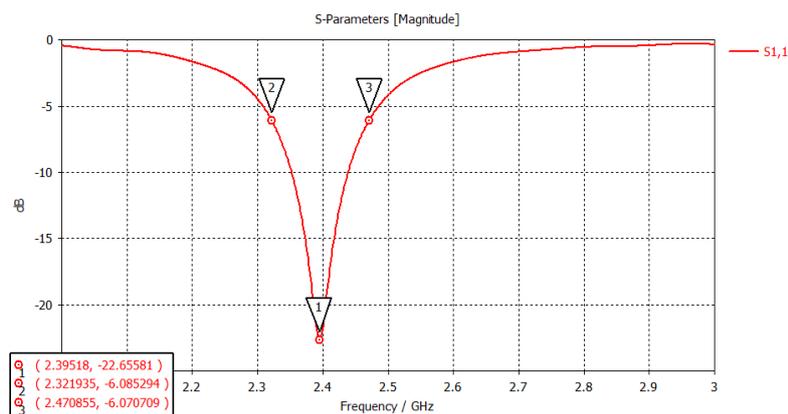


Figura 55.  $S_{11}$  Diseño modificado 3

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.47 - 2.32}{\frac{2.47 + 2.32}{2}} \cdot 100 = 6.3\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:

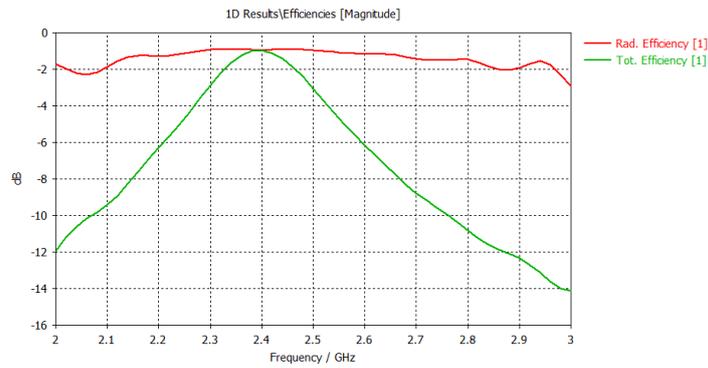


Figura 56. Eficiencia radiación y total diseño modificado 3

Se observa en la Carta de Smith que el diseño sí presenta adaptación de impedancias:

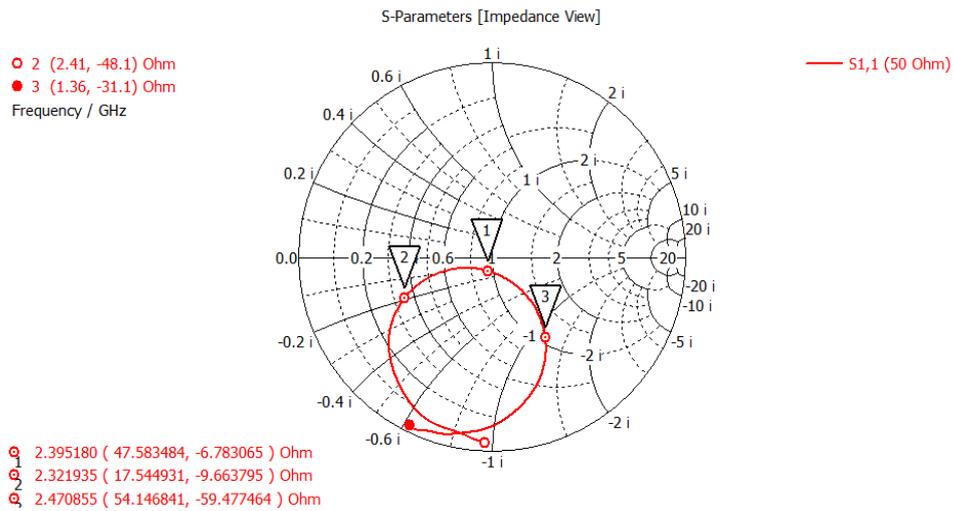


Figura 57. Carta Smith diseño modificado 3

En este diseño se observa que mejora ligeramente el ancho de banda de la antena, se llega a una frecuencia cercana a 2.4 GHz pero no se consigue adaptación.

#### Diseño modificado 4

Partiendo del diseño inicial, se implementa un cortocircuito en *shorting* con otra configuración diferente, para simular reactancia en paralelo y mover en la Carta de Smith la frecuencia de resonancia al centro.

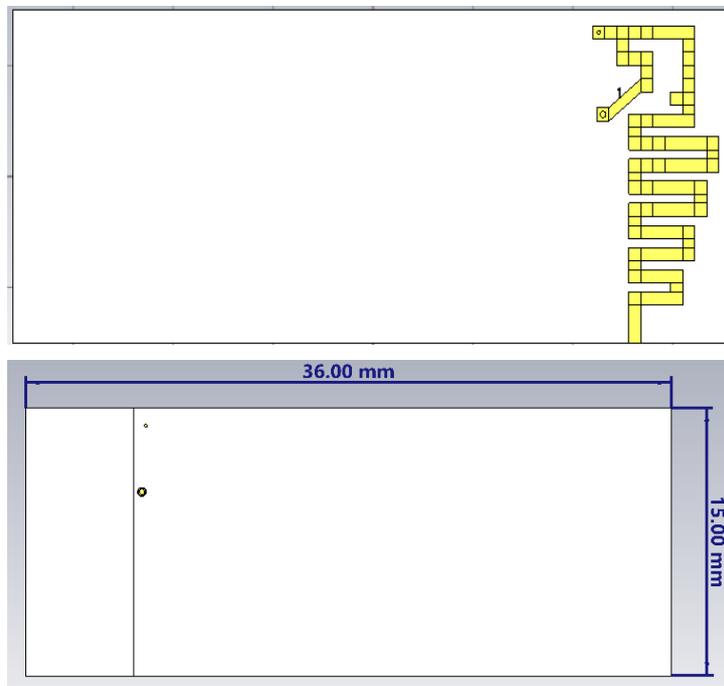


Figura 58. Diseño modificado 4

Se simula el diseño y se observa que a la frecuencia de 2.32 GHz la antena tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -41 \text{ dB}$

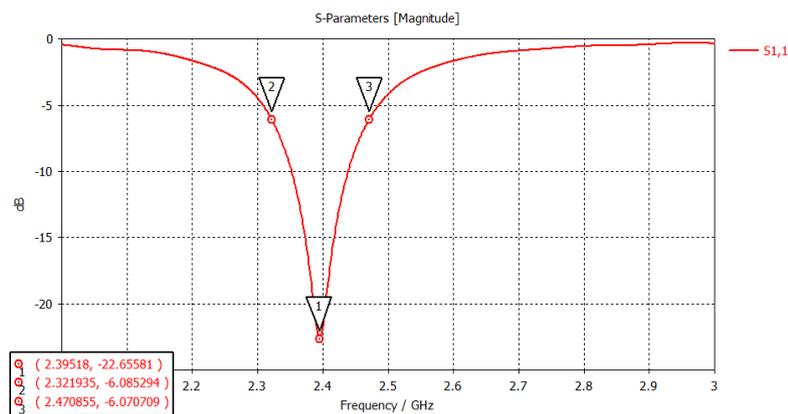


Figura 59. S<sub>11</sub> Diseño modificado 4

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.39 - 2.25}{\frac{2.39 + 2.25}{2}} \cdot 100 = 6\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:

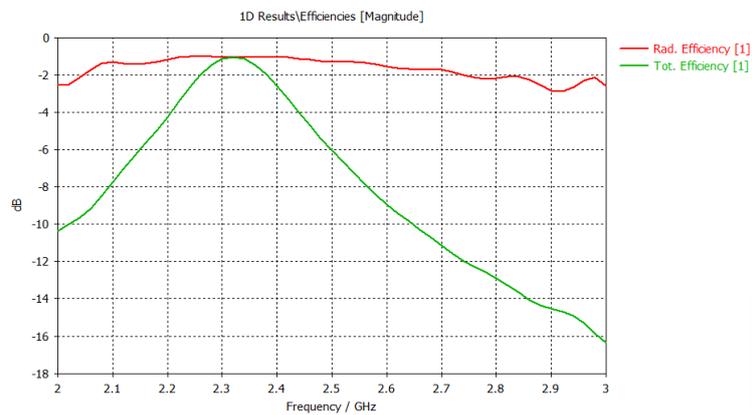


Figura 60. Eficiencia radiación y total diseño modificado 4

Se observa en la Carta de Smith que el diseño sí presenta adaptación de impedancias:

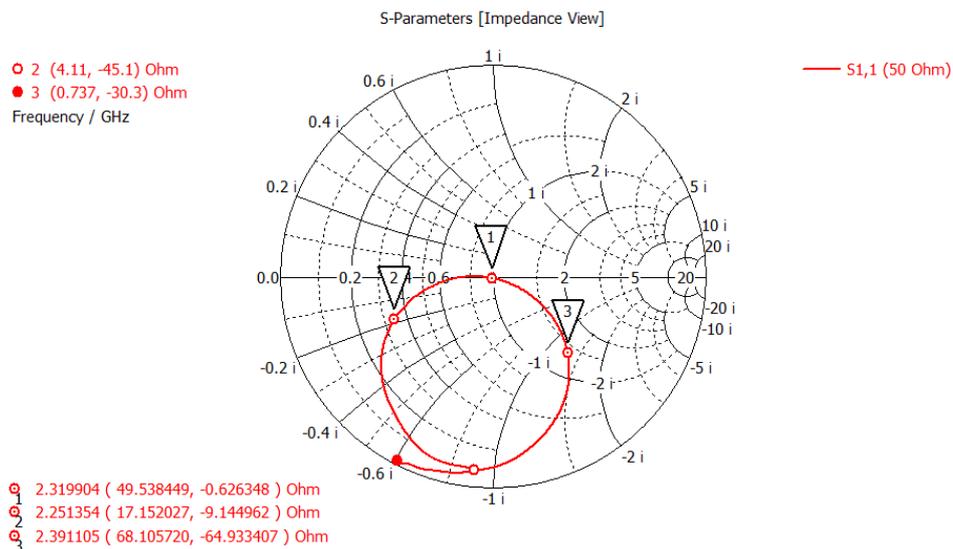


Figura 61. Carta Smith diseño modificado 4

En este diseño se observa que baja la frecuencia de resonancia, pero se consigue adaptación.

## Diseño modificado 5

Partiendo del diseño inicial, se implementa otra configuración diferente, para simular reactancia en paralelo y mover en la Carta de Smith la frecuencia de resonancia al centro.

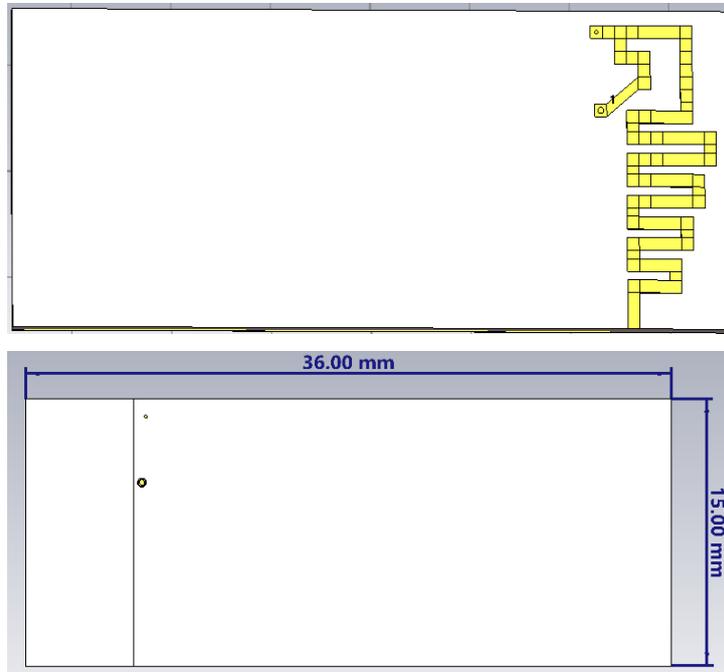


Figura 62. Modelo modificado 5

Se simula el diseño y se observa que a la frecuencia de 2.30 GHz la antena tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -45 \text{ dB}$

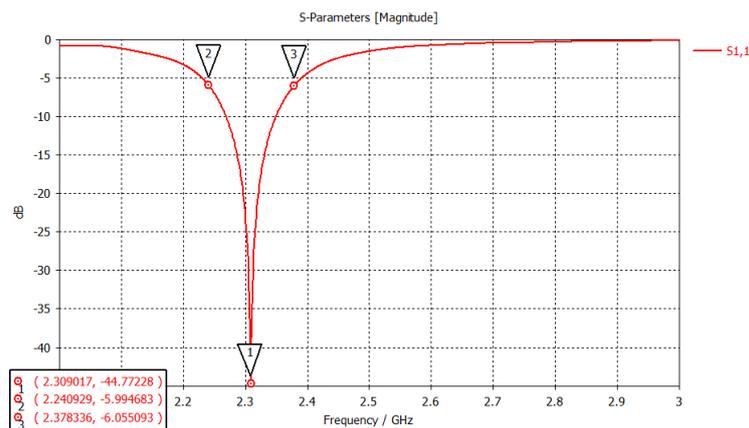
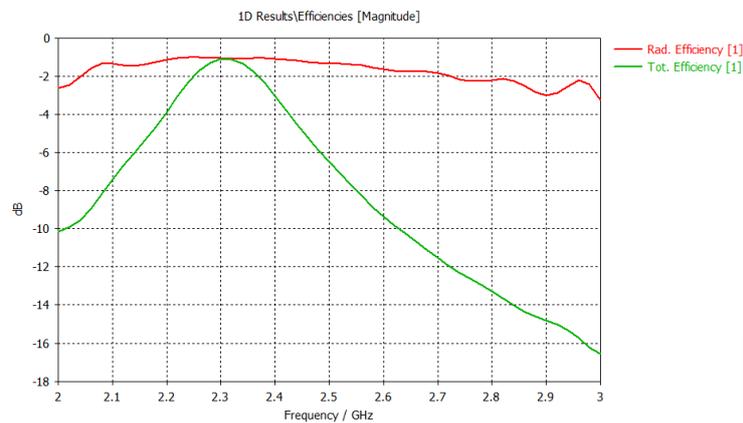


Figura 63.  $S_{11}$  Diseño modificado 5

El ancho de banda de impedancia es:

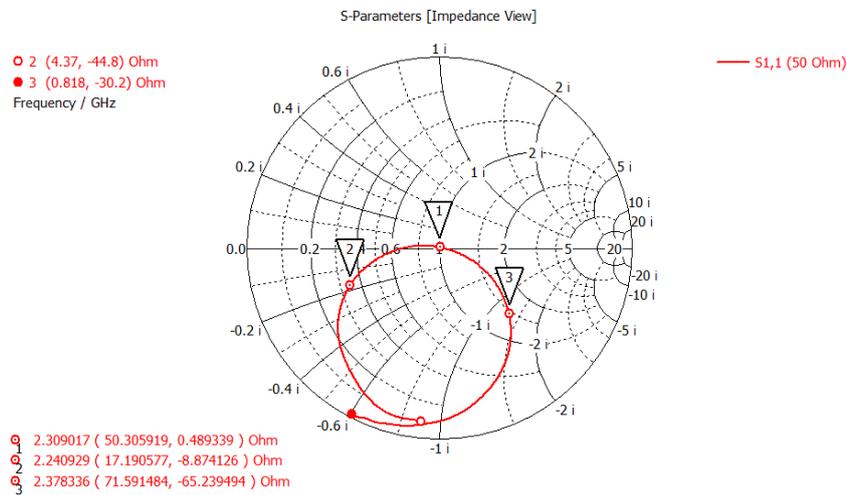
$$BW(\%) = \frac{2.38 - 2.24}{\frac{2.38 + 2.24}{2}} \cdot 100 = 4.3\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:



**Figura 64.** Eficiencia radiación y total diseño modificado 5

Se observa en la Carta de Smith que el diseño sí presenta adaptación de impedancias:



**Figura 65.** Carta Smith diseño modificado 5

En este diseño se observa que disminuye el ancho de banda de la antena, baja la frecuencia de resonancia, pero se consigue adaptación.

## Diseño modificado 6

Se parte del diseño modificado 5 y se unen con operación booleana los bloques que forman el meandro.

