

Análisis y Diseño de Antenas Mediante Matlab

Adrián Ruiz Salazar

Máster de Ingeniería de Telecomunicación (plan 2017)
Tecnologías de antenas

Dr. Jaume Anguera Pros y Dra. Aurora Andújar
Directores de Proyecto

Enero 2021



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/)

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Análisis y Diseño de Antenas Mediante Matlab</i>
Nombre del autor:	<i>Adrián Ruiz Salazar</i>
Nombre del consultor/a:	<i>Dr. Jaume Anguera Pros Dra. Aurora Andújar Linares</i>
Nombre del PRA:	<i>Germán Cobo</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	01/2021
Titulación:	Máster de Ingeniería de Telecomunicación (plan 2017)
Área del Trabajo Final:	<i>Tecnologías de antenas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español</i>
Palabras clave	<i>Matlab, Monopolo, Antena</i>
Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): <i>Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.</i>	
<p>Este trabajo surge de la falta de una herramienta para la caracterización y estudio de antenas 2D con geometrías no estándar de manera rápida y al alcance de cualquier estudiante. En él, se analizan las posibilidades de Matlab Antenna Toolbox para el estudio de antenas 2D con geometrías definidas en las librerías y también con las creadas mediante código o a partir de una imagen.</p> <p>La metodología seguida parte de observar las posibilidades de Matlab Toolbox en su interfaz gráfica para optimizar las dimensiones del plano de masa de una antena tipo monopolo. Después, se crean antenas 2D con formas diseñadas mediante código y se utiliza este procedimiento para mejorar el ancho de banda de un monopolo mediante la adición de un orificio en el plano de masa. Además, se añade al código la obtención de la carta de Smith y de un circuito de adaptación sin necesidad de realizar ningún cálculo, con la finalidad de adaptar la antena diseñada mediante código. Finalmente, se estudia la posibilidad de obtener una antena que podamos simular a partir de una imagen.</p> <p>La conclusión es que Matlab no solo es válido para la simulación de antenas 2D con geometrías de diseño propio, sino que, debido a su gran número de usuarios, sus múltiples herramientas y la posibilidad de poder tener todos los diseños y funciones en un fichero de código, se trata de un software que aporta unas funcionalidades para el análisis y diseño de antenas que no presenta ningún otro software del mercado.</p>	

Abstract (in English, 250 words or less):

This work arises from the lack of a tool for a rapid characterization and study of 2D antennas with non-standard geometries within the reach of any student. In this thesis, we analyze the possibilities of Matlab Antenna Toolbox for the study of 2D antennas with geometries defined in the libraries, created by code or from an image.

The methodology followed begins by observing the possibilities of Matlab Toolbox in its graphical interface to optimize the dimensions of the ground plane for a monopole antenna. Afterwards, 2D antennas with code-designed shapes are created. This procedure is used to improve the bandwidth of a monopole by adding a slot in the ground plane. In addition, the obtention of the Smith chart and a matching circuit are added to the code with no manual calculations needed in order to match the antenna designed by code. Finally, the possibility of generating an antenna from an image that can be simulated is studied.

The conclusion is that Matlab is not only valid for simulating 2D antennas with custom geometries, but also, due to its large number of users, its multiple tools, and the possibility of having all the designs and functions in a text file. Matlab is a software that provides functionalities for the analysis and design of antennas that no other software in the market is capable of.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo.....	1
1.2 Objetivos del Trabajo.....	1
1.3 Enfoque y método seguido.....	2
1.4 Planificación del Trabajo.....	2
1.5 Breve resumen de productos obtenidos.....	3
2. Estado del arte.....	4
3. Optimización gráfica de las dimensiones de un plano de masa.....	6
3.1 Metodología y limitaciones.....	6
3.2 Estudio.....	7
3.3 Resultado.....	17
3.4 Conclusiones.....	18
4. Simulación de geometrías creadas mediante código.....	19
4.1 Metodología y limitaciones.....	19
4.2 Estudio.....	20
4.3 Conclusiones.....	25
5. Mejora del ancho de banda mediante la adición de un orificio en el plano de masa.....	27
5.1 Metodología y limitaciones.....	27
5.2 Estudio.....	28
5.3 Conclusiones.....	32
6. Redes de adaptación para antenas.....	33
6.1 Metodología y limitaciones.....	33
6.2 Estudio.....	34
6.3 Conclusiones.....	47
7. Obtención de una antena 2D a partir de una imagen.....	48
7.1 Metodología y limitaciones.....	48
7.2 Estudio.....	48
7.3 Conclusiones.....	56
8. Conclusiones.....	57
9. Glosario.....	58
10. Bibliografía.....	59
11. Anexos.....	61
11.1 Código exportado de InvertedLCoplanar.....	61
11.2 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60).....	62
11.3 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con el monopolo desplazado al vértice.....	64
11.4 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con orificios en su plano de masa.....	66
11.5 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte superior.....	68
11.6 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte superior y con circuito de adaptación.....	70
11.7 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte media y con circuito de adaptación.....	72

11.8 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte inferior y con circuito de adaptación.....	74
11.9 Código exportado Image Processing Toolbox.....	76
11.10 Código generado para la simulación de una antena obtenida a partir de una imagen.....	79

Lista de figuras

Ilustración 1 - Representación InvertedLCoplanar	8
Ilustración 2 - Información disponible tras simular	9
Ilustración 3 - Gráficas S_{11} para un ancho de 150mm	10
Ilustración 4 - Gráficas S_{11} para un ancho de 120mm	11
Ilustración 5 - Gráficas S_{11} para un ancho de 100mm	12
Ilustración 6 - Gráficas S_{11} para un ancho de 80mm	13
Ilustración 7 - Gráficas S_{11} para un ancho de 60mm	14
Ilustración 8 - Gráficas S_{11} para un ancho de 40mm	15
Ilustración 9 - Gráficas S_{11} para una longitud de 111mm	16
Ilustración 10 - Bandwidth relativo en función de la longitud	17
Ilustración 11 - Bandwidth relativo en función del ancho	18
Ilustración 12 - InvertedLCoplanar generada por código	22
Ilustración 13 - Información disponible tras simular una antena creada	22
Ilustración 14 - InvertedLCoplanar con el monopolo desplazado	23
Ilustración 15 - Gráfica S_{11} de antena (80x60mm) con monopolo desplazado	24
Ilustración 16 - InvertedLCoplanar con orificios	25
Ilustración 17 - Orificio en la parte superior del plano de masa	28
Ilustración 18 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte superior	29
Ilustración 19 - Orificio en la parte media del plano de masa	30
Ilustración 20 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte media	30
Ilustración 21 - Orificio en la parte inferior del plano de masa	31
Ilustración 22 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte inferior	31
Ilustración 23 - Carta de Smith sin circuito de adaptación para antena sin orificio	35
Ilustración 24 - Circuitos de adaptación para antena sin orificio	35
Ilustración 25 - Gráfica S_{11} de antena sin orificio adaptada con el circuito 1	36
Ilustración 26 - Gráfica S_{11} de antena sin orificio adaptada con el circuito 2	36
Ilustración 27 - Camino de adaptación del circuito 1	37
Ilustración 28 - Carta de Smith sin circuito de adaptación para antena con orificio en la parte superior	38
Ilustración 29 - Circuitos de adaptación para antena con orificio en la parte superior	38
Ilustración 30 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte superior adaptada con el circuito 1	39
Ilustración 31 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte superior adaptada con el circuito 2	39
Ilustración 32 - Camino de adaptación del circuito 1	40
Ilustración 33 - Carta de Smith sin circuito de adaptación para antena con orificio en la parte media	41
Ilustración 34 - Circuitos de adaptación para antena con orificio en la parte media	41
Ilustración 35 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte media adaptada con el circuito 1	42
Ilustración 36 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte media adaptada con el circuito 2	42
Ilustración 37 - Camino de adaptación del circuito 1	43

Ilustración 38 - Carta de Smith sin circuito de adaptación para antena con orificio en la parte inferior	44
Ilustración 39 - Circuitos de adaptación para antena con orificio en la parte inferior	44
Ilustración 40 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte inferior adaptada con el circuito 1	45
Ilustración 41 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte inferior adaptada con el circuito 2	45
Ilustración 42 - Camino de adaptación del circuito 1	46
Ilustración 43 - Monopoleloop.png	49
Ilustración 44 - Graphic Cut	49
Ilustración 45 - Active Contours	50
Ilustración 46 - Export MaskedImage	50
Ilustración 47 - Máscara aplicada sobre la imagen original	53
Ilustración 48 - Puntos del perímetro en ejes cartesianos y escala real	54
Ilustración 49 - Reducción del número de puntos en un factor 32	54
Ilustración 50 - Antena generada a partir de una imagen	55
Ilustración 51 - Información disponible tras simular antena obtenida	55
Ilustración 52 - Carta de Smith de la antena obtenida	56

Lista de Tablas

Tabla 1 - Comparativa de requisitos mínimos CST y Matlab	4
Tabla 2 - Bandwidth relativo para un ancho de 150mm	10
Tabla 3 - Bandwidth relativo para un ancho de 120mm	11
Tabla 4 - Bandwidth relativo para un ancho de 100mm	12
Tabla 5 - Bandwidth relativo para un ancho de 80mm	13
Tabla 6 - Bandwidth relativo para un ancho de 60mm	14
Tabla 7 - Bandwidth relativo para un ancho de 40mm	15
Tabla 8 - Bandwidth relativo para una longitud de 111mm	16
Tabla 9 - Comparativa entre antena creada y contenida en la librería	23
Tabla 10 - Comparativa entre antena monopolo centrado y desplazado	24
Tabla 11 - Comparativa entre antena sin orificio y orificio en la parte superior	29
Tabla 12 - Comparativa entre antena sin orificio y orificio en la parte media	30
Tabla 13 - Comparativa entre antena sin orificio y orificio en la parte inferior	32
Tabla 14 - Comparativa entre antena sin orificio según circuito de adaptación	37
Tabla 15 - Comparativa entre antena con orificio en la parte superior según circuito de adaptación	40
Tabla 16 - Comparativa entre antena con orificio en la parte media según circuito de adaptación	43
Tabla 17 - Comparativa entre antena con orificio en la parte inferior según circuito de adaptación	46

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Durante los últimos años, la telefonía y el uso de dispositivos móviles ha crecido exponencialmente. Con ello ha aumentado la variedad de antenas 2D que requieren presentar un comportamiento multibanda y que están limitadas por tamaño. En consecuencia de las necesidades anteriores, cada vez son más los diseños que modifican la geometría del plano de masa para así obtener las características deseadas [1]–[7].

Debido a la rápida evolución de estas antenas es necesario el estudio de una herramienta que permita su caracterización y el efecto de la geometría del plano de masa. Si bien es cierto que existen aplicaciones software que permiten realizar simulaciones muy precisas y complejas para geometrías diseñadas, en el ámbito académico y universitario estas aplicaciones normalmente se descartan debido a sus costosas licencias, sus interfaces complejas y la alta capacidad de computación requerida por estas mismas.

En el presente trabajo se demuestra la viabilidad y la complejidad de Matlab como alternativa para la simulación rápida de antenas en 2D no estándar. Matlab es una herramienta de cómputo ampliamente utilizada en entornos académicos. Se trata de un software compatible con multitud de equipos y sistemas operativos y, además, en las titulaciones universitarias técnicas se proporciona a los estudiantes licencias para el uso de esta aplicación: está presente en más de 6500 universidades en todo el mundo y tiene más de 4 millones de usuarios [8]. Matlab es perfectamente válido para el estudio rápido de antenas 2D, así como de antenas con distintas geometrías, ya que presenta gran cantidad de información del comportamiento de una antena dada una geometría que puede servir como un análisis preliminar. Por otro lado, es una potente herramienta didáctica para definir el comportamiento de una PCB aislada en equipos domésticos.

1.2 Objetivos del Trabajo

Los objetivos del presente trabajo, que se analizarán haciendo uso de Matlab y sus herramientas, son los siguientes:

- Obtener el tamaño de plano de masa óptimo en una antena del tipo InvertedLCoplanar para una frecuencia dada.
- Simular antenas en 2D con geometrías creadas no incluidas en las librerías de Matlab.

- Mejorar el rendimiento de una antena InvertedLCoplanar de tamaño inferior al óptimo mediante la modificación de la geometría del plano de masa.
- Obtener una red de adaptación para una antena y frecuencias dadas
- Simular una antena cuya geometría se obtiene a partir de una imagen o foto.

1.3 Enfoque y método seguido

Para la realización de este trabajo, se ha partido de las tareas más sencillas, analizando diseños de antenas incluidos en las librerías de Matlab para obtener así un punto de referencia. Posteriormente, se han explorado otras opciones para simular geometrías creadas a partir de figuras geométricas, en concreto, mediante la adición y sustracción de rectángulos coplanares.

Una vez obtenido el procedimiento para simular geometrías creadas, la geometría de la antena utilizada al comienzo del proyecto fue replicada añadiendo un orificio en el plano de masa y estudiando cómo afecta al parámetro S_{11} la presencia y la posición de este orificio. Después se ha comparado el resultado obtenido con la referencia obtenida al principio.

Tras analizar, los resultados y bajo la sospecha de tener nuestro sistema desadaptado, se añadió una representación de la carta de Smith y posteriormente un circuito de adaptación. Finalmente, se han estudiado otros métodos de creación de geométricas para las simulaciones, como la obtención de geometrías a partir de imágenes.

Para todas las simulaciones y estudios realizados en este trabajo se ha tomado como frecuencia de referencia 900MHz. El parámetro de desempeño considerado para la validez de los resultados es el ancho de banda relativo considerando como S_{11} máximo (-6dB). Estos valores de referencia han sido escogidos debido a que son valores estándar utilizados en el campo de las telecomunicaciones. Los resultados de este estudio son extrapolables a cualquier otro valor si se repiten las simulaciones y la toma de datos para cumplir con los criterios considerados como válidos. Creemos que esta estrategia es la más acertada para cumplir los objetivos expuestos anteriormente, ya que no se busca una caracterización y estudio de las antenas en profundidad, sino explorar la variedad de posibilidades de la herramienta Matlab.

1.4 Planificación del Trabajo

Durante el transcurso y la realización de este trabajo se han mantenido dos reuniones de seguimiento mensuales para poner en común los avances y decidir cuáles son los siguientes pasos.

Las herramientas utilizadas han sido única y exclusivamente informáticas. Se han utilizado Matlab y Microsoft Office para la realización del trabajo y Microsoft Teams para mantener las reuniones entre el masterando y el tutor.

Durante el desarrollo de este trabajo hay cinco fases claramente diferenciadas:

- Selección de tema: Durante esta fase, se seleccionó el tema del trabajo en consenso con el tutor.
- Plan de trabajo: Durante esta fase se definen los objetivos del trabajo, así como el estado del arte y la bibliografía que considerar.
- Desarrollo del trabajo: Esta es la fase más extensa, en la que se realizan todos los estudios con las herramientas definidas y se obtienen y analizan los resultados.
- Realización de la memoria y presentación: Una vez obtenidos los resultados, estos han de ser plasmados en un documento y una presentación que contengan toda la información relevante.
- Defensa del trabajo: Este trabajo deberá ser defendido según la normativa de la universidad ante un tribunal con apoyo de la presentación realizada.

Todas las tareas anteriores son lineales en la escala temporal, es decir, no se ha comenzado una tarea sin antes considerar finalizada la anterior.

1.5 Breve resumen de productos obtenidos

En el presente trabajo se demuestra que Matlab es una herramienta útil para el análisis de antenas 2D con geometrías no estándar. Además, facilita la obtención de los componentes de circuitos de adaptación para una frecuencia deseada sin necesidad de realizar cálculos y de una forma muy visual. Como consecuencia, es una herramienta válida para el estudio de antenas no estándar, así como para llevar a cabo un análisis preliminar, evitando costes de computación de otras herramientas de simulación y costes de fabricación para prototipos no válidos.