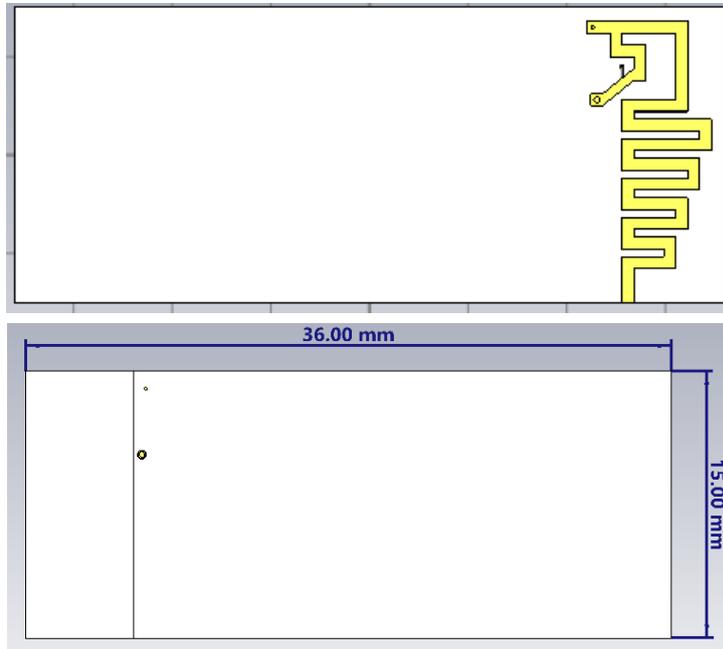


Figura 66. Modelo modificado 6

Se simula el diseño y se observa que a la frecuencia de 2.30 GHz la antena tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -25 \text{ dB}$

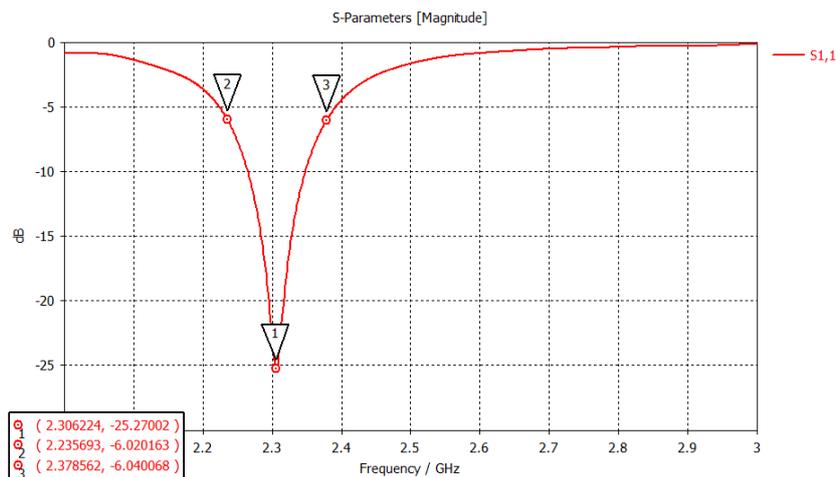


Figura 67.  $S_{11}$  Diseño modificado 6

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.38 - 2.24}{\frac{2.38 + 2.24}{2}} \cdot 100 = 4.3\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:

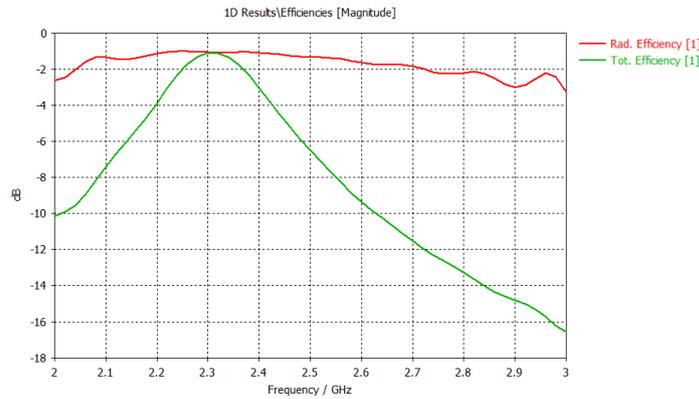


Figura 68. Eficiencia radiación y total diseño modificado 6

Se observa en la Carta de Smith que el diseño sí presenta adaptación de impedancias:

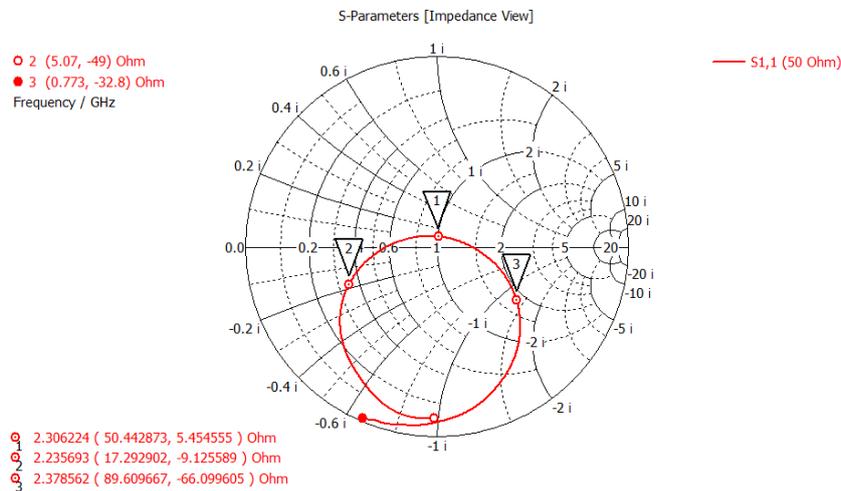


Figura 69. Carta Smith diseño modificado 6

En este diseño se observa que empeora el coeficiente de reflexión, el ancho de banda de la antena queda estable, baja ligeramente la frecuencia de resonancia, pero no se consigue adaptación.

## Diseño modificado 7

Se parte del diseño anterior y se modifica *feeding*.

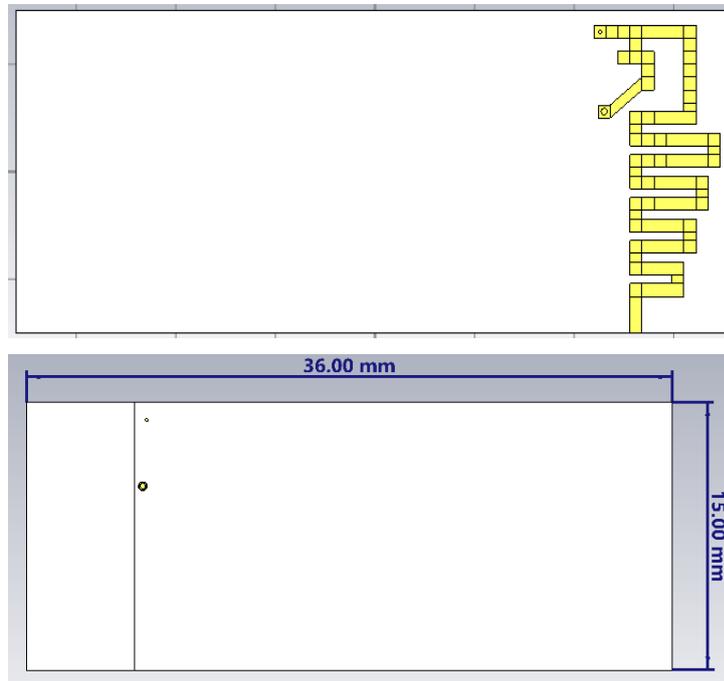


Figura 70. Modelo modificado 7

Se simula el diseño y se observa que a la frecuencia de 2.35 GHz la antenna tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -44 \text{ dB}$

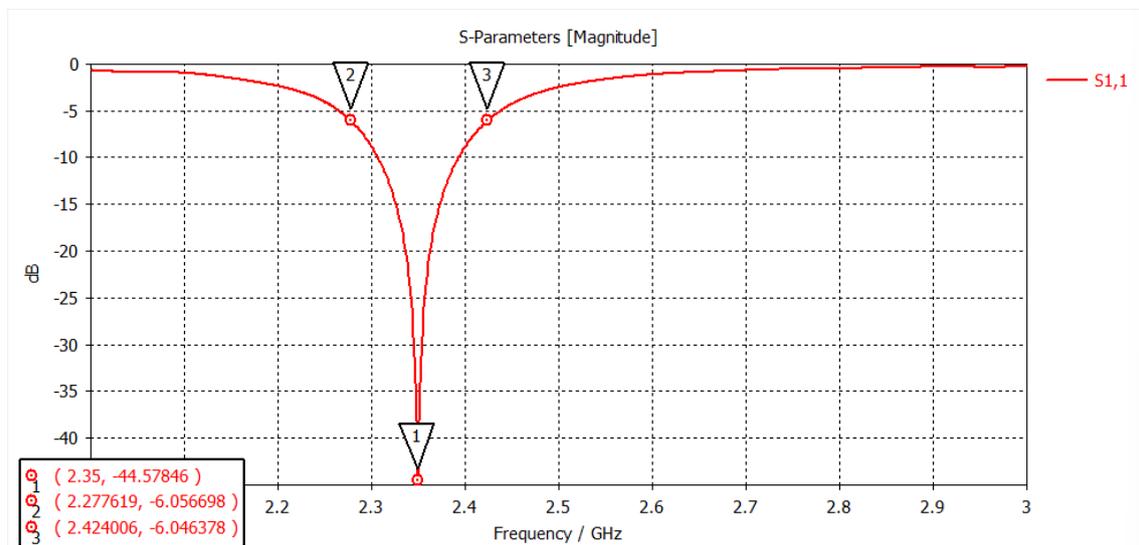


Figura 71.  $S_{11}$  Diseño modificado 7

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.42 - 2.28}{\frac{2.42 + 2.28}{2}} \cdot 100 = 6\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:

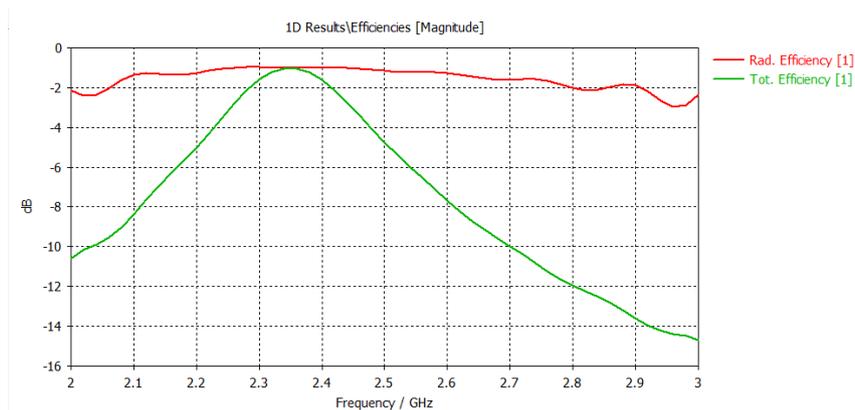


Figura 72. Eficiencias diseño modificado 7

Se observa en la Carta de Smith que el diseño sí presenta adaptación de impedancias:

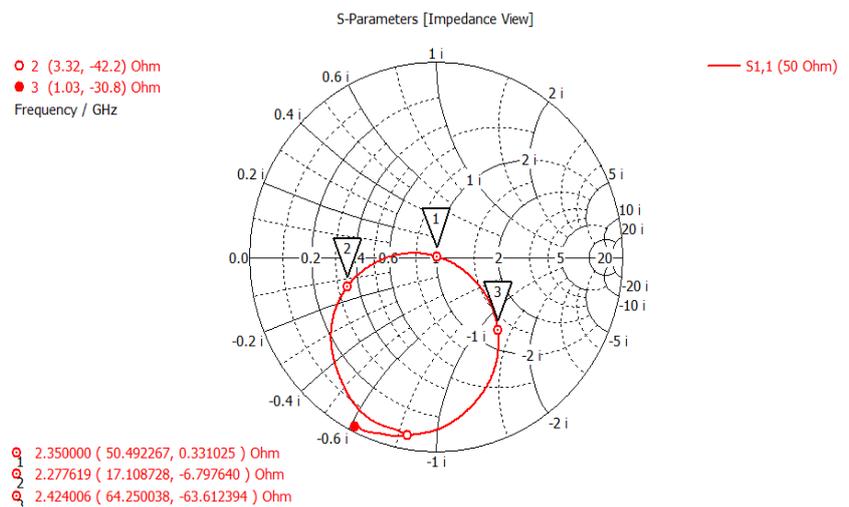


Figura 73. Carta Smith diseño modificado 7

En este diseño se observa que mejora  $S_{11}$ , mejora el ancho de banda de la antena, aumenta ligeramente la frecuencia de resonancia y se consigue adaptación.

## Diseño modificado 8

Se parte del diseño anterior y se modifica *feeding*.

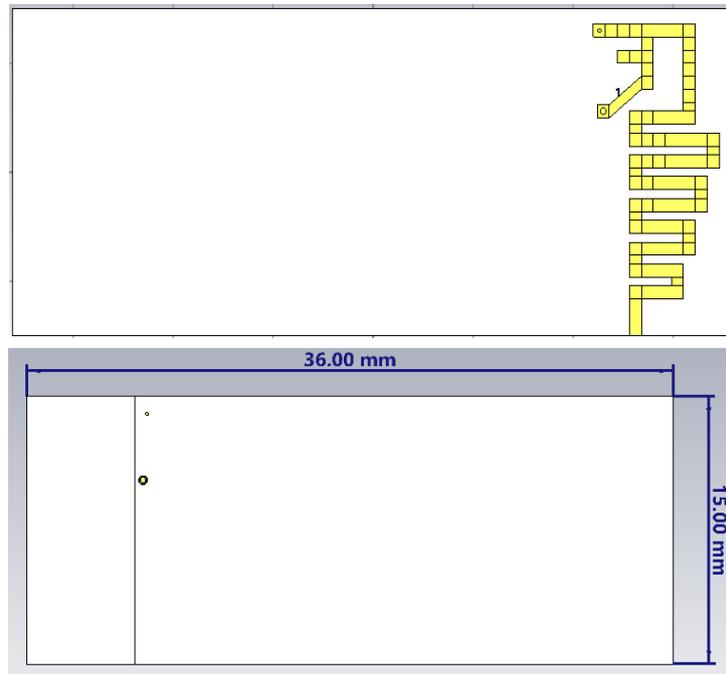


Figura 74. Modelo modificado 8

Se simula el diseño y se observa que a la frecuencia de 2.38 GHz la antenna tiene un mínimo del parámetro  $S_{11} = -34$  dB

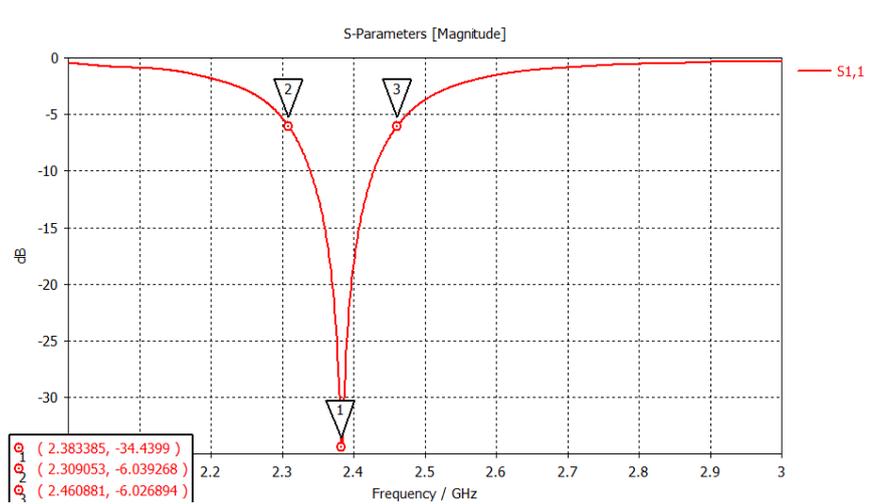


Figura 75. S<sub>11</sub> Diseño modificado 8

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.46 - 2.31}{\frac{2.46 + 2.31}{2}} \cdot 100 = 6.2\%$$

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es:

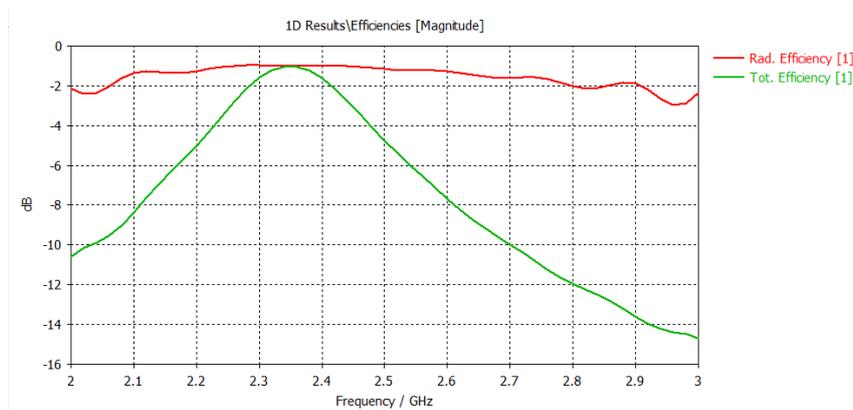


Figura 76. Eficiencias diseño modificado 8

Se observa en la Carta de Smith que el diseño sí presenta adaptación de impedancias:

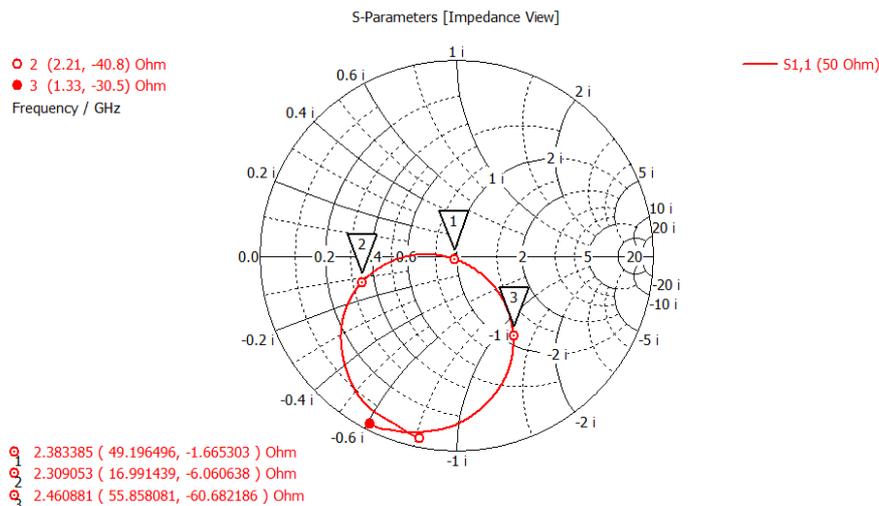


Figura 77. Carta Smith diseño modificado 8

En este diseño se observa que empeora  $S_{11}$ , mejora ligeramente el ancho de banda de la antena, la frecuencia de resonancia está muy cerca de 2.4 GHz y se consigue adaptación.

En base a los resultados obtenidos, se decide seleccionar como diseño final este último con la única modificación de unir con operación booleana los bloques que componen el meandro.

### 3.5. Diseño final

El diseño seleccionado finalmente para realizar el estudio de la reusabilidad es este:

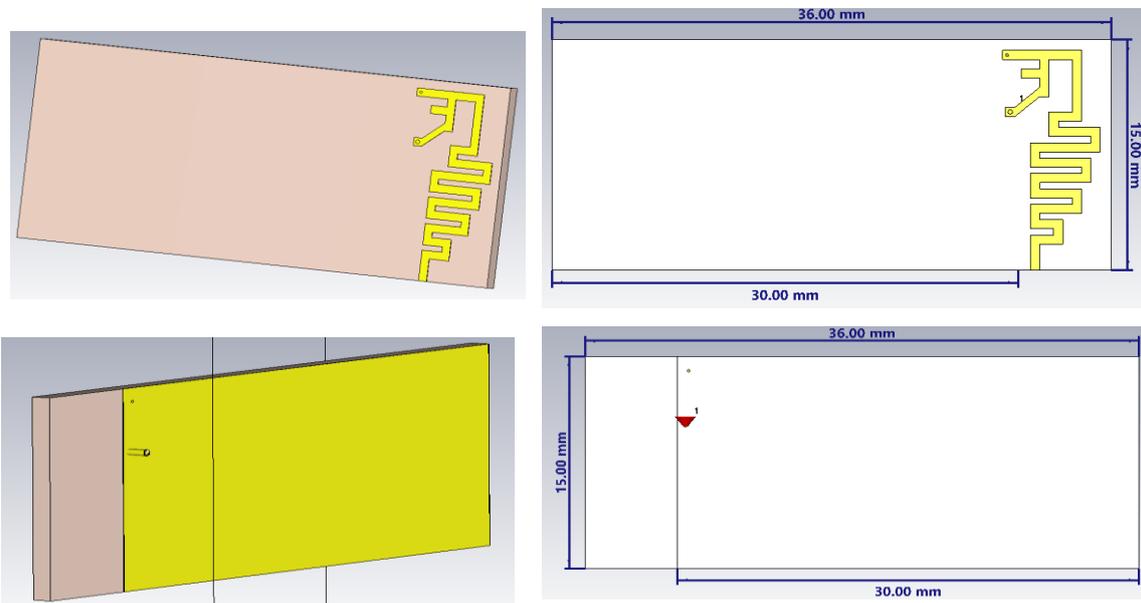


Figura 78. Modelo final

Las características y materiales de este diseño son:

#### Material sustrato:

- FR4 1 mm de grosor
- Constante dieléctrica  $\epsilon_r = 4.15$
- Tangente de pérdidas  $\tan\delta = 0.017$

#### Material conductor:

- Cobre 0.035 mm grosor
- Conductividad  $\sigma = 5.9 \cdot 10^7$  S/m

La lista de parámetros utilizados para el diseño es:

Name	Expression	Value	Description
Ls	= 36	36	Substrate Length
Ws	= 15	15	Substrate Width
Hs	= 1	1	Substrate Thickness
Lg	= 30	30	Ground Plane Length
Wg	= 15	15	Ground Plane Width
Lca	= 6	6	Clearance Length
Hc	= 0.035	0.035	Cooper Thickness
Wca	= 15	15	Clearance Width
w	= 0.6	0.6	strip width
ot	= 3.5	3.5	strip position
Rs	= 0.09	0.09	Shorting pin radius
Rf	= 0.15	0.15	Feeding pin radius
Rcoat	= 0.2	0.2	Coating radius
Rcover	= 0.25	0.25	Cover radius
ts	= 15	15	strip length
<new parameter>			

Figura 79. Parameter List modelo final

Se ha seleccionado por presentar una frecuencia de corte muy próxima a la deseada y una adaptación de impedancias bastante buena:

- Frecuencia resonancia  $f_r = 2.44 \text{ GHz}$
- Coef reflexión:  $S_{11} = -27 \text{ dB}$
- BW (%) = 6.9 %
- Eficiencia Radiación y Eficiencia Total: promedio del 74% en la banda.

En la simulación se identifica que a la frecuencia de 2.44 GHz la antenna el valor del coeficiente de reflexión es  $S_{11} = -27 \text{ dB}$

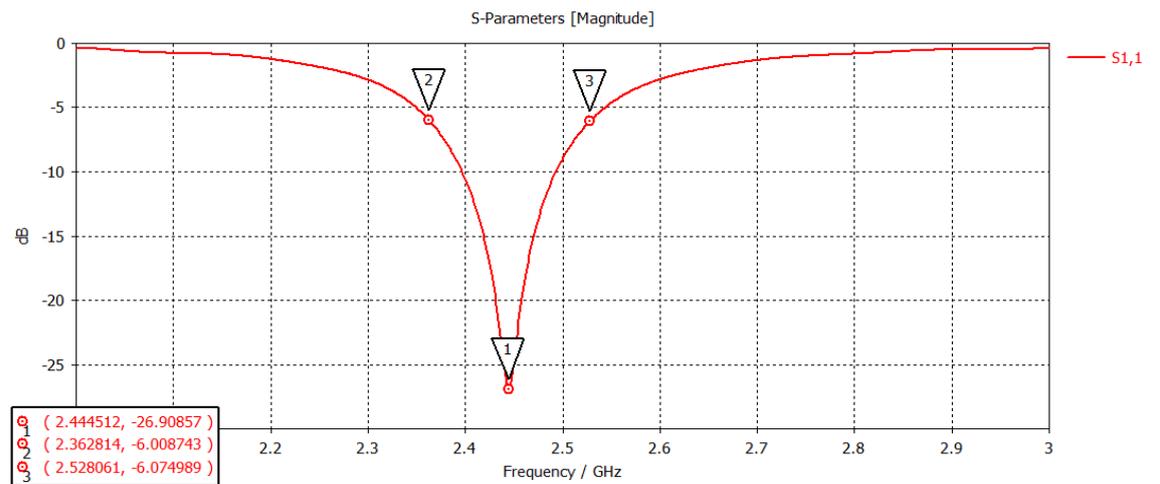


Figura 80.  $S_{11}$  Diseño final

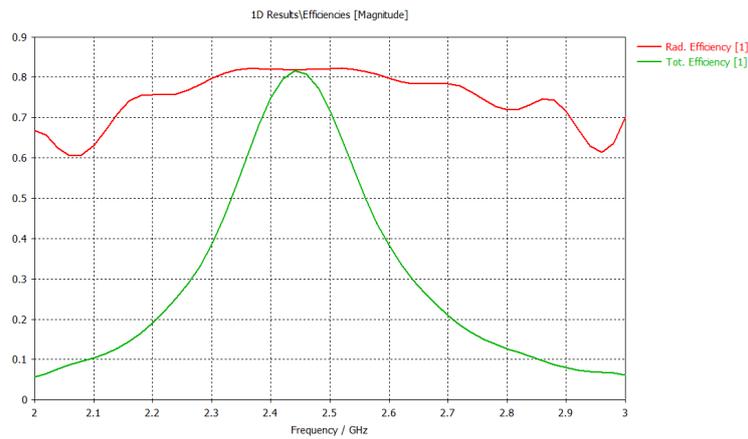
El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.53 - 2.36}{\frac{2.53 + 2.36}{2}} \cdot 100 = 6.9\%$$

El ancho de banda no aporta un resultado demasiado bueno con respecto a los resultados que pueda dar el estudio de la reusabilidad de esta antenna. Tal y como se deduce de los análisis llevados a cabo en los artículos [1] y [2], si este parámetro para el modelo inicial no es alto, en los otros planos de masa todavía será más bajo. Este hecho tendrá como consecuencia que la antenna no sea reusable en un elevado número de planos de masa.

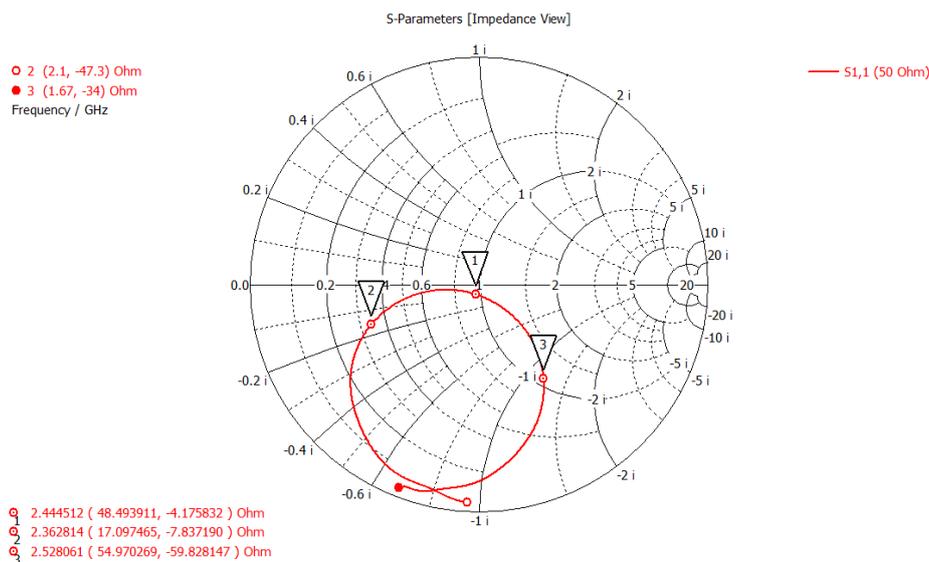
No obstante, se ha seleccionado este diseño por ser el más próximo a la frecuencia de resonancia deseada para funcionar en ISM y presentar una adaptación de impedancias bastante buena, en comparación con otros modelos aquí presentados.

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es en promedio del 74% en la banda:



**Figura 81.** Eficiencias diseño final

Se observa en la Carta de Smith que el diseño sí presenta adaptación de impedancias, la frecuencia central está prácticamente en el centro de la Carta de Smith:



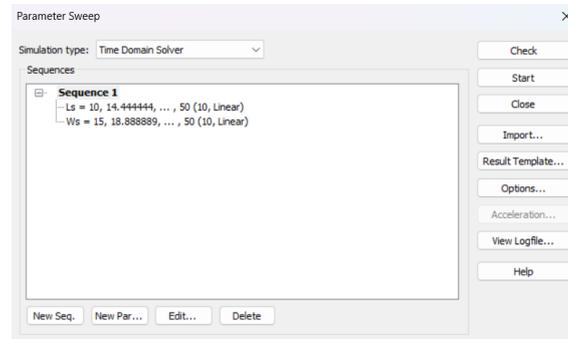
**Figura 82.** Carta Smith diseño final

En el siguiente apartado se muestra cómo se puede realizar la automatización de simulaciones con CST haciendo uso de las macros predefinidas.

### 3.6. Automatización de simulaciones con macros CST

Es posible utilizar las macros preconfiguradas de CST para automatizar ciertas tareas, en el presente proyecto se hace uso de estas para obtener las simulaciones necesarias para realizar el análisis de la reusabilidad para distintos planos de masa de la antena diseñada.

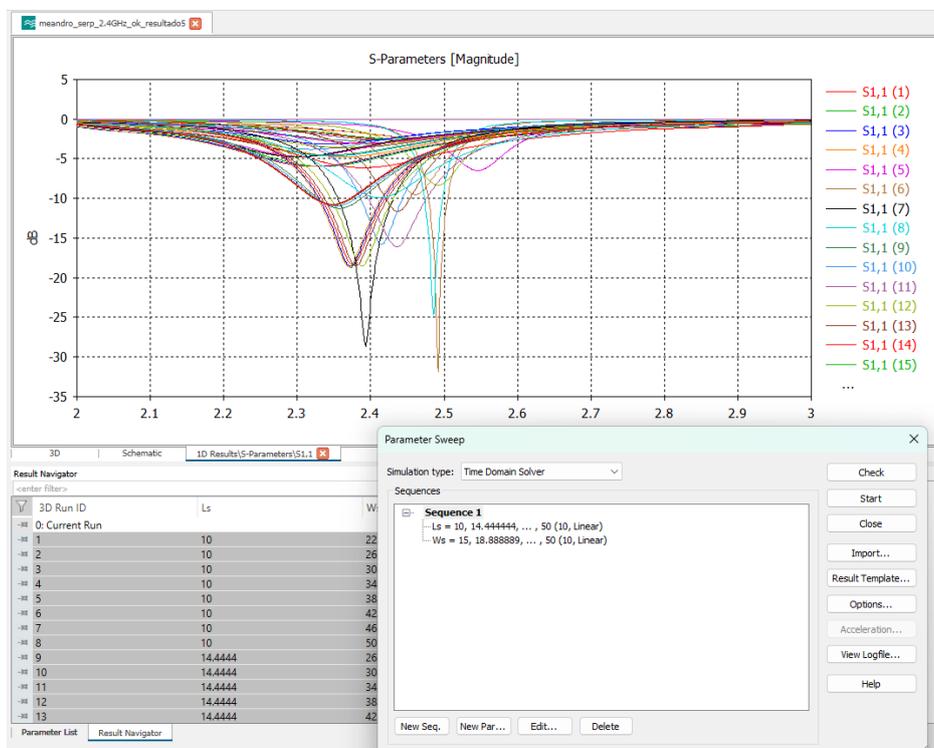
A través de la opción *parameter sweep* se realizan 100 simulaciones variando las dimensiones de los parámetros  $L_s$  (longitud del sustrato) y  $W_s$  (ancho del sustrato). Se varía el tamaño de estos parámetros desde 10 mm x 15 mm hasta 50 mm x 50 mm. Para ello se genera una secuencia para variar el valor de los dos parámetros implicados con 10 saltos cada uno, por lo que se generan un total de  $10 \times 10 = 100$  simulaciones.



**Figura 83.** Parameter Sweep diseño final

Se ejecuta la macro y lo que hace es ir realizando las simulaciones correspondientes a cada una de las combinaciones de valores de los parámetros indicados. Las 100 simulaciones tardan en ejecutarse unas 5h pero este método ahorra mucho tiempo puesto que se tardarían más horas en ir modificando manualmente los valores de los parámetros y lanzando cada simulación.