2. Estado del arte

En la actualidad, son muchas las antenas 2D que debido a su limitación en tamaño modifican la geometría de su plano de masa para ser capaces de transmitir en más de una banda de frecuencia o presentar un rendimiento comparable con el de una antena con un plano de masa de mayor tamaño [1]–[3], [9]–[12]. Debido a la variedad de formas de estos planos de masa, es muy difícil conocer cómo afectan estas modificaciones al comportamiento de la antena. Por ello, es necesario disponer de una herramienta que, aunque no nos proporcione una fiabilidad y un detalle muy altos, nos sirva para poder observar de manera rápida cómo afectan estas variaciones, para así poder entender la razón de estas modificaciones sin dedicarle demasiados recursos.

Las herramientas utilizadas en el ámbito académico, así como los materiales didácticos en las telecomunicaciones, están centrados en los tipos de antenas comúnmente empleados. Las variaciones geométricas de estas antenas no están presentes en las librerías de las distribuciones de software para estudiantes ni se cubren durante sus estudios. Actualmente, para estudiar estas variaciones en las formas y planos de masa de las antenas 2D se utiliza software muy preciso, pero a la vez muy costoso. Aplicaciones como CST Studio Suite© están enfocadas a entornos profesionales donde los problemas a analizar pueden implicar entornos complejos como la presencia del cuerpo humano, materiales, estructuras embarcadas y por ello se requiere una inversión mayor. Para analizar problemas mucho más sencillos, Matlab es una herramienta adecuada, naturalmente no puede abordar los problemas complejos que puede abordar CST.

A continuación se muestra una tabla con los requisitos mínimos de ambas aplicaciones para Windows 10 [13]-[14]:

Requisitos mínimos	
CST Studio Suites	Matlab 2020 a
16GB Memoria RAM	4GB Memoria RAM
30GB HDD Disco Duro	3GB HDD Disco Duro

Tabla 1 - Comparativa de requisitos mínimos CST y Matlab

Como ya hemos mencionado, Matlab es una herramienta usada por más de 6500 universidades y con más de 4 millones de usuarios en todo el mundo, lo que la convierte en la herramienta idónea para el uso académico [8]. Sin embargo, sigue sin ser un software de referencia de antenas 2D con geometrías no estándar.

En este trabajo se analizan las posibilidades de Matlab utilizando su app Antenna Toolbox [15] para el análisis de antenas monopolo, en concreto, InvertedLCoplanar. Esta herramienta presenta una librería de antenas con una serie de geometrías y formas que a priori no permite modificar. No obstante, al permitir exportar e importar código escrito en lenguaje Matlab en este trabajo se ha logrado simular antenas 2D con formas de diseño propio. Además, mediante la modificación de este código, es posible obtener la gráfica de la

carta de Smith y los elementos de un supuesto circuito de adaptación para una frecuencia dada, junto con la representación de su camino de adaptación.

A diferencia de otras aplicaciones empleadas para el estudio de antenas, y debido a su gran variedad de usos, Matlab también permite hacer uso de Image Processing Toolbox [16] para obtener el código a partir de una imagen con el que crear una antena 2D para su posterior simulación.

3. Optimización gráfica de las dimensiones de un plano de masa

Mediante el uso de las herramientas disponibles en la interfaz de Antenna Toolbox y de los datos obtenidos tras la simulación se optimizan las dimensiones del plano de masa de una antena 2D

3.1 Metodología y limitaciones

En esta sección del trabajo se hará uso únicamente de los elementos que incluye la interfaz gráfica de Antenna Toolbox con sus limitaciones. Se crea una antena del tipo InvertedLCoplanar para una frecuencia de 900MHz con el monopolo situado en el punto medio del ancho del plano de masa y, en el borde de este, se utiliza esta frecuencia por ser la asignada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para la banda de comunicaciones móviles GSM-900.

Una vez obtenida la antena, se varían gradualmente los valores del ancho (entre 40mm y 150 mm) y el largo (entre 40mm y 140 mm) del plano de masa rectangular. Se calcula para cada caso el ancho de banda relativo. El valor de -6dB de referencia es escogido por ser un valor estándar en los estudios de antenas. Además, este estudio es extrapolable a otras frecuencias y otros valores de referencia tan solo repitiendo las simulaciones y toma de datos.

Para calcular el ancho de banda relativo se observa la gráfica del parámetro S_{11} anotando la frecuencia en la que el parámetro toma el valor de -6dB con pendiente negativa. A este valor lo llamaremos $f_{Inferior}$. Posteriormente, anotamos el siguiente valor de la gráfica en el que el parámetro S_{11} toma el valor de -6dB, en este caso, con pendiente positiva. A este valor lo llamaremos $f_{Superior}$. Con estos valores, se calculan la frecuencia central $f_{Central}$ y el ancho de banda relativo de la siguiente forma:

$$f_{Central} = \frac{f_{Inferior} + f_{Superior}}{2}$$

$$\text{Ancho de banda relativo \%} = \frac{f_{Superior} - f_{Inferior}}{f_{Central}} \cdot 100$$

Finalmente, se comparan los distintos anchos de bandas relativos para considerar como mejor opción aquella que presenta un porcentaje mayor, obteniendo así las dimensiones del plano de masa óptimas.

Al utilizar esta metodología encontramos las siguientes limitaciones:

- Matlab Antenna Toolbox no incluye circuitos de adaptación, por lo que, a pesar de que otras dimensiones podrían mejorar el resultado obtenido mediante la presencia de un circuito de adaptación, se han descartado estas dimensiones porque sin este circuito presentan un ancho de banda relativo menor.
- No se estudian todos los tamaños posibles contenidos entre los rangos mencionados anteriormente, por lo que es posible que algunos de los valores no probados presenten un desempeño ligeramente superior. El error es asumible ya que el objetivo de este trabajo no es la obtención del prototipo con dimensiones inmejorables.
- Los valores de f_{Inferior} y f_{Superior} han sido tomados de forma visual a partir de la gráfica. Este error humano no afecta a los objetivos de este trabajo.
- Las simulaciones han sido llevadas a cabo con un intervalo entre frecuencias de 5MHz entre punto y punto. Posteriormente, Matlab se encarga de unir estos puntos para formar la gráfica de S_{11} . Este error es despreciable para los objetivos del trabajo por ser S_{11} una función continua.
- Se ha tomado como valor de referencia el ancho de banda relativo sin tener en cuenta otras variables como, por ejemplo, el patrón de radiación.

3.2 Estudio

Para el estudio de la optimización, se fija primero un ancho del plano de masa y se estudian distintos valores de longitud para este ancho. Posteriormente, se repite el mismo proceso para otros anchos de plano de masa. Con esto se averigua la longitud óptima para este plano. Finalmente, con esta longitud obtenida se llevan a cabo simulaciones con distintos anchos de plano comprendidos entre los rangos con mejores resultados previos para mejorar la precisión.

Representación gráfica y datos disponibles

A continuación, se muestra un ejemplo detallado de la representación gráfica (Ilustración 1).

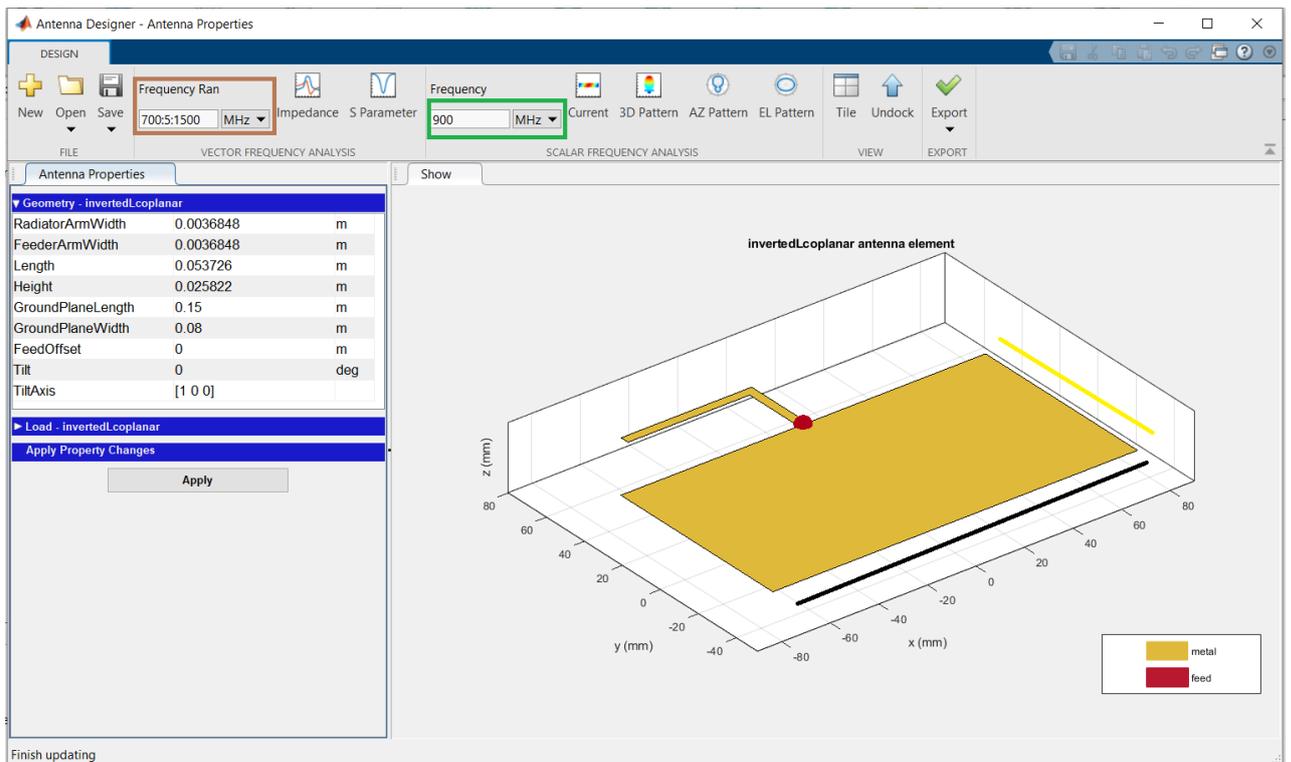


Ilustración 1 - Representación InvertedLCooplanar

- En el recuadro verde “Frecuencia” se indica la frecuencia de referencia para la antena (900MHz).
- En el recuadro marrón “Frecuencia Ran” se indica el rango de frecuencias a simular y el intervalo de entre cada simulación (700:5:1500 MHz).
- La línea amarilla representa la longitud del plano de masa, en este caso 80mm.
- La línea negra representa el ancho del plano de masa, en este caso 150mm.

Nótese: Los parámetros de ancho y largo del plano de masa están invertidos en el software respecto a lo considerado en el trabajo, es decir, el valor de GroundPlaneWidth corresponde con la longitud del plano de masa y el parámetro GroundPlaneLength corresponde con el ancho. Esto es así a lo largo de todo el trabajo.

Por otro lado, la información obtenida en la simulación es la mostrada en la siguiente ilustración (Ilustración 2).

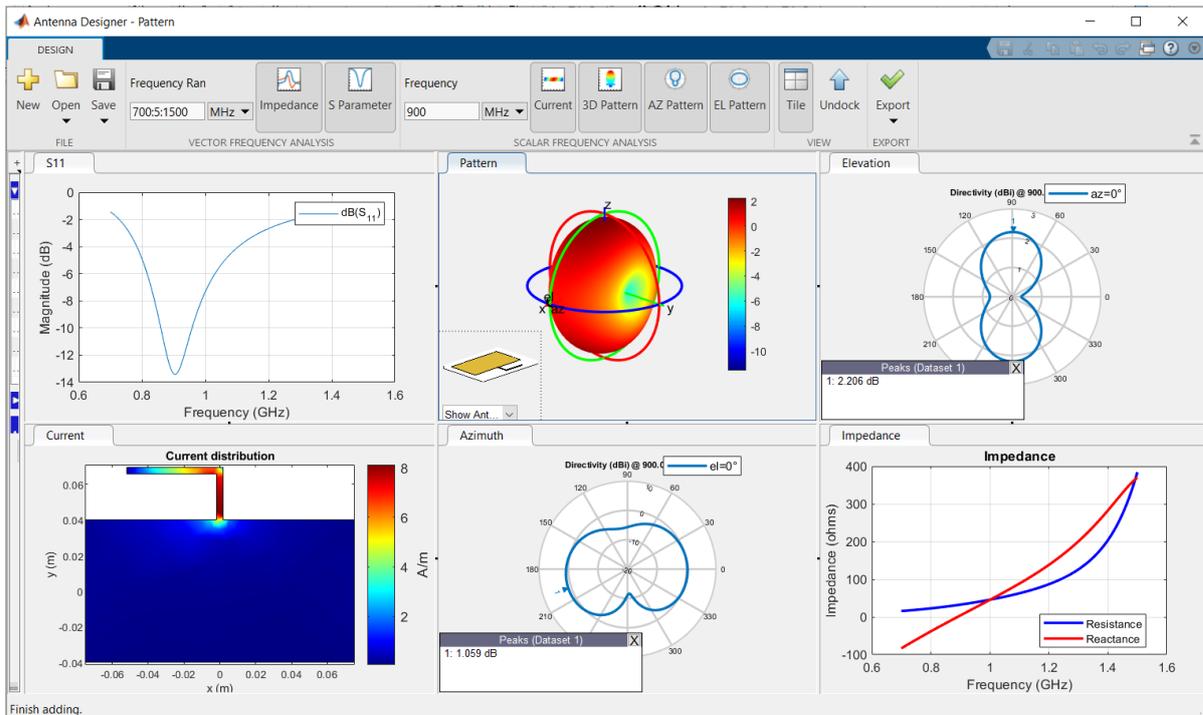


Ilustración 2 - Información disponible tras simular

Los datos mostrados empezando por la fila de arriba de izquierda a derecha son:

- Gráfica del parámetro S_{11} .
- Patrón de radiación en 3D.
- Diagrama de elevación.

Los datos de la fila inferior de izquierda a derecha son:

- Distribución de corriente.
- Diagrama acimutal.
- Representación de la impedancia y la reactancia.

Como ya se ha mencionado anteriormente, para este trabajo solamente se tiene en cuenta la gráfica de S_{11} para la obtención del ancho de banda relativo. El código exportado del ejemplo anterior se encuentra en el anexo 11.1 Código exportado de InvertedLCoplanar.

Ancho del plano de masa de 150mm

Para este ancho de plano de masa se realizan simulaciones variando la longitud de este anotando los valores de f_{Inferior} y f_{Superior} con el fin de obtener su ancho de banda relativo. Además, se superponen las distintas representaciones de S_{11} para poder observar la variación de este valor según la frecuencia y la longitud para un ancho del plano de masa dado. Se han obtenido los siguientes resultados:

Largo(mm)	f_{Inferior} MHz	f_{Superior} MHz	f_{Central} MHz	BW %
140	817	1053	935	25%
130	797	1065	931	29%
125	791	1070	930,5	30%
123	789	1075	932	31%
120	788	1078	933	31%
111	787	1082	934,5	32%
105	789	1078	933,5	31%
100	793	1074	933,5	30%
80	816	1032	924	23%
60	851	995	923	16%
40	905	957	931	6%