Una vez finalizada se puede observar la gráfica del parámetro  $S_{11}$ :



**Figura 84.** Resultado simulaciones diseño final

Y se puede exportar el resultado de la simulación en un fichero de texto plano desde el menú “Post-Processing” si se ha seleccionado previamente desde el “Navigation Tree” -> 1 D Results -> S-Parameters -> S1.1

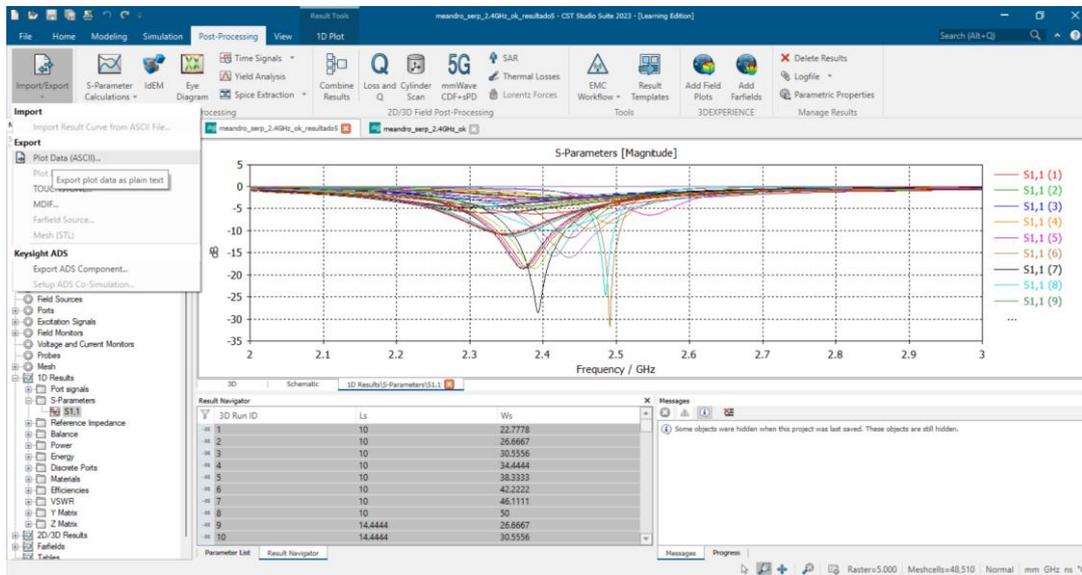


Figura 85. Exportado simulaciones diseño final

El fichero exportado tiene el siguiente formato:

```

export_CST_100_50x50
Archivo  Editar  Ver

#Parameters = {Hc=0.035; Hs=1; Lca=6; Lg=30; Ls=10; Rcoat=0.2; Rcover=
0.25; Rf=0.15; Rs=0.09; Wca=15; Wg=15; Ws=22.7777777777778; ot=3.5; ts=
15; w=0.6}
#"Frequency / GHz"      "S1,1 (1) [Magnitude]"
#-----
2.0000000000000000 -0.29024057851258
2.0009999275208 -0.29632143385729
2.0020000934601 -0.30240425598459
2.0030000209808 -0.30848090114627
2.0039999485016 -0.31454696423365
2.0050001144409 -0.32059635422169
2.0060000419617 -0.32662191914026
2.0069999694824 -0.33261864147467
2.0079998970032 -0.33858040373918
2.0090000629425 -0.34450320156304
2.009999904633 -0.35037924787996
2.0109999179840 -0.35620553785255
2.0120000839233 -0.36197422303132
2.0130000114441 -0.36768171624878
2.0139999389648 -0.37332273240409
2.0150001049042 -0.37889253204094
2.0160000324249 -0.38438845438908
2.0169999599457 -0.38980297354609
  
```

Figura 86. Formato fichero simulaciones diseño final

### 3.7. Obtención Mapa Calor a partir de fichero exportado de CST

Una vez se tiene exportado desde CST el fichero con el valor de los  $S_{11}$  obtenidos en cada una de las simulaciones se procede a dibujar el Mapa de Calor, para ello se genera el script de Matlab llamado `mapa_total.m` que coge el fichero exportado, procesa la información que contiene, se queda con el peor valor de  $S_{11}$  dentro de la banda de interés, de cada una de las simulaciones realizadas para dibujarlo.

```

1 % Function to extract the S11 matrix from the exported CST file
2 % Plots the Heat Map for the worst S11 at the extremes of the ISM 2.45GHz band: 2.4 GHz - 2.5 GHz
3 % Input parameters:
4 % filename: Name of the file with exported S11 data.
5
6 function mapa_total(filename)
7
8 % Open the file
9 fid = fopen(filename, 'r');
10
11 % Variables to store data
12 frecuencias = [];
13 S11_values = [];
14 Ls_values = [];
15 Ws_values = [];
16
17 % Read the file line by line
18 if fid ~= -1
19     tline = fgetl(fid);
20     while ischar(tline)
21         if contains(tline, '#Parameters')
22             % Read the parameters
23             params = regexp(tline, '[+]?[d*\.\?]\d+([eE][+]?[d+])?', 'match');
24             Ls = str2double(params{5});
25             Ws = str2double(params{12});
26         elseif ~isempty(tline) && ~startsWith(tline, '#')
27             % Read frequency and S11 data
28             data = str2double(strsplit(tline, {'\t', ' '}));
29             frequency = data(1);
30             S11 = data(2);
31

```

Figura 87. Fragmento funcion mapa\_total.m

Se ejecuta el script que está incluido en el anexo y se obtiene el Mapa de Calor:

```
>> mapa_total(filename);
```

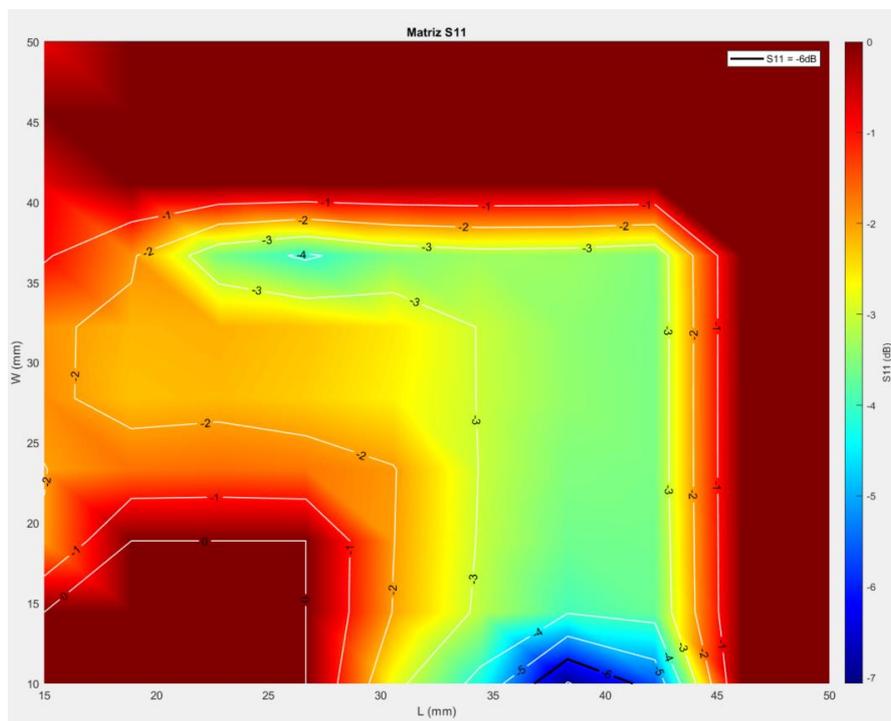


Figura 88. Mapa Calor diseño final

### 3.8. Estudio de la reusabilidad

En este apartado se realiza un estudio de la reusabilidad de la antena diseñada mediante la función `mapa_total.m` programada en el apartado anterior.

Este script programado en Matlab dibuja el Mapa de Calor con los datos exportados desde CST en el fichero de texto plano. En este apartado, las simulaciones se automatizan mediante las macros de CST a través de la opción *parameter sweep* y los datos se han de exportar manualmente desde CST con la opción “Import/Export” desde el menú “Post-Processing”, tal y como se indica en el apartado 3.6 de la memoria.

En el cuarto apartado de la memoria se proporcionan las herramientas para realizar todos los pasos con la simple ejecución de una función programada en Matlab, la función `parameter_meanderS11()`.

Tal y como se indicaba anteriormente, se ejecuta el script y se obtiene el Mapa de Calor y también la matriz con los valores peores del parámetro  $S_{11}$  en la banda de frecuencias:

```

Command Window
>> mapa_total(filename);
      0      0      0      0 -2.7578 -4.2678 -7.0639 -5.6415 -0.0001 -0.0001
      0      0      0      0 -2.0241 -3.1308 -3.9475 -3.7091 -0.0000 -0.0001
 -1.9781      0      0      0 -1.9813 -3.0565 -3.6506 -3.6360 -0.0000 -0.0001
 -2.0124 -1.6809 -1.6282 -1.7037 -1.9595 -3.0268 -3.5346 -3.5840 -0.0000 -0.0001
 -1.8731 -2.2365 -2.1841 -2.3279 -2.5868 -3.0219 -3.4144 -3.5769 -0.0000 -0.0001
 -1.9018 -2.1690 -2.1208 -2.2597 -2.5218 -3.0265 -3.4253 -3.5868 -0.0000 -0.0001
 -0.9005 -1.8966 -3.5767 -4.1133 -3.5137 -3.3128 -3.3493 -3.5479 -0.0000 -0.0001
 -0.7282 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0001
 -0.0000 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0001
 -0.7360 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0000 -0.0001 -0.0001

```

Figura 89. Matriz  $S_{11}$  peores diseño final

El mapa de Calor es el mostrado en la Figura 88 y como se indicaba anteriormente, en el mismo se visualiza el peor valor de  $S_{11}$  en la banda de interés. En el eje vertical se representa el valor de  $W(\text{mm})$  y en el eje horizontal el valor de  $L(\text{mm})$  del plano de masa. Los tonos azules representan los valores que cumplen la condición buscada  $S_{11} \leq -6\text{dB}$  y los tonos rojos los que no cumplen.

Al analizar el resultado obtenido mediante el Mapa de Calor se observa que la reusabilidad obtenida para el diseño final es únicamente el **1%**, es decir que solamente se ha logrado conseguir 1 tamaño que cumpla la condición  $S_{11} \leq -6\text{dB}$ . Para analizar este dato se debe tener en cuenta que se está tomando el dato del peor valor del parámetro  $S_{11}$  dentro de la banda de frecuencias:  $2.40\text{ GHz} - 2.50\text{ GHz}$  y la frecuencia de resonancia  $f_r = 2.45\text{ GHz}$ .

Este resultado era de esperar al ver el análisis del ancho de banda del apartado 3.5, donde puede observarse que esta antena presenta un ancho de banda estrecho en comparación con los que presentan antenas como la *Booster* o el monopolo espiral. [2]

El único resultado obtenido es para el plano de masa de tamaño del diseño, es decir:  $L_g = 30\text{ mm}$  y  $W_g = 15\text{ mm}$ . Por lo que se puede concluir, que la antena requiere rediseño para utilizar distintos tamaños de planos de masa.

En este punto del análisis, se ha valorado la forma de las gráficas de los parámetros  $S_{11}$  de cada simulación. Se observa mayor concentración de mínimos del parámetro  $S_{11}$  está en torno a una frecuencia más baja, por lo que se determina repetir el análisis de reusabilidad, pero cambiando la frecuencia central y la banda de interés:

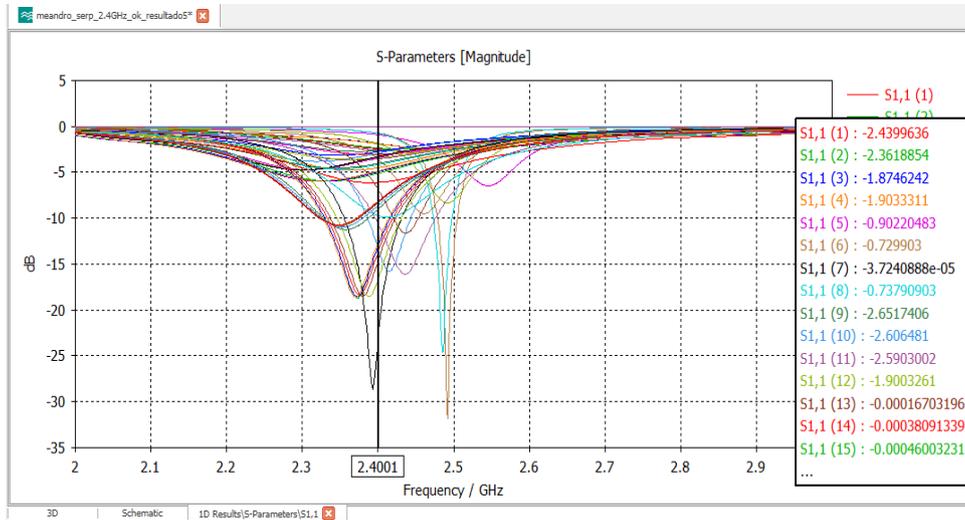


Figura 90.  $S_{11}$  simulaciones diseño final

Para la frecuencia de resonancia  $f_r = 2.40 \text{ GHz}$  y considerando como banda de interés la banda:  $2.35 \text{ GHz} - 2.45 \text{ GHz}$ . Se analiza la reusabilidad para 100 simulaciones con tamaños del plano de masa de  $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  hasta  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  y se observa que cumplen 8 casos de 100. Por lo que la reusabilidad para este caso supone un **8%**

```

Command Window
>> mapa_total(filename);
      0      0      0      0 -3.6168 -5.3813 -5.0461 -6.9196 -0.0001 -0.0001
      0      0      0      0 -2.5931 -4.0314 -7.4974 -5.7133 -0.0000 -0.0001
-1.9703      0      0      0 -2.5281 -3.9064 -6.7454 -5.5247 -0.0000 -0.0001
-1.8781 -2.1893 -2.1200 -2.1992 -2.4968 -3.8551 -6.4250 -5.3858 -0.0000 -0.0001
-1.4060 -2.1379 -2.7695 -2.9686 -3.3433 -3.8469 -6.1538 -5.3629 -0.0000 -0.0001
-1.4382 -2.1517 -2.6825 -2.8739 -3.2403 -3.8448 -6.1644 -5.3626 -0.0000 -0.0001
-0.6219 -0.9462 -1.7341 -2.7980 -4.8697 -7.0169 -5.9969 -5.2972 -0.0000 -0.0001
-0.3507 -0.0001 -0.0001 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0000 -0.0001
-0.0000 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0000 -0.0001 -0.0000 -0.0001 -0.0000 -0.0001
-0.3430 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0001 -0.0000 -0.0001 -0.0001

```

Figura 91. Matriz  $S_{11}$  peores diseño final para 2.40 GHz

El resultado del Mapa de Calor obtenido en este caso es el siguiente:

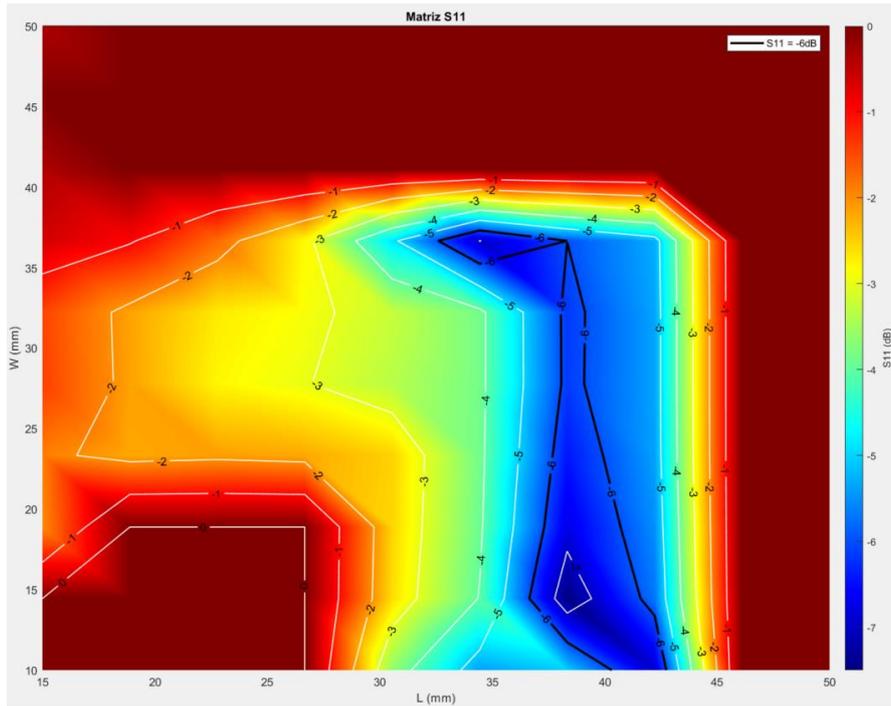


Figura 92. Mapa Calor diseño final para 2.4 GHz

Se repite el proceso para la frecuencia de resonancia  $f_r = 2.34 \text{ GHz}$  y considerando como banda de interés la banda:  $2.29 \text{ GHz} - 2.39 \text{ GHz}$ . Se analiza la reusabilidad para 100 simulaciones con tamaños del plano de masa de  $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  hasta  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  y se observa que cumplen 6 casos de 100. Por lo que la reusabilidad para este caso supone un **6%**.

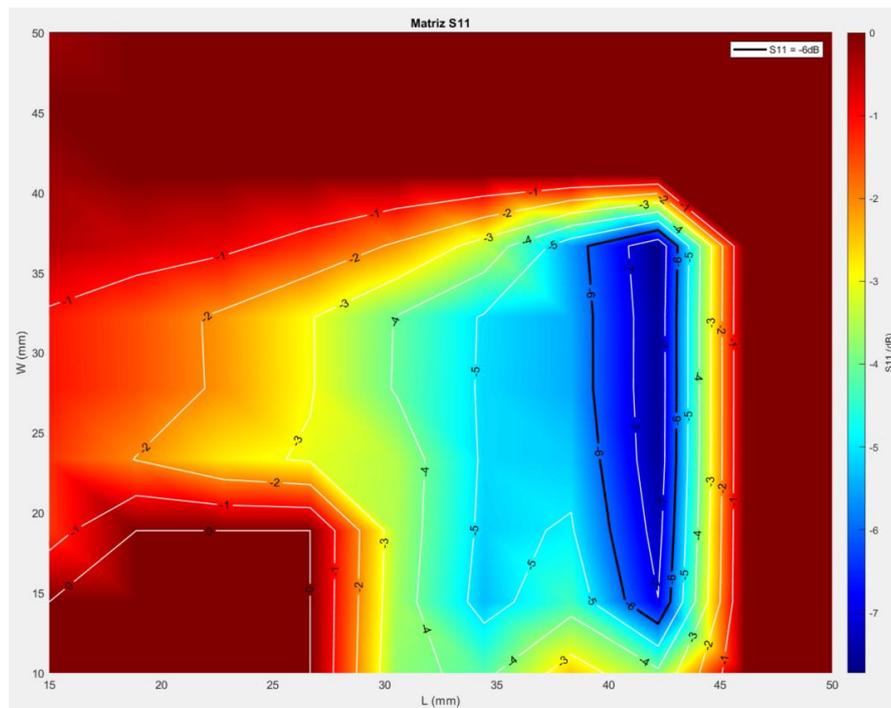
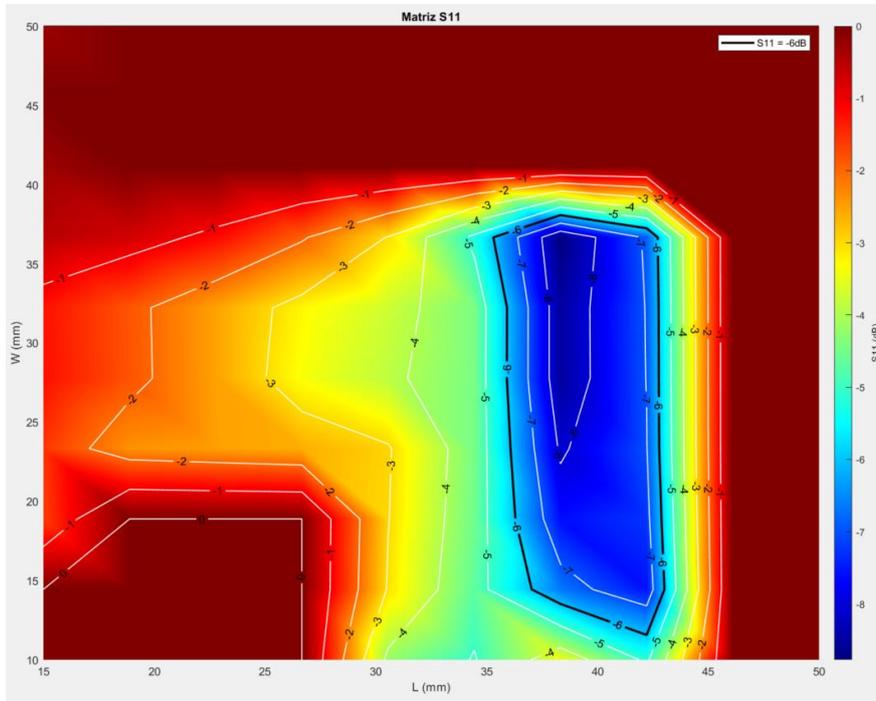


Figura 93. Mapa Calor diseño final para 2.34 GHz

Por último, se ejecuta el script para la frecuencia de resonancia  $f_r = 2.37 \text{ GHz}$  y considerando como banda de interés la banda:  $2.32 \text{ GHz} - 2.42 \text{ GHz}$ . Se analiza la reusabilidad para 100 simulaciones con tamaños del plano de masa de  $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  hasta  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  y se observa que cumplen 12 casos de 100. Por lo que la reusabilidad para este caso supone un **12%**.