Tabla 2 - Bandwidth relativo para un ancho de 150mm

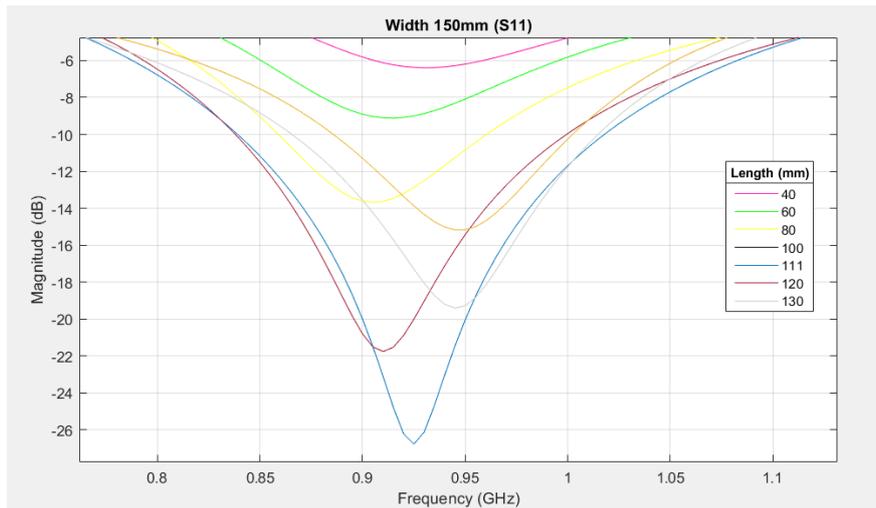


Ilustración 3 - Gráficas S_{11} para un ancho de 150mm

Se observa que, para un ancho del plano de masa de 150mm, se obtiene el mayor ancho de banda relativo para una longitud de plano de masa de 111mm (32%). Además, cabe destacar en la gráfica que la línea correspondiente a 111mm es la que presenta un ancho de banda mayor.

Ancho del plano de masa de 120mm

Se repite el procedimiento anterior para un ancho del plano de masa de 120mm, obteniendo los siguientes resultados:

Largo(mm)	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
140	821	1098	959,5	29%
130	786	1109	947,5	34%
125	778	1117	947,5	36%
123	776	1123	949,5	37%
120	779	1125	952	36%
111	778	1137	957,5	37%
105	782	1133	957,5	37%
100	790	1128	959	35%
80	820	1068	944	26%
60	860	1025	942,5	18%
40	915	995	955	8%

Tabla 3 - Bandwidth relativo para un ancho de 120mm

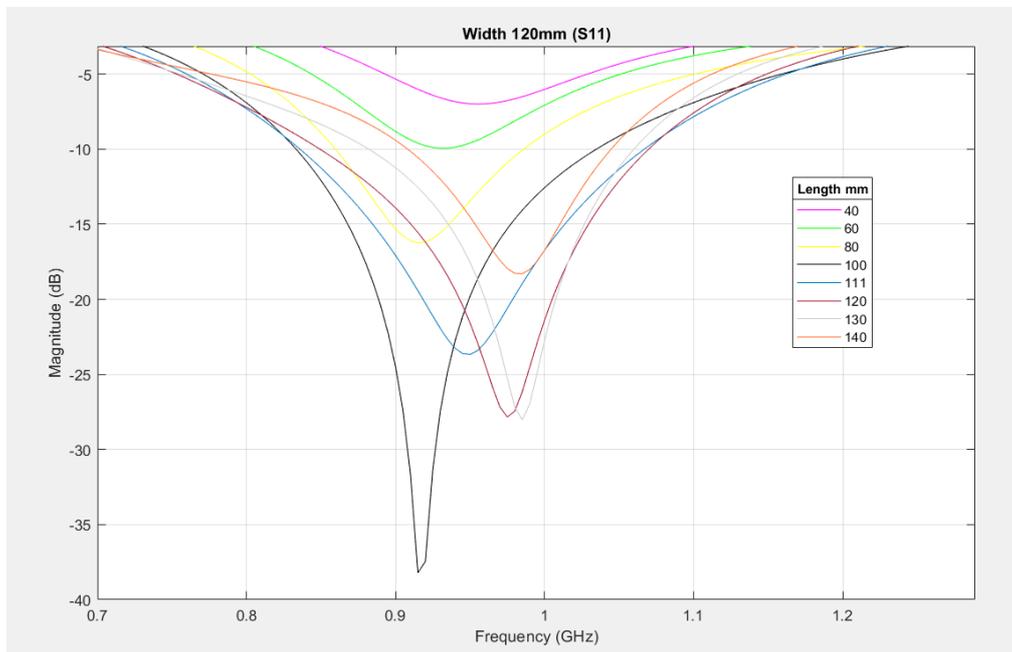


Ilustración 4 - Gráficas S₁₁ para un ancho de 120mm

En este caso, coincide que el mayor ancho de banda relativo se consigue para la longitud del plano de masa de 111mm (37%). En la gráfica de la Ilustración 4 se observa que hay dos valores de longitud para los cuales podríamos tener dudas de cuál es el mayor sin hacer los cálculos (100 y 111 mm). Esto se debe a que la diferencia de ancho de banda relativo entre estos dos casos es de apenas 2%.

Ancho del plano de masa de 100mm

Se repite el procedimiento anterior para un ancho del plano de masa de 100mm, logrando los siguientes resultados:

Largo(mm)	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
140	839	1130	984,5	30%
130	776	1153	964,5	39%
125	767	1163	965	41%
123	764	1168	966	42%
120	765	1175	970	42%
111	769	1188	978,5	43%
105	775	1189	982	42%
100	782	1181	981,5	41%
80	818	1097	957,5	29%
60	863	1055	959	20%
40	920	1043	981,5	13%

Tabla 4 - Bandwidth relativo para un ancho de 100mm

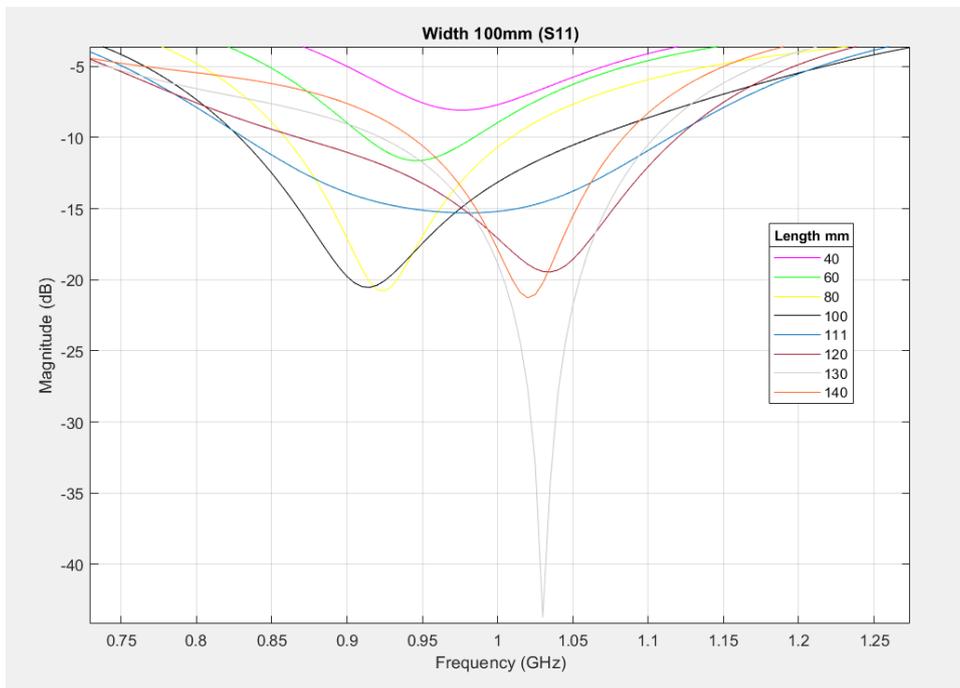


Ilustración 5 - Gráficas S₁₁ para un ancho de 100mm

Se comprueba que, para este caso, la longitud del plano de masa de 111 mm es la que obtiene mejores resultados en cuanto a ancho de banda relativo (43%).

Ancho del plano de masa de 80mm

Se repite la obtención de datos para un ancho del plano de masa de 80mm:

Largo(mm)	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
140	882	1176	1029	29%
130	749	1200	974,5	46%
125	745	1212	978,5	48%
123	745	1221	983	48%
120	747	1228	987,5	49%
111	756	1247	1001,5	49%
105	766	1253	1009,5	48%
100	774	1246	1010	47%
80	816	1115	965,5	31%
60	867	1082	974,5	22%
40	930	1086	1008	15%

Tabla 5 - Bandwidth relativo para un ancho de 80mm

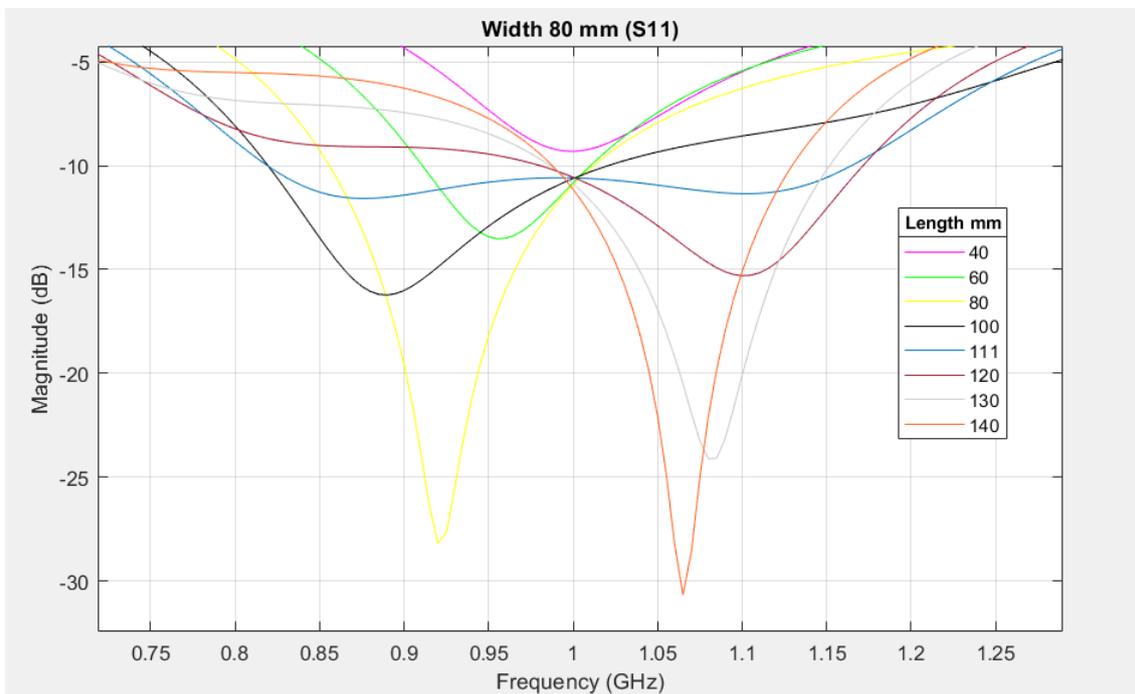


Ilustración 6 - Gráficas S₁₁ para un ancho de 80mm

Para este caso, también la longitud del plano de masa de 111 mm es la que logra los mejores resultados en cuanto a ancho de banda relativo (49%).

Ancho del plano de masa de 60mm

Se vuelven a calcular los datos para un ancho del plano de masa de 60mm. Se obtienen los siguientes resultados:

Largo(mm)	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
140	974	1226	1100	23%
130	954	1256	1105	27%
125	722	1273	997,5	55%
123	724	1279	1001,5	55%
120	730	1291	1010,5	56%
111	744	1316	1030	56%
105	757	1330	1043,5	55%
100	767	1300	1033,5	52%
80	817	1097	957	29%
60	878	1052	965	18%
40	949	1129	1039	17%

Tabla 6 - Bandwidth relativo para un ancho de 60mm

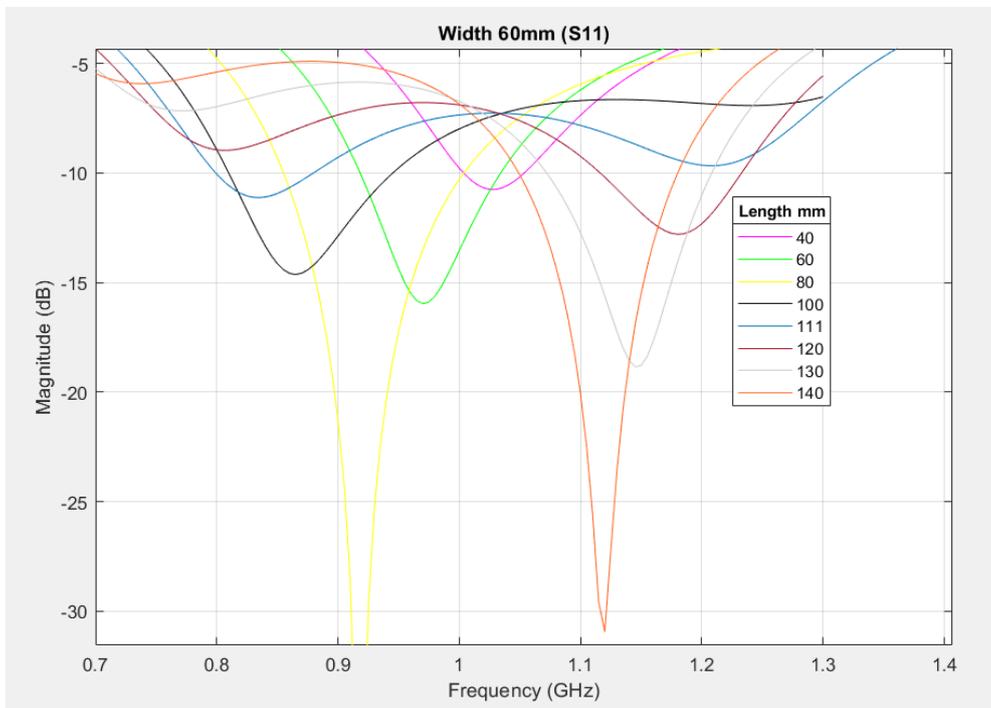


Ilustración 7 - Gráficas S₁₁ para un ancho de 60mm

Para este caso, también la longitud del plano de masa de 111 mm es la que obtiene mejores resultados en ancho de banda relativo (56%).

Ancho del plano de masa de 40mm

Se repite la obtención de datos para un ancho del plano de masa de 40mm obteniendo los siguientes resultados:

Largo(mm)	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
140	1065	1270	1167,5	18%
130	1100	1313	1206,5	18%
125	1116	1330	1223	17%
123	702	859	780,5	20%
120	710	881	795,5	21%
111	729	928	828,5	24%
105	745	964	854,5	26%
100	760	992	876	26%
80	820	1061	940,5	26%
60	891	1113	1002	22%
40	977	1172	1074,5	18%