**Figura 94.** Mapa Calor diseño final para 2.37 GHz

Dado que resulta muy sencillo realizar un estudio de la reusabilidad con la función de Matlab `mapa_total.m` y que el diseño final aportaba mejores resultados en cuanto a reusabilidad a la frecuencia de 2.37 GHz con un **12%**, se decide crear otro diseño en CST modificando ligeramente la geometría del meandro y que presenta una frecuencia de resonancia más baja. Se muestra en el siguiente apartado.

### 3.9. Diseño final 2

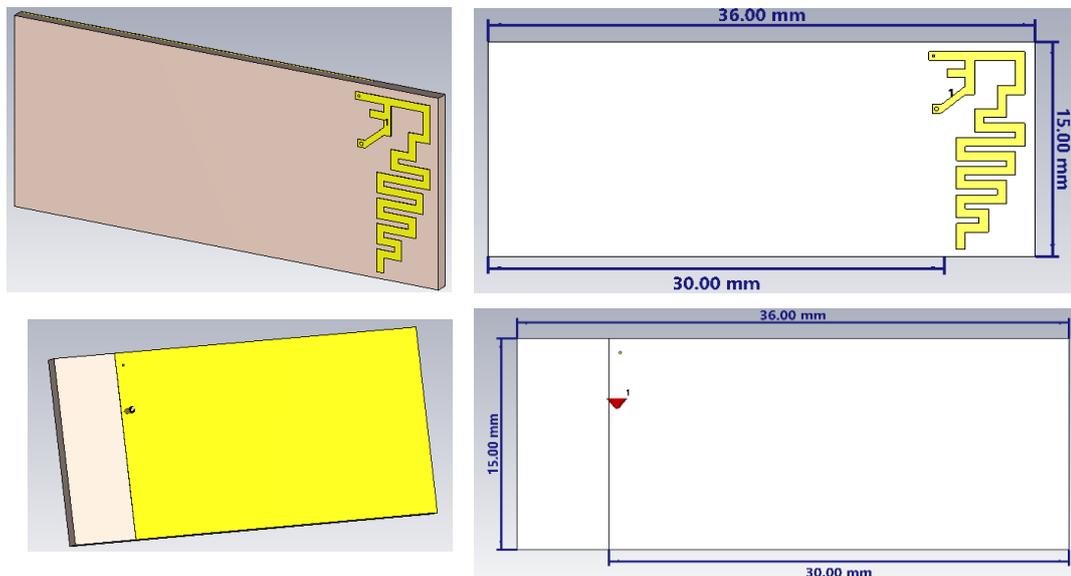


Figura 95. Modelo final 2

Las características y materiales de este diseño son:

#### Material sustrato:

- FR4 1 mm de grosor
- Constante dieléctrica  $\epsilon_r = 4.15$
- Tangente de pérdidas  $\tan\delta = 0.017$

#### Material conductor:

- Cobre 0.035 mm grosor
- Conductividad  $\sigma = 5.9 \cdot 10^7$  S/m

Se ha seleccionado por presentar una frecuencia de corte más baja que el diseño final y una adaptación de impedancias bastante buena:

- Frecuencia resonancia  $f_r = 2.34$  GHz
- Coef reflexión:  $S_{11} = -29$  dB
- BW (%) = 6.8 %
- Eficiencia Radiación y Eficiencia Total: promedio del 74% en la banda

El ancho de banda de impedancia es:

$$BW(\%) = \frac{2.42 - 2.26}{\frac{2.42 + 2.26}{2}} \cdot 100 = 6.8\%$$

El coeficiente de reflexión:

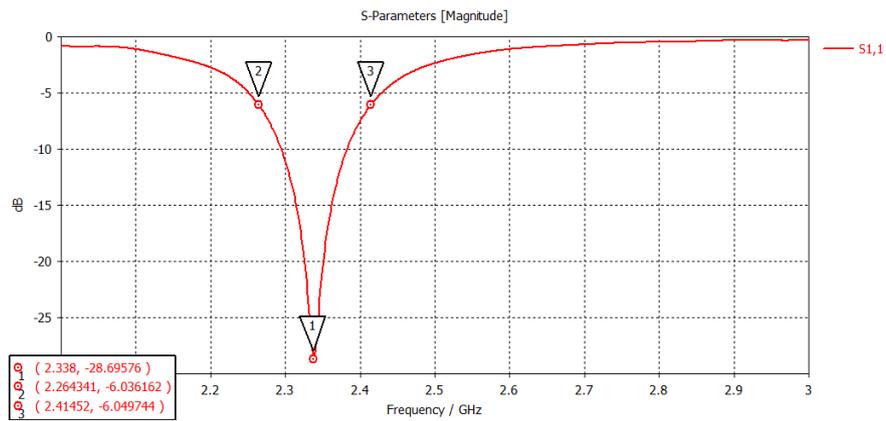


Figura 96. S<sub>11</sub> Diseño final 2

La eficiencia de radiación y la eficiencia total es en promedio del 74% en la banda:

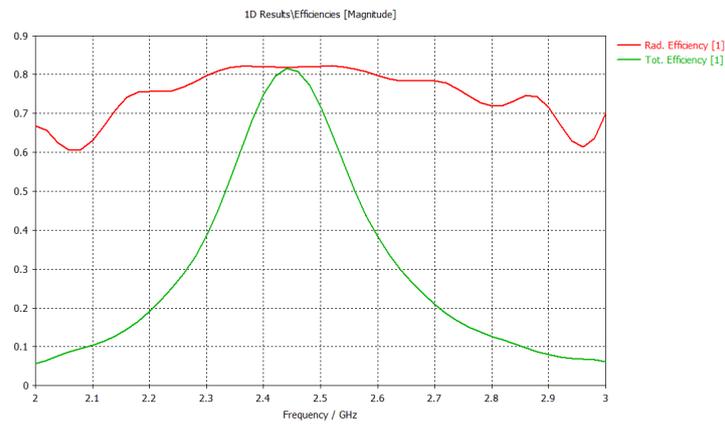


Figura 97. Eficiencias diseño final

La Carta de Smith:

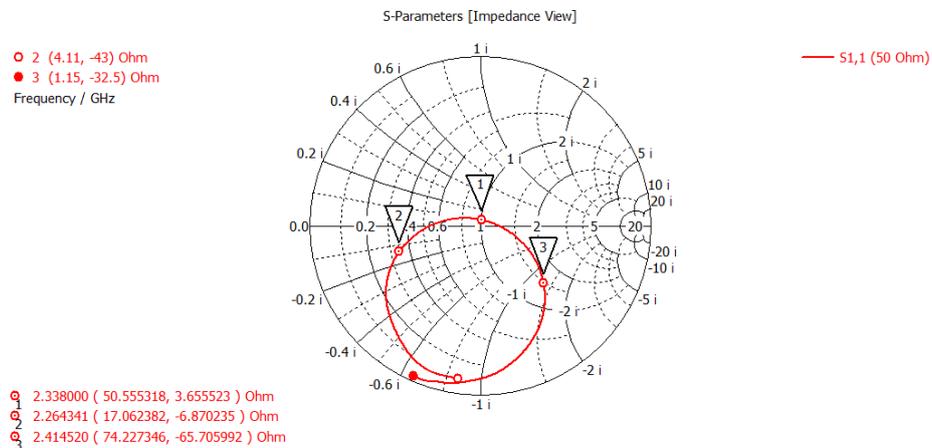


Figura 98. Carta Smith diseño final 2

A continuación, se resume el resultado del estudio de la reusabilidad para este diseño:

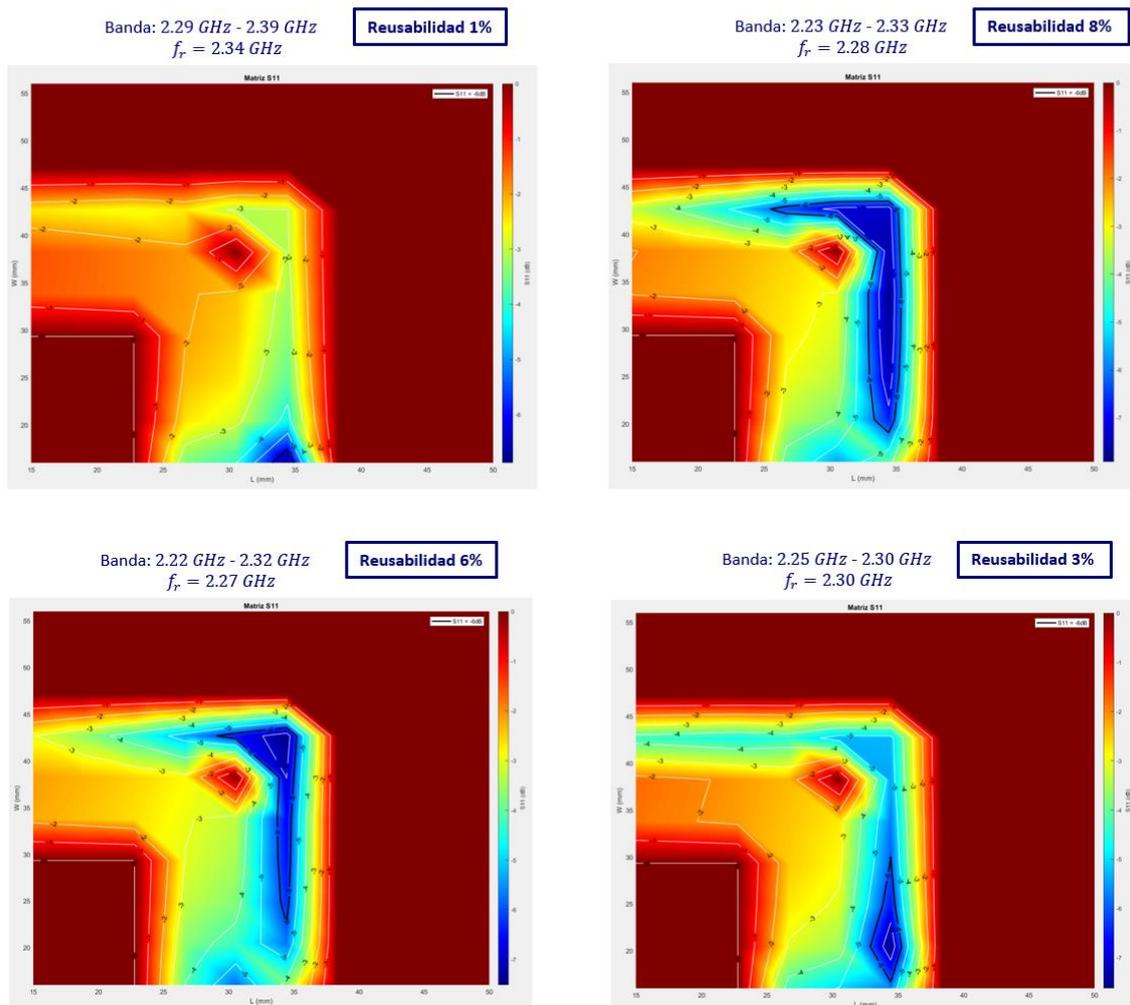


Figura 99. Mapa Calor diseño final 2

Como se puede observar, este segundo diseño no ha mejorado el porcentaje de reusabilidad obtenido por el primer diseño. Esto es parte es porque el ancho de banda de impedancia de este segundo diseño es ligeramente peor que el del primer diseño, es un 0.01% inferior.

### 3.10. Comparativa del ancho de banda con otras antenas

En este apartado se realiza una breve comparación del ancho de banda obtenido para el diseño final con el que tienen otras antenas comerciales estudiadas en los *papers* [1] y [2] como son la antena *Booster* o la antena monopolo espiral.

Tabla 1. Comparativa BW con otras antenas

Antena	f1 (GHz)	f2 (GHz)	BW (%)
Meandro 2.44 GHz	2.36	2.53	6.9
Monopolo espiral	0.855	0.941	9.4
Booster	0.825	0.982	16.6

En la tabla adjunta se puede ver la comparación en cuanto a ancho de banda de impedancia en % para la antena diseñada con respecto a otras antenas estudiadas. La antena diseñada opera en la banda ISM de los 2.4GHz y las antenas referenciadas en la banda ISM de 900 MHz, no obstante, se ha querido mostrar el detalle puesto que se ve claramente que la antena aquí diseñada no consigue dar los valores tan buenos de ancho de banda que tiene la antena *Booster*.

### 3.11. Comparativa de la reusabilidad con otras antenas

En cuanto a reusabilidad, la comparativa quedaría de la siguiente forma:

**Tabla 2.** Comparativa reusabilidad con otras antenas

Antena	Reusabilidad (%)
Meandro 2.44 GHz	1
Monopolo espiral	4.6
Booster	53.8

En este estudio de reusabilidad se ha tomado el número de planos de masa que obtienen un valor del parámetro  $S_{11} \leq -6 \text{ dB}$  para los tres tipos de antena mostrados.

La comparación demuestra que la reusabilidad de una antena en espiral en comparación con la antena *Booster* es muy baja. También se puede afirmar que la antena diseñada presenta una baja reusabilidad y que, para poder ser utilizada en distintos dispositivos con diferentes tamaños del plano de masa, requeriría rediseño de la misma. Con lo cual se puede concluir que ambas antenas, la espiral y la Meandro diseñada aquí, tienen una baja reusabilidad. En vista de los resultados, queda patente que la antena *Booster* es mucho más reutilizable para diferentes planos de masa sin necesidad de modificar la red de adaptación por lo que la convierte en una solución comercial robusta y económica.

### 3.12. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha documentado el método seguido para diseñar la antena impresa con forma de meandro serpenteante y se ha justificado la selección del diseño final.

Se ha mostrado el comportamiento de la antena en base a la visualización de su ancho de banda de impedancia, su coeficiente de reflexión, su eficiencia total y su adaptación mediante visualización de la Carta de Smith.

En cuanto al estudio de la reusabilidad el resultado ha sido muy bajo, tan sólo del 1% y al compararlo con antenas comerciales, se ha determinado que era predecible este resultado por el valor del parámetro ancho de banda obtenido para este diseño.

Se ha cambiado la frecuencia y banda de interés del diseño con el fin de mostrar la utilidad de la función de Matlab `mapa_total.m` y se han llegado a obtener resultados en cuanto a reusabilidad de hasta el **12%**.

# 4. Automatización con Matlab

En este capítulo se muestran las herramientas desarrolladas a lo largo del proyecto para automatizar y agilizar los procesos de análisis y diseño.

## 4.1. Reusabilidad distintos planos de masa con Matlab

En este apartado se ha desarrollado la función de Matlab: `parameter_meanderS11()`

La función abre el proyecto CST indicado que ya debe existir previamente, y:

- Lanza las simulaciones para que se ejecuten desde CST.
- Obtiene la gráfica de los  $S_{11}$  en Matlab.
- Almacena los datos de frecuencia/  $S_{11}$  en un fichero txt.
- Invoca a una segunda función encargada de dibujar en Matlab el Mapa de Calor.