Tabla 7 - Bandwidth relativo para un ancho de 40mm

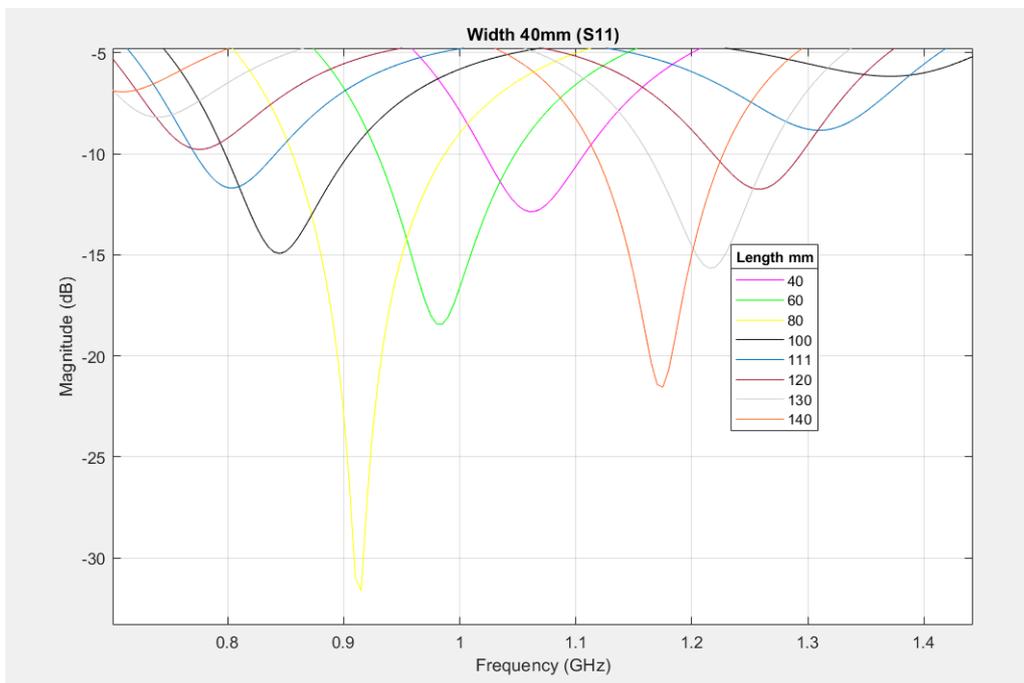


Ilustración 8 - Gráficas S₁₁ para un ancho de 40mm

En este caso, vemos que el ancho de banda relativo mayor no coincide con la longitud del plano de masa de 111mm, pero, observando la gráfica, se puede comprobar que presenta un comportamiento multibanda para esta longitud de plano de masa. Es posible que, si se añade un circuito de adaptación, se mejore el desempeño y se consiga un ancho de banda superior en lugar de un comportamiento multibanda. Sin embargo, tal y como se ha mencionado en el punto de limitaciones, Antenna Toolbox no permite añadir un circuito de adaptación ni una carta de Smith donde poder verificar que la antena se

encuentra desadaptada. Así, para este capítulo se consideran los resultados anteriores como válidos.

Al contemplar los resultados anteriores de manera global observamos que los mayores anchos de banda relativos encontrados son para una longitud de plano de masa de 111mm y para un ancho en torno a los 60mm. Debido a esto, se han realizado más simulaciones fijando la longitud del plano de masa en 111mm y variando el ancho entre valores de 50mm y 75 mm para aumentar la precisión en la obtención de unas dimensiones óptimas. Estas simulaciones han dado lugar a los siguientes resultados:

Longitud del plano de masa de 111mm

Se repite la obtención de datos para un ancho del plano de masa de 40mm, con los siguientes resultados:

Ancho(mm)	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
50	739	1005	872	31%
52	740	1346	1043	58%
55	741	1335	1038	57%
60	744	1316	1030	56%
65	748	1299	1023,5	54%
70	750	1280	1015	52%
75	753	1263	1008	51%

Tabla 8 - Bandwidth relativo para una longitud de 111mm

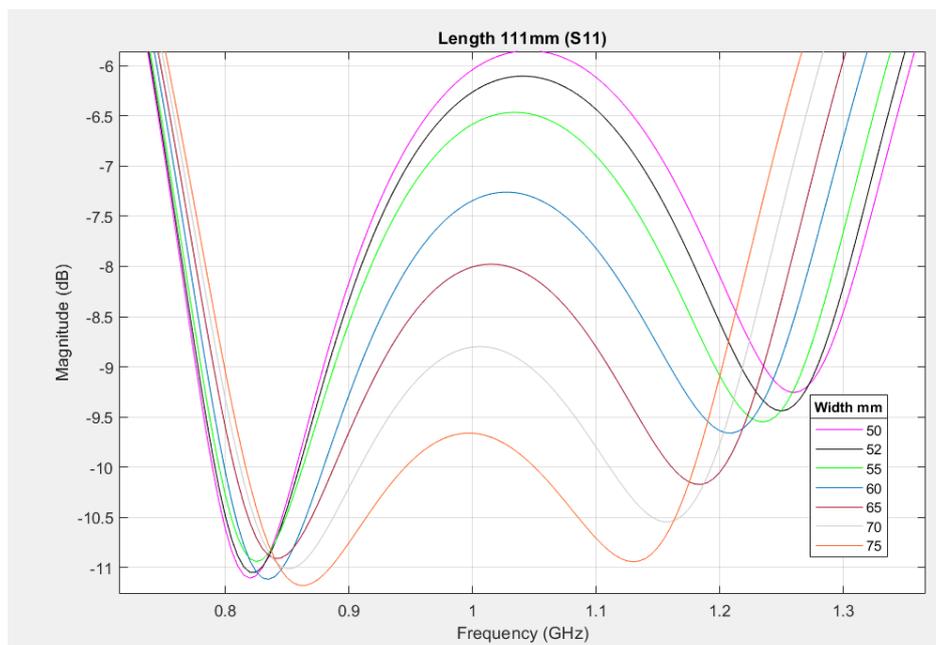


Ilustración 9 - Gráficas S₁₁ para una longitud de 111mm

Según los datos mostrados arriba, se observa que el mayor ancho de banda se obtiene para una longitud del plano de masa de 111mm y un ancho del plano

de masa de 52mm, siendo el ancho de banda relativo de 58%. En la Ilustración 9, puede parecer que para un ancho de 50mm el ancho de banda es mayor, pero si se observa detalladamente, para un ancho de 50mm la antena presenta un comportamiento multibanda, ya que entre aproximadamente entre las frecuencias de 1000MHz y 1100MHz el valor de S_{11} es ligeramente superior a -6dB. Dentro de las limitaciones de este capítulo y haciendo uso únicamente de la interfaz gráfica de Antena Toolbox no es posible mejorar este resultado con un circuito de adaptación.

3.3 Resultado

Teniendo en cuenta los datos expuestos durante el estudio anterior, se han creado las siguientes gráficas del ancho de banda en función de las dimensiones del plano de masa.

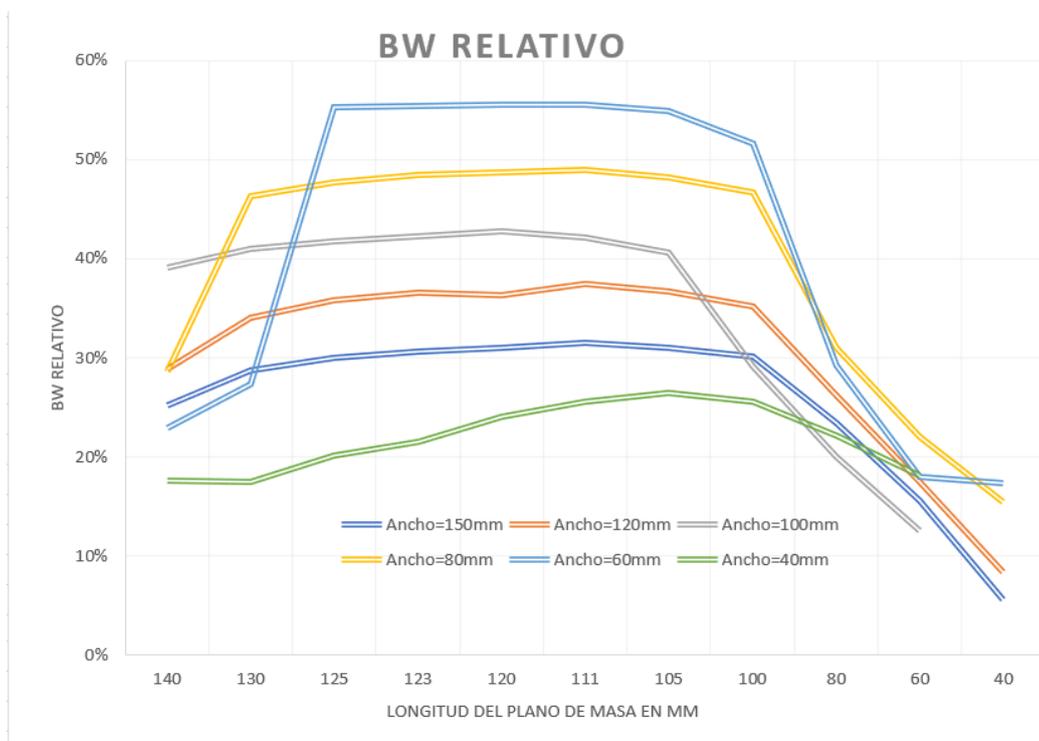


Ilustración 10 - Bandwidth relativo en función de la longitud

En la Ilustración 10, cada línea representa un ancho fijo del plano de masa. El eje de abscisas indica la longitud del plano de masa empezando por los valores mayores decreciendo hasta los valores mínimos estudiados y el eje de ordenadas representa el ancho de banda relativo.