Esta función hace uso de otra función adicional que es la que realiza la gráfica del Mapa de Calor, la función es: `plotS11Matrix(filename, target_frequencies)`

Esta función es muy similar a la presentada en el anterior capítulo ya que coge el fichero con los resultados de la simulación y dibuja el Mapa de Calor. Las diferencias entre ambas funciones radican en que en esta se ha parametrizado la banda de frecuencias a analizar con el parámetro `target_frequencies` y el algoritmo de búsqueda del peor valor del parámetro  $S_{11}$  es diferente, para conseguir una ejecución más rápida.

Como ejemplo de funcionamiento, se realiza una prueba para 16 simulaciones simulaciones (4Ls x 4Ws). Donde Ls (longitud del substrato) y Ws (ancho del substrato).

- `y = [20 36 50 100]; % y es Ls`
- `w = [15 20 50 100]; % w es Ws`

El script abre el proyecto CST indicado, realiza las simulaciones, almacena el valor de cada una en un fichero txt y dibuja en Matlab el resultado.

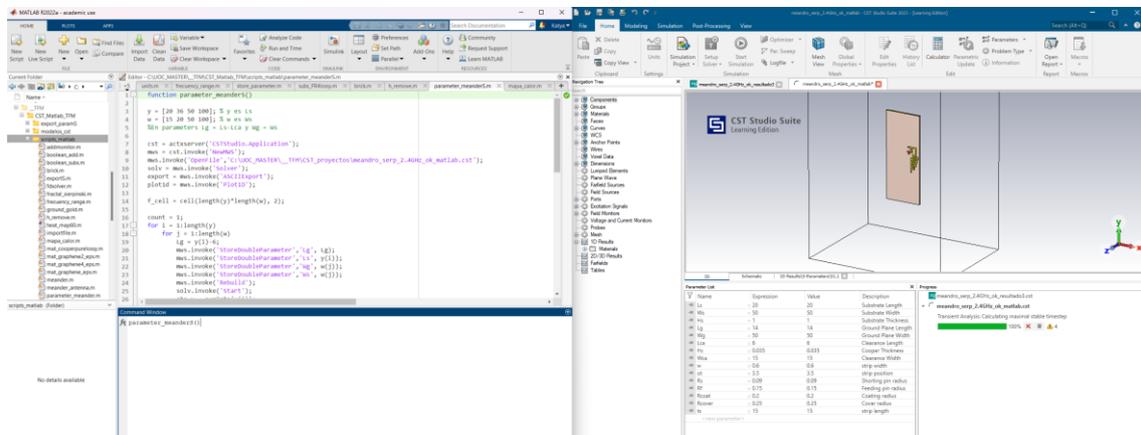


Figura 100. Matlab reusabilidad 1.1

A continuación, se muestra una imagen de la anterior ejecución en la que se observa cómo se van realizando las simulaciones para los distintos planos de masa y se ve como en CST se van dibujando los diseños acordes a los valores de los parámetros L y W de cada ejecución:

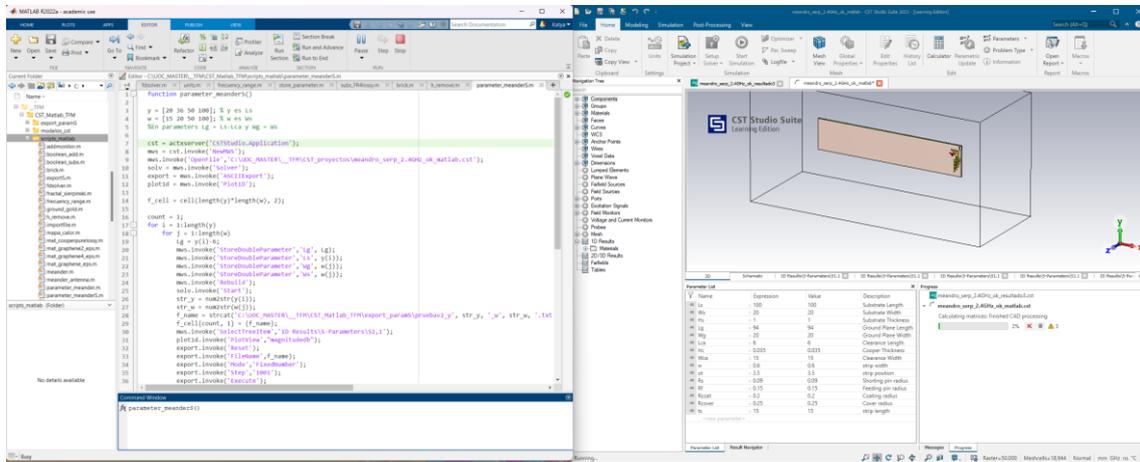


Figura 101. Matlab reusabilidad 1.2

A continuación, se realiza otra ejecución, pero ahora para obtener 64 simulaciones (8Ls x 8Ws). Los valores de Ls y Ws son:

- $y = [10 \ 20 \ 25 \ 30 \ 35 \ 40 \ 45 \ 50];$  % y es Ls
- $w = [15 \ 20 \ 25 \ 30 \ 35 \ 40 \ 45 \ 50];$  % w es Ws

El script abre el proyecto CST indicado, realiza las simulaciones, realiza la gráfica de los  $S_{11}$ , almacena todos los datos en un fichero txt y dibuja en Matlab el Mapa de Calor:

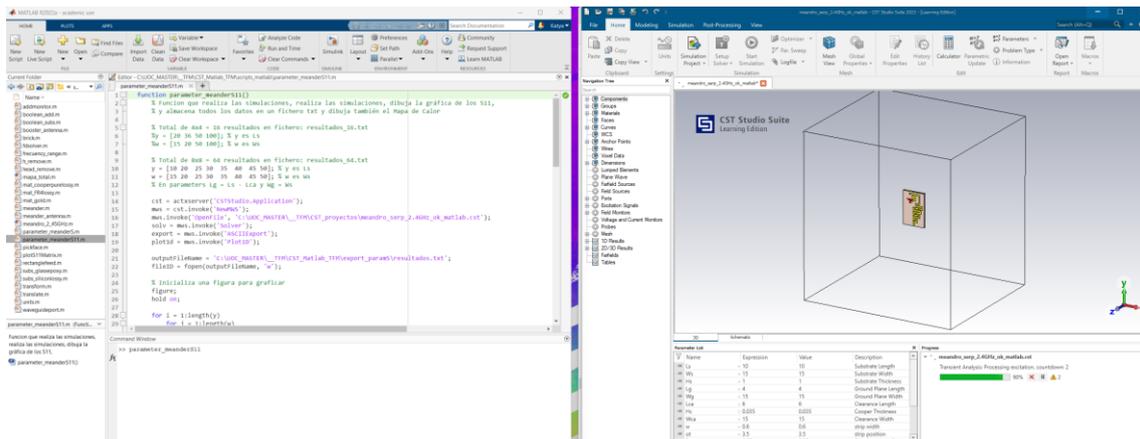


Figura 102. Matlab reusabilidad 2.1

Ahora se muestran varias imágenes de esta última ejecución en las que se puede ver cómo se van realizando las simulaciones para los distintos planos de masa y como en CST se van dibujando los diseños con los valores de los parámetros L y W de cada ejecución:

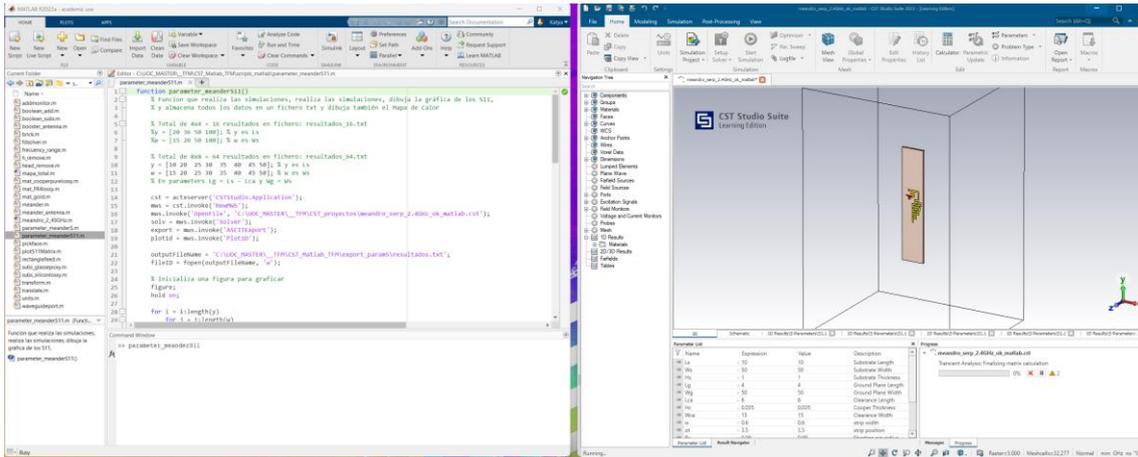


Figura 103. Matlab reusabilidad 2.2

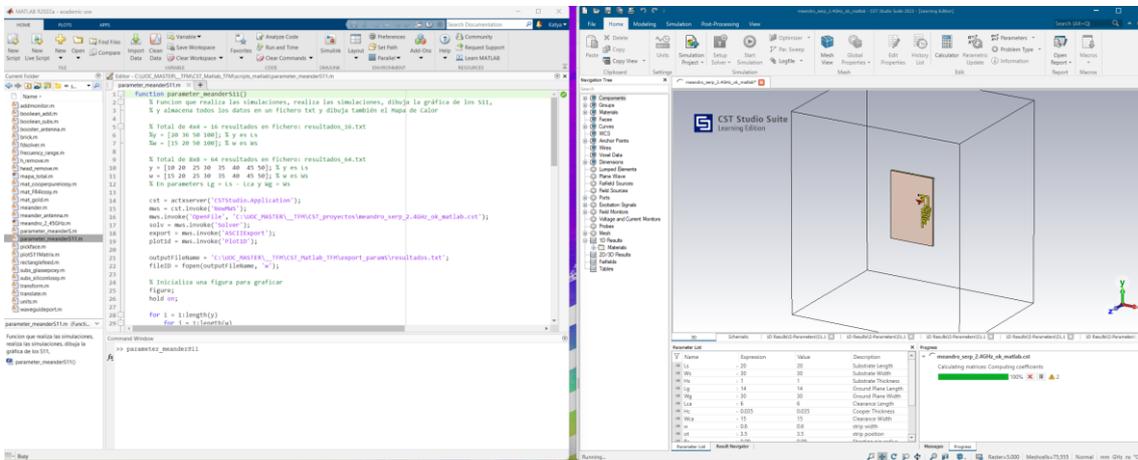


Figura 104. Matlab reusabilidad 2.3

El resultado que se obtiene es la gráfica de los  $S_{11}$  y el Mapa de Calor:

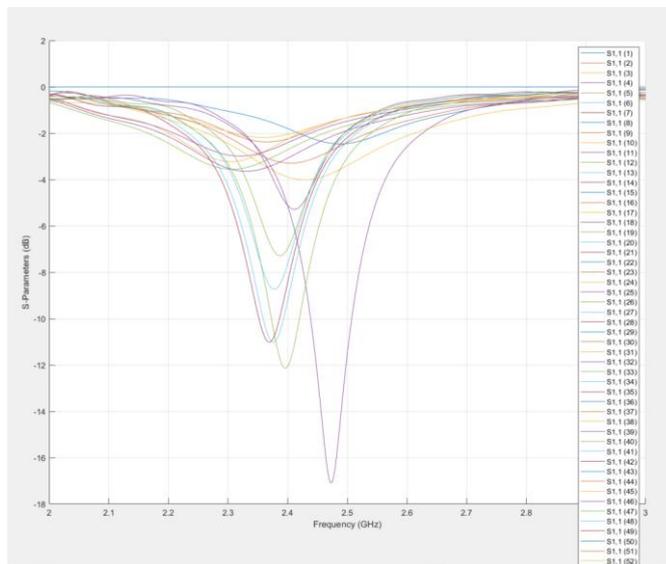


Figura 105. Matlab reusabilidad S11

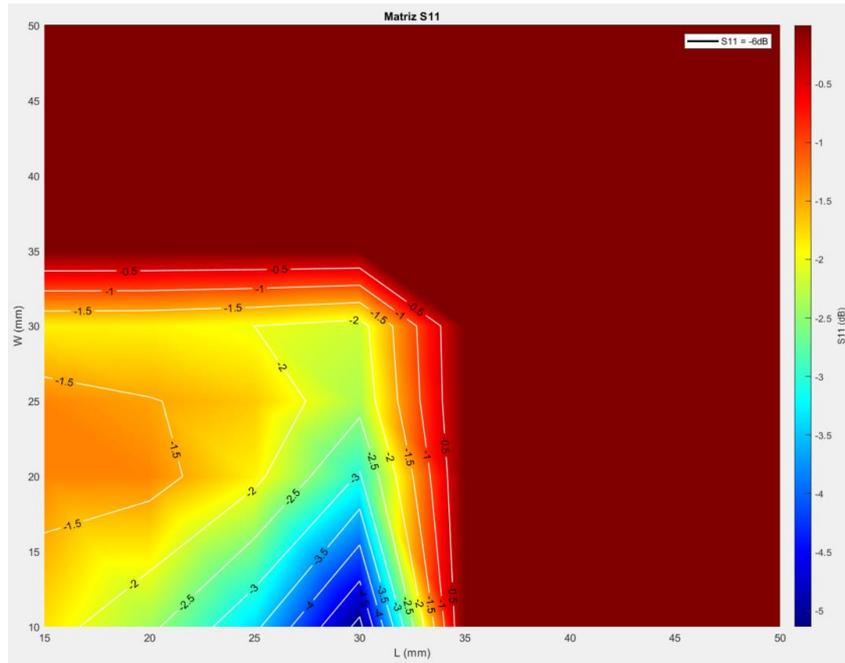


Figura 106. Matlab reusabilidad Mapa Calor

Para finalizar este apartado se muestran la comparativa en cuanto a reusabilidad si se cambian las frecuencias, ya que resulta rápido obtener estos resultados y pueden agilizar los análisis que se requieran:

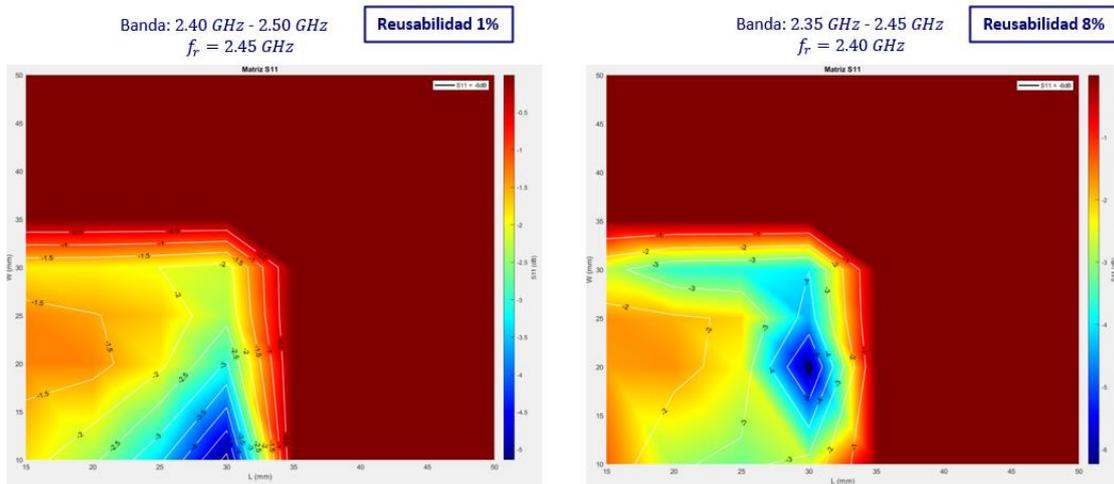


Figura 107. Matlab reusabilidad comparativa

## 4.2. Diseño antena Booster con Matlab

Para finalizar con las automatizaciones se ha querido realizar un script en Matlab que fuese capaz de diseñar una antena *Booster* desde cero en CST.

Así pues, el código desarrollado hace uso de determinadas funciones que se utilizaron en otro trabajo del mismo autor que la presente memoria. El objetivo es demostrar que se puede llegar a realizar todo el proceso de diseño y análisis de antenas a través de instrucciones de Matlab y en un entorno de simulación tan potente como es CST

La función de Matlab desarrollada es: `booster_antenna(groundplane, substrate)`

La función hace las siguientes acciones:

- Crea un nuevo proyecto de CST
- Dibuja en el "Modeler 3D" la estructura de la antena *Booster* con el material del plano de masa y del sustrato indicado en los parámetros de entrada.
- Añade las variables con las dimensiones en la "Parameter List".
- Guarda el proyecto en un directorio.

Los parámetros de la antena diseñada son:

**Material sustrato:** FR4 1 mm de grosor  
constante dieléctrica  $\epsilon_r = 4.15$   
tangente de pérdidas  $\tan\delta = 0.017$

**Material conductor:** cobre 0.035 mm de grosor  
conductividad  $\sigma = 5.9 \cdot 10^7$  S/m

Las dimensiones de la antena diseñada son las siguientes:

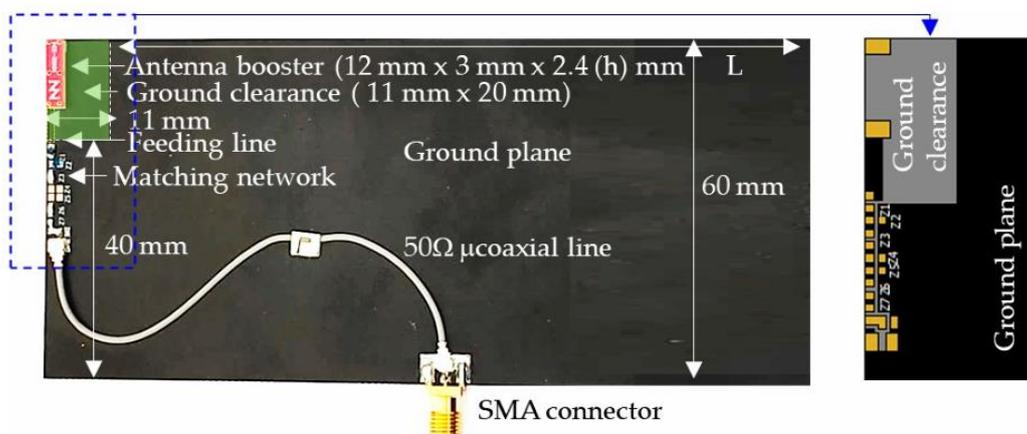


Figura 108. Antena *Booster* dimensiones

En la siguiente imagen se puede ver el funcionamiento del script:

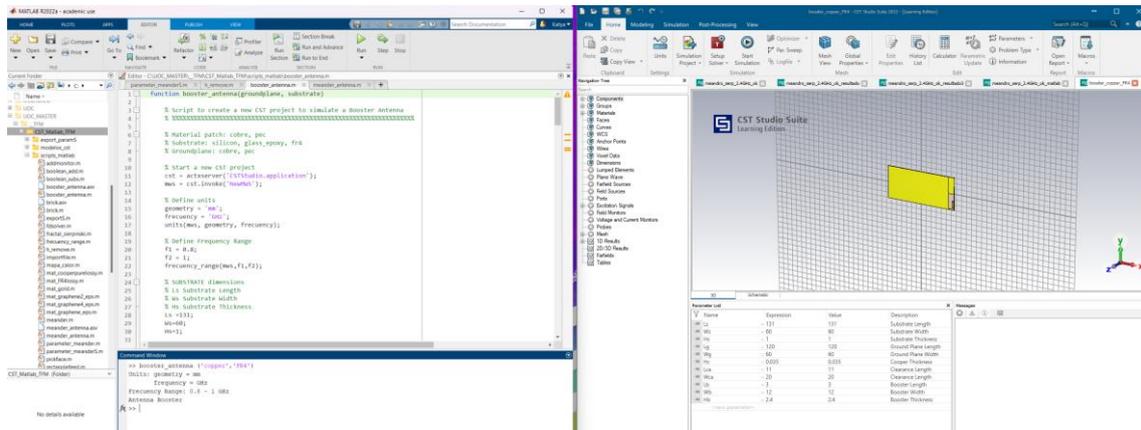


Figura 109. Antena Booster script

La antena diseñada es:

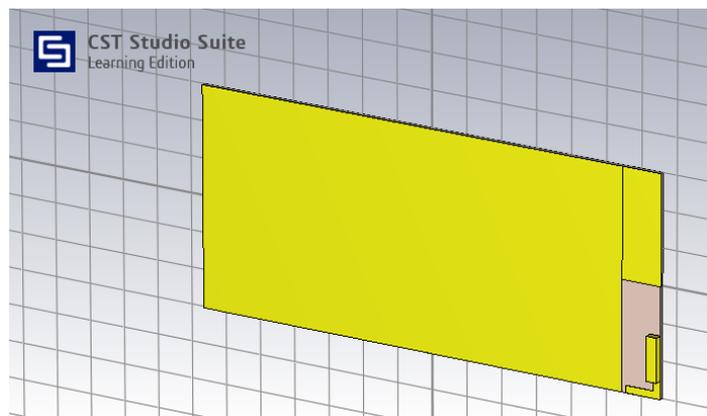


Figura 110. Antena Booster modelo

El resultado de la simulación es el siguiente, que comparado con el especificado en el trabajo [1], resulta bastante similar:

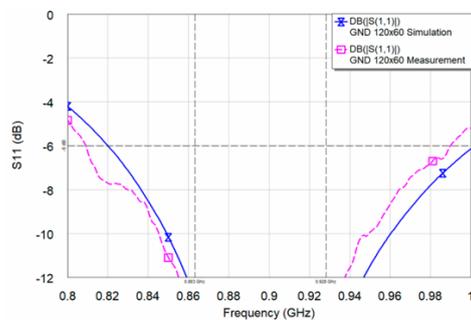


Figura 3. Simulated  $S_{11}$  for the antenna booster with a matching network (Figure 2) and measurement of  $S_{11}$  (Figure 4).

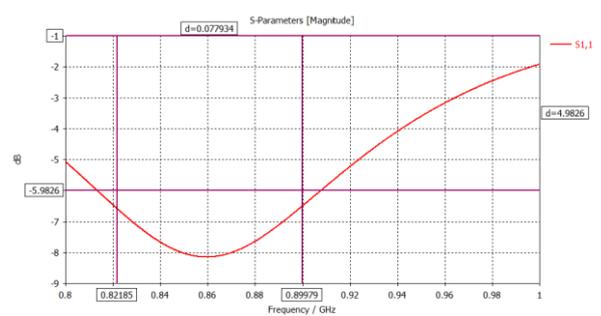


Figura 111. Antena Booster simulación

### **4.3. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se han mostrado todas las herramientas que se han desarrollado a lo largo del trabajo para facilitar las tareas de análisis y diseño de antenas.

Se ha conseguido explorar las posibilidades que ofrece el software CST Studio Suite LE [17] en cuanto a agilizar la creación de diseños y la ejecución de simulación, haciendo uso de la integración con Matlab.

Se ha generado una herramienta útil que permite disminuir el número de pasos a realizar por parte del diseñador de antenas, ya que dado un proyecto de CST hace las simulaciones y análisis de datos en una única ejecución.

Finalmente, se ha mostrado un ejemplo de uso de cómo se puede diseñar una antena real en CST mediante Matlab.

## 5. Conclusiones y trabajos futuros

Como conclusiones del presente trabajo cabe destacar que se ha identificado que el área de diseño de antenas es una disciplina que requiere de un tiempo elevado de diseño y por ello se hace necesario el desarrollo de herramientas que faciliten tanto la tarea de diseño como de análisis de datos.

A lo largo del proyecto se han presentado diversos diseños de tipo antena impresa con forma de meandro serpenteante sobre un sustrato FR-4 con la pretensión de que funcionasen en la banda ISM 2.4 GHz. Se ha conseguido un diseño cuya geometría es resonante sin necesidad de una red de adaptación con elementos pasivos. La antena presenta unos valores aceptables en cuanto a adaptación y eficiencia total. El ancho de banda de impedancia de la antena ha resultado ser menor que el revisado en los diseños de los trabajos [1] y [2]; y esto ha resultado un factor determinante a la hora de dar un buen resultado en cuanto a reusabilidad para distintos tamaños de plano de masa.

De hecho, este diseño consigue una **reusabilidad** del **1%** a la frecuencia de resonancia de 2.45 GHz y una eficiencia del 74% en la banda de interés.

Se ha comprobado que el mismo diseño aporta mejores valores en cuanto a reusabilidad para una frecuencia un poco menor, llegando a conseguir una **reusabilidad** del **12%** para la frecuencia de 2.37 GHz.

No obstante, la conclusión sobre las comparativas realizadas indica que la antena *Booster* es la más robusta en cuanto a reusabilidad. No se ha podido realizar la comparación en cuanto a eficiencia total por ser de distintos tamaños el plano de masa de la antena diseñada y de la antena *Booster* o de la espiral.

Se ha mostrado con casos de uso todas las herramientas desarrolladas a lo largo del trabajo para facilitar las tareas de análisis y diseño de antenas.

Se han investigado las capacidades del software CST Studio Suite LE [17] para acelerar el proceso de creación de diseños y la realización de simulaciones, aprovechando la integración con Matlab.

Se ha desarrollado una herramienta práctica que reduce la cantidad de pasos que el diseñador de antenas debe realizar, ya que permite ejecutar las simulaciones y el análisis de datos de un proyecto de CST en una única operación.

Por último, se ha presentado un ejemplo de cómo diseñar una antena real en CST utilizando Matlab.

Como líneas futuras de investigación, se plantea el desarrollo del código Matlab para dibujar en CST antenas con otras geometrías distintas a la propuesta.

También puede resultar un buen punto de partida analizar diseños con otros materiales para el sustrato o para el plano de masa, así como otros grosores de los mismos materiales y valorar cómo influye en los parámetros de diseño de la antena el cambio.

Por último, hay que mencionar que los dispositivos IoT han de adaptarse al rápido crecimiento de nuevas aplicaciones y ello produce un sinfín de nuevas líneas de investigación. Tanto en cuanto a geometrías de antenas, como en cuanto a materiales sobre los que se imprimen.

## 6. Glosario

<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i> o Internet de las Cosas
<b>S<sub>11</sub></b>	Coeficiente de reflexión
<b>GHz</b>	Gigahercio
<b>ROE</b>	Relación de Onda Estacionaria
<b>ISM</b>	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>
<b>BW</b>	Ancho de banda de impedancia
<b>Mm</b>	Milímetro
<b>dB</b>	Decibelio
<b>PBC</b>	<i>Printed Circuit Board</i>

## 7. Bibliografía

- [1] J. Gui, A. Andújar, J. Anguera, "On the Reuse of a Matching Network for IoT Devices Operating at 900 MHz Embedding Antenna Boosters". *Electronics* 2022, 11, 1267. <https://doi.org/10.3390/electronics11081267>
- [2] B.Oller, A. Andújar, J. Anguera, "Antenna Booster Versus a Spiral Monopole Antenna for Single-Band Operation at 900 MHz". *Electronics* 2023, 12, 2067. <https://doi.org/10.3390/electronics12092067>
- [3] C. Y. Cheung, J. S. M. Yuen y S. W. Y. Mung, "Miniaturized Printed Inverted-F Antenna for Internet of Things: A Design on PCB with a Meandering Line and Shorting Strip," *Hindawi. International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, Art. no. 5172960, 5 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5172960>
- [4] K. Diallo, A. NGom, A. Diallo, J. M. Ribero, I. Dioum and S. Ouya, "Efficient dual-band PIFA antenna for the Internet of Things (IoT)," *2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, Västerås, Sweden, 2018, pp. 1-4, doi: [10.1109/CAMA.2018.8530584](https://doi.org/10.1109/CAMA.2018.8530584)
- [5] M. Shahidul Islam, M. T. Islam, M. A. Ullah, G. Kok Beng, N. Amin and N. Misran, "A Modified Meander Line Microstrip Patch Antenna With Enhanced Bandwidth for 2.4 GHz ISM-Band Internet of Things (IoT) Applications," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127850-127861, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2940049](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940049)
- [6] R. Monisha and B. Bhuvaneshwari, "Design of meander line antenna for wearable applications," *2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India, 2018, pp. 623-625, doi: [10.1109/CESYS.2018.8723932](https://doi.org/10.1109/CESYS.2018.8723932).
- [7] Atmel-42332-ISM-Band-Antenna-Reference-Design\_Application-Note\_AT09567 [https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Atmel-42332-ISM-Band-Antenna-Reference-Design\\_Application-Note\\_AT09567.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Atmel-42332-ISM-Band-Antenna-Reference-Design_Application-Note_AT09567.pdf)
- [8] Antenna Design and RF Layout Guidelines  
Authors: Tapan Pattnayak, Guhapriyan Thanikachalam Associated Part Family: CY8C4XXX-BL, CYBL1XXXX, CY8C6XXXXX-BL Related Application Notes: <http://www.cypress.com/go/AN91445>
- [9] J.García. "Diseño de antenas pequeñas para dispositivos IoT en banda ISM 900". TFM Junio 2023. <http://hdl.handle.net/10609/148141>
- [10] J. Alonso-Zárate. "Sistemas de comunicación en la banda ISM," *Universitat Oberta de Catalunya (UOC PID\_00247330, 2012. [En línea]. Disponible en: [https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/21/PLA4\\_Sistemas%20de%20comunicaci%C3%B3n%20en%20la%20banda%20ISM.pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/21/PLA4_Sistemas%20de%20comunicaci%C3%B3n%20en%20la%20banda%20ISM.pdf). [Consultado: 20 de marzo de 2024].*
- [11] J. Anguera y A. Pérez, "Teoría de Antenas," *Universitat Ramon Llull*, 2008.
- [12] A. A. Linares y J. A. Pros, "La antena en un sistema de telecomunicación," *Fundació Universitat Oberta de Catalunya, Quinta edición, sep. 2020. PID\_00277494*

[13] P. W. Chan, H. Wong y E. K. N. Yung, "Dual-band printed inverted-F antenna for DCS, 2.4GHz WLAN applications," en 2008 Loughborough Antennas and Propagation Conference, Loughborough, UK, 2008, pp. 185-188, doi: [10.1109/LAPC.2008.4516897](https://doi.org/10.1109/LAPC.2008.4516897).

[14] J. Anguera, N. Toporcer, A. Andujar, "Slim booster bars for electronic devices"  
US Patent number 9960478, 2018/5/1

[15] J. Anguera, A. Andújar, G. Mestre, J. Rahola, and J. Juntunen, "Design of Multiband Antenna Systems for Wireless Devices Using Antenna Boosters", IEEE Microwave Magazine, Dec. pp.102-114, 2019. doi: [10.1109/MMM.2019.2941662](https://doi.org/10.1109/MMM.2019.2941662)

[16] J. Anguera, C. Picher, A. Bujalance, and A. Andújar, "Ground Plane Booster Antenna Technology for Smartphones and Tablets", Microwave and Optical Technology Letters, vol.58, no. 6, pp.1289-1294, June 2016. <https://doi.org/10.1002/mop.29788>

### **Documentación CST y Matlab:**

[17] CST Computer Simulation Technology, "Antenna Simulation," Application Note CST ESTUDIO SUITE, Kra, Jeb, v1.0, 02. July 2012. [En línea]. Disponible en: [www.cst.com](http://www.cst.com). [Consultado: 2 de marzo de 2024].

[18] "CST Studio Suite - High Frequency Simulation.pdf," Massachusetts Institute of Technology. [En línea]. Disponible en: [https://space.mit.edu/RADIO/Documentation/CST\\_Studio\\_Suite\\_-\\_High\\_Frequency\\_Simulation.pdf](https://space.mit.edu/RADIO/Documentation/CST_Studio_Suite_-_High_Frequency_Simulation.pdf). [Consultado: 5 de marzo de 2024].

[19] "TCSTInterface: CST Studio Suite to MATLAB Interface," MATLAB Central File Exchange. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72228-tcstinterface-cst-studio-suite-to-matlab-interface>. [Consultado: 5 de abril de 2024].

[20] K. Frolov, "Control de CST MWS mediante Matlab" Habr, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://habr.com/ru/post/325012/>. [Consultado: 10 de abril de 2024].

[21] A. Mishchenko, "Trabajar con parámetros CST de Matlab" Habr, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://habr.com/ru/post/336396/>. [Consultado: 20 de abril de 2024].

[22] Symeon Symeonidis. (2018). simos421/CST-MATLAB-API: CST-MATLAB-API (v1.0.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1237969>

### **Documentación de CST OLE Automation server:**

[23] Massachusetts Institute of Technology, "VBA\_3D - MIT Space Systems Laboratory," MIT Space Systems Laboratory. [En línea]. Disponible en: [https://space.mit.edu/RADIO/CST\\_online/mergedProjects/VBA\\_3D/whnjs.htm](https://space.mit.edu/RADIO/CST_online/mergedProjects/VBA_3D/whnjs.htm). [Consultado: 25 de abril de 2024].

### **Imágenes:**

[24] [Imagen de RedesTelecom](#)

## 8. Anexo I

### Código Matlab

Los scripts adjuntos se corresponden con las funciones implementadas en Matlab para realizar los análisis de forma automática, y también para lanzar instrucciones en CST y generar los modelos de forma automática.

### Función mapa\_total.m

```
mapa_total(filename)
```

Como parámetros de entrada tiene el fichero de texto plano donde se han exportado los resultados del parámetro  $S_{11}$  para las distintas simulaciones desde CST.

La función extrae la matriz de parámetros  $S_{11}$  del fichero exportado de CST y dibuja el Mapa de Calor para el peor  $S_{11}$  de la banda ISM 2.45 GHz: 2.4 GHz – 2.5 GHz.

```
function mapa_total(filename)
% Function to extract the S11 matrix from the exported CST file
% Plots the Heat Map for the worst S11 at the extremes of the ISM 2.45GHz
band: 2.4 GHz - 2.5 GHz
% Input parameters:
%   filename: Name of the file with exported S11 data.

% Open the file
fid = fopen(filename, 'r');

% Variables to store data
frequencies = [];
S11_values = [];
Ls_values = [];
Ws_values = [];

% Read the file line by line
if fid ~= -1
    tline = fgetl(fid);
    while ischar(tline)
        if contains(tline, '#Parameters')
            % Read the parameters
            params = regexp(tline, '[-+]?[d*\.]?[d+](?[eE]([-+]?[d+]?)?', 'match');
            Ls = str2double(params{5});
            Ws = str2double(params{12});
        elseif ~isempty(tline) && ~startsWith(tline, '#')
            % Read frequency and S11 data
            data = str2double(strsplit(tline, {'\t', ' '}));
            frequency = data(1);
            S11 = data(2);

            % Store the data if they are finite
            if isfinite(frequency) && isfinite(S11) && isfinite(Ls) &&
isfinite(Ws)
                frequencies = [frequencies; frequency];
                S11_values = [S11_values; S11];
                Ls_values = [Ls_values; Ls];
                Ws_values = [Ws_values; Ws];
            end
        end
        tline = fgetl(fid);
    end
end
```

```

        end
        % Close the file
        fclose(fid);
    else
        error('No se pudo abrir el archivo.');
```

end

```

% Construct the S11_24 matrix
target_frequency = 2.35;
target_frequency = round(target_frequency, 3);
frequency_index = find(round(frequencies,3) == target_frequency);
unique_Ls = unique(Ls_values);
unique_Ws = unique(Ws_values);
S11_24 = zeros(length(unique_Ls), length(unique_Ws));

% Fill the S11_24 matrix with the values read from the file
for i = 1:length(frequency_index)
    row_index = find(unique_Ls == Ls_values(frequency_index(i)));
    col_index = find(unique_Ws == Ws_values(frequency_index(i)));
    S11_24(col_index, row_index) = S11_values(frequency_index(i));
end

% Construct the S11_25 matrix
target_frequency = 2.45;
target_frequency = round(target_frequency, 3);
frequency_index = find(round(frequencies,3) == target_frequency);
unique_Ls = unique(Ls_values);
unique_Ws = unique(Ws_values);
S11_25 = zeros(length(unique_Ls), length(unique_Ws));

% Fill the S11_25 matrix with the values read from the file
for i = 1:length(frequency_index)
    row_index = find(unique_Ls == Ls_values(frequency_index(i)));
    col_index = find(unique_Ws == Ws_values(frequency_index(i)));
    S11_25(col_index, row_index) = S11_values(frequency_index(i));
end

S11 = max(S11_24, S11_25);

% Display the S11 matrix
disp(S11);
count = sum(S11 <= -5.9); % Count how many elements are greater than n
disp(count); % Display the result

figure('Name', 'S11');
```

```

% Plot the S11 matrix
pcolor(unique_Ws, unique_Ls, S11);
colormap jet;
shading interp;
c = colorbar('vert');
c.Label.String = 'S11 (dB)';

xlabel('L (mm)');
ylabel('W (mm)');
title('Matriz S11');
hold on;

% Plot the contour
contour(unique_Ws, unique_Ls, S11, 'ShowText','on', 'LineWidth', 1,
'LineColor', 'w');
```

```

% Add a specific contour for S11 = -6dB
contour(unique_Ws, unique_Ls, S11, [-6 -6], 'ShowText','on', 'LineWidth', 2,
'LineColor', 'k');
legend('', '', 'S11 = -6dB')
```

## Función parameter\_meanderS11.m

```
parameter_meanderS11()
```

Como parámetros tiene la ruta donde está almacenado el fichero de CST con el modelo a analizar y la banda de frecuencias que por defecto es: 2.4 GHz – 2.5 GHz.

La función abre el proyecto CST indicado que ya debe existir previamente, y:

- Ejecuta las simulaciones en CST.
- Realiza la gráfica de los  $S_{11}$  en Matlab.
- Exporta los datos de frecuencia/  $S_{11}$  en un fichero txt.
- Invoca a una segunda función encargada de dibujar en Matlab el Mapa de Calor.

Esta función hace uso de otra función adicional que es la que realiza la gráfica del Mapa de Calor, la función es:

```
plotS11Matrix(filename, target_frequencies)
```

La función extrae la matriz de parámetros  $S_{11}$  del fichero exportado de CST y dibuja el Mapa de Calor para el peor  $S_{11}$  de la banda ISM 2.45 GHz: 2.4 GHz – 2.5 GHz.

```
function parameter_meanderS11()
    % Function that performs the simulations, draws the S11 graph,
    % and stores all the data in a txt file and also draws the Heat Map

    % A total of 4x4 = 16 results in file: resultados_16.txt
    %y = [20 36 50 100]; % y es Ls
    %w = [15 20 50 100]; % w es Ws

    % A total of 8x8 = 64 results in file: resultados_64.txt
    %y = [10 20 25 30 35 40 45 50]; % y es Ls
    %w = [15 20 25 30 35 40 45 50]; % w es Ws
    % En parameters Lg = Ls - Lca y Wg = Ws

    cst = actxserver('CSTStudio.Application');
    mws = cst.invoke('NewMWS');
    mws.invoke('OpenFile',
'C:\UOC_MASTER\__TFM\CST_proyectos\meandro_serp_2.4GHz_ok_matlab.cst');
    solv = mws.invoke('Solver');
    export = mws.invoke('ASCIIExport');
    plot1d = mws.invoke('Plot1D');

    outputFileName =
'C:\UOC_MASTER\__TFM\CST_Matlab_TFM\export_paramS\demo.txt';
    fileID = fopen(outputFileName, 'w');

    % Initialize a figure for plotting
    figure;
    hold on;

    for i = 1:length(y)
        for j = 1:length(w)
            Lg = y(i) - 6;
            mws.invoke('StoreDoubleParameter', 'Lg', Lg);
            mws.invoke('StoreDoubleParameter', 'Ls', y(i));
            mws.invoke('StoreDoubleParameter', 'Wg', w(j));
```

```

        mws.invoke('StoreDoubleParameter', 'Ws', w(j));
        mws.invoke('Rebuild');
        solv.invoke('Start');

        str_y = num2str(y(i));
        str_w = num2str(w(j));

        % Export data to temporary file
        tempFileName =
strcat('C:\UOC_MASTER\__TFM\CST_Matlab_TFM\export_paramS\temp_y', str_y, '_w',
str_w, '.txt');
        mws.invoke('SelectTreeItem', '1D Results\S-Parameters\S1,1');
        plotId.invoke('PlotView', "magnitudedb");
        export.invoke('Reset');
        export.invoke('FileName', tempFileName);
        export.invoke('Mode', 'FixedNumber');
        export.invoke('Step', '1001');
        export.invoke('Execute');

        % Read the exported data
        data = head_remove(tempFileName);

        % Write header and data to the main output file
        fprintf(fileID, '#Parameters = {Hc=0.035; Hs=1; Lca=6; Lg=%f;
Ls=%f; Rcoat=0.2; Rcover=0.25; Rf=0.15; Rs=0.09; Wca=15; Wg=%f; Ws=%f; ot=3.5;
ts=15; w=0.6}\n', ...
        Lg, y(i), w(j), w(j));
        fprintf(fileID, '"Frequency / GHz"\t"S1,1 (%d) [Magnitude]"\n',
(i - 1) * length(w) + j);
        fprintf(fileID, '#-----\n');
        for k = 1:size(data, 1)
            fprintf(fileID, '%f\t%f\n', data(k, 1), data(k, 2));
        end

        % Plot the current data
        plot(data(:, 1), data(:, 2));

        % Delete the temporary file
        delete(tempFileName);
    end
end

fclose(fileID);

hold off;
grid on
xlabel('Frequency (GHz)')
ylabel('S-Parameters (dB)')
legendEntries = arrayfun(@(idx) sprintf('S1,1 (%d)', idx), 1:(length(y) *
length(w)), 'UniformOutput', false);
legend(legendEntries);

filename = 'C:\UOC_MASTER\__TFM\CST_Matlab_TFM\export_paramS\demo.txt';
target_frequencies = [2.4, 2.5];
plotS11Matrix(filename, target_frequencies);

end

```

```

% Function plotS11Matrix that Draws the Heat Map.
% Draw the Heat Map for the worst S11 at the extremes of the ISM 2.45GHz band:
2.4 GHz - 2.5GHz.
% Invoked from parameter_meanderS11.m
% Input parameters:
%   filename: Name of the file with the exported S11 data.
%   target_frequencies: Vector of target frequencies for S11 extraction.

function plotS11Matrix(filename, target_frequencies)

    % Open the file
    fid = fopen(filename, 'r');

    % Variables to store data
    frequencies = [];
    S11_values = [];
    Ls_values = [];
    Ws_values = [];

    % Read the file line by line
    if fid ~= -1
        tline = fgetl(fid);
        while ischar(tline)
            if contains(tline, '#Parameters')
                % Read the parameters
                params = regexp(tline, '[-+]?[d*\.]?[d+](?=[eE]([-+]?[d+]?)?)',
'match');

                Ls = str2double(params{5});
                Ws = str2double(params{12});
            elseif ~isempty(tline) && ~startsWith(tline, '#')
                % Read the frequency and S11 data
                data = str2double(strsplit(tline, {'\t', ' '}));
                frequency = data(1);
                S11 = data(2);

                % Store the data if they are finite
                if isfinite(frequency) && isfinite(S11) && isfinite(Ls) &&
isfinite(Ws)

                    frequencies = [frequencies; frequency];
                    S11_values = [S11_values; S11];
                    Ls_values = [Ls_values; Ls];
                    Ws_values = [Ws_values; Ws];
                end
            end
            tline = fgetl(fid);
        end
        % Close the file
        fclose(fid);
    else
        error('No se pudo abrir el archivo.');
```

```

        col_index = find(unique_Ws == Ws_values(frequency_index(i)));
        S11(col_index, row_index) = max(S11(col_index, row_index),
S11_values(frequency_index(i)));
    end
end

% Remove the -inf values from the S11 matrix

S11(S11== -inf) = 0;

% Display the S11 matrix
disp(S11);
count = sum(S11 <= -5.9);
disp(count);

figure('Name', 'S11');

% Plot the S11 matrix
pcolor(unique_Ws, unique_Ls, S11);
colormap jet;
shading interp;
c = colorbar('vert');
c.Label.String = 'S11 (dB)';

xlabel('L (mm)');
ylabel('W (mm)');
title('Matriz S11');

hold on;

% Contour plot
contour(unique_Ws, unique_Ls, S11, 'ShowText', 'on', 'LineWidth', 1,
'LineColor', 'w'); %k black - w white

% Add a specific contour for S11 = -6dB
contour(unique_Ws, unique_Ls, S11, [-6 -6], 'ShowText', 'on', 'LineWidth',
2, 'LineColor', 'k');

legend('', '', 'S11 = -6dB')
end

```

## Función booster\_antenna.m

```
booster_antenna(groundplane, substrate)
```

Como parámetros de entrada tiene los materiales para el sustrato y plano de masa.

La función crea un nuevo proyecto de CST y genera el modelo 3D de la antena *Booster* y lo guarda en un directorio.

```
function booster_antenna(groundplane, substrate)

% Script to create a new CST project to simulate a Booster Antenna
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Material patch: cobre, pec
% Substrate: silicon, glass_epoxy, fr4
% Groundplane: cobre, pec

% Start a new CST project
cst = actxserver('CSTStudio.application');
mws = cst.invoke('NewMWS');

% Define units
geometry = 'mm';
frequency = 'GHz';
units(mws, geometry, frequency);

% Define Frequency Range
f1 = 0.8;
f2 = 1;
frequency_range(mws, f1, f2);

% SUBSTRATE dimensions
% Ls Substrate Length
% Ws Substrate Width
% Hs Substrate Thickness
Ls =131;
Ws=60;
Hs=1;

% GROUNDPLANE dimensions
% Wg Ground Plane Width
% Lg Ground Plane Length
% Hc Ground Plane Thickness - Cooper Thickness
% Wca Clearance Area
Lg = 120;
Wg = 60;
Hc = 0.035; %%%

% GROUND CLEARANCE
Lca = 11;
Wca = 20;

% ANTENA BOOSTER
Lb = 3;
Wb = 12;
Hb = 2.4;

% FEEDING STRIP
wf = 5;
lf = 10.5;
```

```

hf = 2;
sf = 0.5;

% Create substrate
mat_FR4lossy(mws);
name = 'Substrate';
component = 'component';
material = 'FR-4 (lossy)';
Xrange = [-Ls/2 Ls/2];
Yrange = [-Ws/2 Ws/2];
Zrange = [0 Hs];
brick(mws, name, component, material, Xrange, Yrange, Zrange);

% Assign material
switch substrate
case 'glass_epoxy'
subs_glassepoxy(mws);
Solid = invoke(mws, 'Solid');
invoke(Solid, 'ChangeMaterial', 'component:Substrate', 'FR-4
(glass epoxy)');
case 'silicon'
subs_siliconlossy(mws);
Solid = invoke(mws, 'Solid');
invoke(Solid, 'ChangeMaterial', 'component:Substrate', 'Silicon
(lossy)');
otherwise
%disp('FR4')
end

% Reset View to Default
invoke(mws, 'ResetViewToStructure');

% Create groundplane
mat_cooperpurelossy(mws);
name = 'GroundPlane';
component = 'component';
material = 'Copper (pure)';
Xrange = [-Ls/2 Ls/2-Lca];
Yrange = [-Wg/2 Wg/2];
Zrange = [Hs Hs+Hc];
brick(mws, name, component, material, Xrange, Yrange, Zrange);

% Assign material
switch groundplane
case 'gold'
mat_gold(mws);
Solid = invoke(mws, 'Solid');
invoke(Solid, 'ChangeMaterial', 'component:GroundPlane', 'Gold');
case 'copper'
mat_cooperpurelossy(mws);
Solid = invoke(mws, 'Solid');
invoke(Solid, 'ChangeMaterial', 'component:GroundPlane', 'Copper
(pure)');
case 'PEC'
material = 'PEC';
Solid = invoke(mws, 'Solid');

invoke(Solid, 'ChangeMaterial', 'component:GroundPlane', material);
otherwise
disp('Copper (pure)')
end

% Reset View to Default
invoke(mws, 'ResetViewToStructure');

```

```

% Create clearance
mat_cooperpurelossy(mws);
name = 'Clearance';
component = 'component';
material = 'Copper (pure)';
Xrange = [55 66];
Yrange = [0 30];
Zrange = [Hs Hs+Hc];
brick(mws, name, component, material, Xrange, Yrange, Zrange);

% Reset View to Default
invoke(mws, 'ResetViewToStructure');

% Create antenna booster
mat_cooperpurelossy(mws);
name = 'Booster';
component = 'component';
material = 'Copper (pure)';
Xrange = [0 Lb];
Yrange = [0 Wb];
Zrange = [Hs Hs+Hb];
brick(mws, name, component, material, Xrange, Yrange, Zrange);

% Translate booster
name='component:Booster';
type='Translate';
translate(mws,name,type,Ls/2-Lb,-Ws/2+wf,0);

% Delete Booster
Solid = invoke(mws,'Solid');
invoke(Solid,'Delete','component:Booster');

% Rename Booster_1 -> Booster
Solid = invoke(mws,'Solid');
invoke(Solid,'Rename','component:Booster_1','component:Booster');

% Create feedline by poligon
% FEEDING STRIP
% wf = 5;
% lf = 10.5;
% hf = 2;
% sf = 0.5;
xr = [64 66 66 64];
yr = [-25 -25 -30 -30];

% hr May be the same as Hc = 0.035;
rectanglefeed(mws,xr,yr,Hc);

% Translate feed
name='component:feedline1';
type='Translate';
translate(mws,name,type,0,0,1);

% Delete feedline1
Solid = invoke(mws,'Solid');
invoke(Solid,'Delete','component:feedline1');

xrr = [64 56 56 64];
yrr = [-30 -30 -28 -28];

% hr May be the same as Hc = 0.035;
rectanglefeed(mws,xrr,yrr,Hc);

% Translate feed
name='component:feedline1';
type='Translate';

```

```

translate(mws,name,type,0,0,1);

% Delete feedline1
Solid = invoke(mws,'Solid');
invoke(Solid,'Delete','component:feedline1');

% Rename feedline1_1 -> feedline1
Solid = invoke(mws,'Solid');
invoke(Solid,'Rename','component:feedline1_1','component:feedline1');

% Boolean Addition feedline1 + feedline1_2
component1 = 'component:feedline1';
component2 = 'component:feedline1_2';
boolean_add(mws,component1,component2);

% Print model properties
fprintf("Antenna Booster\n");

% Reset View to Default
invoke(mws,'ResetViewToStructure');

% Reset View to Default
invoke(mws,'ResetViewToStructure');

% Parameters Update
% Substrate
store_parameter(mws, 'Ls', 131, 'Substrate Length', 3)
store_parameter(mws, 'Ws', 60, 'Substrate Width', 3)
store_parameter(mws, 'Hs', 1, 'Substrate Thickness', 3)
% Ground Plane
store_parameter(mws, 'Lg', 120, 'Ground Plane Length', 3)
store_parameter(mws, 'Wg', 60, 'Ground Plane Width', 3)

store_parameter(mws, 'Hc', 0.035, 'Cooper Thickness', 3)

store_parameter(mws, 'Lca', 11, 'Clearance Length', 3)
store_parameter(mws, 'Wca', 20, 'Clearance Length', 3)

store_parameter(mws, 'Lb', 3, 'Booster Length', 3)
store_parameter(mws, 'Wb', 12, 'Booster Width', 3)
store_parameter(mws, 'Hb', 2.4, 'Booster Thickness', 3)

% Reset View to Default
invoke(mws,'ResetViewToStructure');

%Save the project as a diferent name

invoke(mws,'SaveAs','C:\UOC_MASTER\__TFM\CST_Matlab_TFM\modelos_cst\booster"+"
_"+groundplane+"_"+substrate+".cst",'true');

end

```