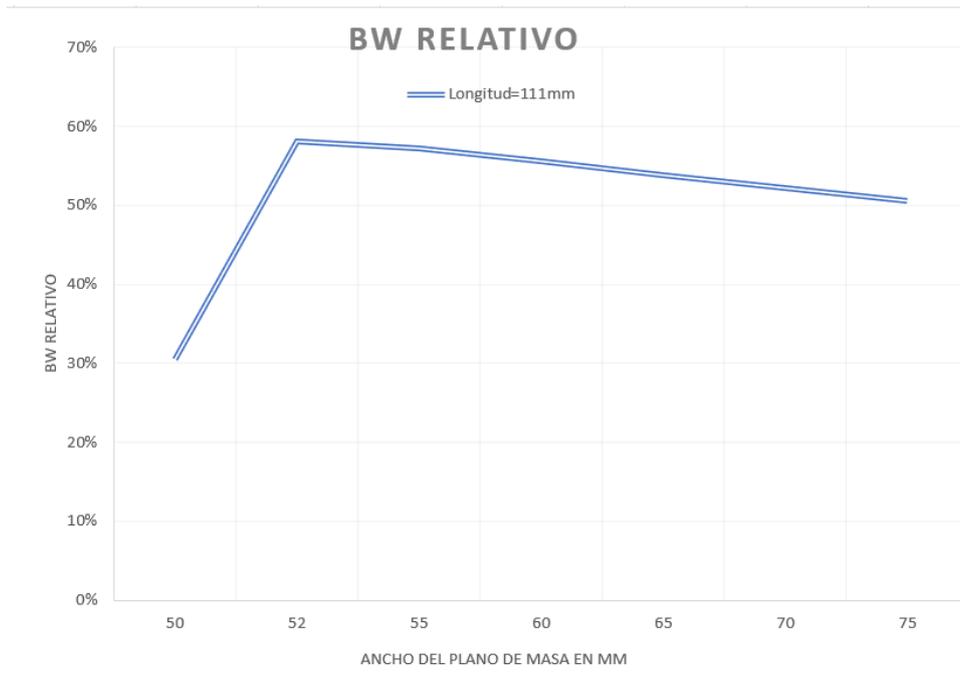


Ilustración 11 - Bandwidth relativo en función del ancho

En esta gráfica (Ilustración 11) se muestra como varía el ancho de banda relativo para una longitud de plano de masa de 111mm. El eje de abscisas representa el ancho del plano de masa en mm y el eje de ordenadas representa el ancho de banda relativo.

Teniendo en cuenta los resultados expuestos en el estudio, dentro del marco de limitaciones consideradas en este capítulo, se obtiene un plano de masa cuyas dimensiones óptimas son 111mm de longitud y 52mm de ancho.

3.4 Conclusiones

Se verifica que Matlab Antenna Toolbox sirve para optimizar gráficamente antenas 2D con geometrías estándar de forma aislada, es decir, no permite la adición de circuitos que mejoren su desempeño.

En los siguientes estudios de este trabajo, se utilizarán datos de este capítulo como referencia para comprobar que, al modificar la geometría y adaptar la antena, es posible mejorar los resultados para un plano de masa de tamaño inferior al óptimo.

4. Simulación de geometrías creadas mediante código

Se utiliza código de Matlab para la creación de antenas simulables, esto permite la modificación de la geometría de esta antena para crear antenas no contenidas en las librerías de Antena Toolbox

4.1 Metodología y limitaciones

En este capítulo se crea una antena del tipo InvertedLCoplanar sin utilizar la interfaz gráfica de Matlab Antenna Toolbox. El procedimiento se basa en la creación de la geometría de la antena mediante la adición y sustracción de rectángulos junto con la definición de un punto de alimentación [17]. De esta forma, se intentan reproducir los resultados de una antena equivalente generada según el procedimiento del capítulo anterior. Posteriormente, se utiliza la misma metodología y se desplaza el monopolo a las proximidades del vértice del plano de masa para que en los siguientes capítulos en los que se añade un orificio en el plano de masa se consiga el resultado esperado. Finalmente, y sin buscar mejorar el desempeño, se añaden orificios a la antena generada como ejemplo para las antenas que se generan en los siguientes capítulos.

Para este capítulo, se utilizan los mismos valores de referencia que en el apartado anterior, es decir, la frecuencia de referencia es 900MHz, el barrido de frecuencias va desde 700 MHz hasta 1500MHz con intervalos de 5MHz, y el valor máximo de S_{11} para la obtención del ancho de banda relativo es de -6dB. El código se escribe con todas las funciones para lograr la misma información que con la simulación de una antena 2D de la librería, aunque solamente tengamos en cuenta el parámetro S_{11} . Las dimensiones del plano de masa de las antenas generadas en este capítulo son inferiores a las consideradas como óptimas en el capítulo anterior para poder mejorar su desempeño en los siguientes capítulos.

Al utilizar esta metodología encontramos las siguientes limitaciones:

- Solamente se utilizan figuras rectangulares, pero para el diseño de este tipo de antenas se considera suficiente.
- Las dimensiones de cada uno de los rectángulos y sus posiciones han sido calculadas por otro lado y han de ser introducidas a mano, por lo que puede no ser tan preciso como el posicionamiento de los elementos de una antena de la librería.
- Los valores de $f_{inferior}$ y $f_{superior}$ han sido tomados de forma visual a partir de la gráfica. Este error humano no afecta a los objetivos de este trabajo.
- Las simulaciones han sido llevadas a cabo con un intervalo entre frecuencias de 5MHz entre punto y punto. Posteriormente, Matlab se encarga de unir estos puntos para formar la gráfica de S_{11} . Este error

es despreciable para los objetivos del trabajo por ser S_{11} una función continua.

- Se ha tomado como valor de referencia el ancho de banda relativo sin tener en cuenta otras variables como, por ejemplo, el patrón de radiación.
- En este capítulo no se incluyen circuitos de adaptación, se estudia como añadir estos circuitos en próximos capítulos, en esta sección basta con reproducir todos los datos obtenidos en el capítulo anterior.

4.2 Estudio

Para la creación de antenas con geometrías de diseño propio es necesario definir todos los rectángulos mediante código, tanto los que van a ser sumados (antena) como los que van a ser restados (orificios). Posteriormente se define la antena que contenga todos los rectángulos anteriores, se añade el punto de alimentación, la frecuencia de referencia y el barrido de frecuencias. Finalmente se añade una figura para cada una de las funciones que dan como resultado los datos obtenidos [17].

Nótese: Los parámetros de ancho y largo de cada uno de los rectángulos están invertidos en el software respecto a lo considerado en el trabajo, es decir, el valor de Width corresponde con la longitud del rectángulo y el parámetro Length corresponde con el ancho. Esto es así a lo largo de todo el trabajo.

Código y datos disponibles

A continuación, se muestra el código explicado por secciones para una antena InvertedLCoplanar con un plano de masa de dimensiones 80x60mm, con el monopolo situado en el punto medio del ancho del plano de masa y en el borde de este.

El primer paso es definir la geometría de la antena, esta consiste en tres rectángulos, el primero de ellos es el plano de masa y los dos restantes son los dos rectángulos que componen el monopolo. Las dimensiones de los rectángulos del monopolo son idénticas a las generadas por la interfaz gráfica de Matlab Antenna Toolbox para esta frecuencia mediante la creación de una antena InvertedLCoplanar contenida en sus librerías.

```
% Define GroundPlane
rect1 = antenna.Rectangle('Length', 60e-3, 'Width', 80e-3);
p1 = getShapeVertices(rect1);

% Define monopole
rect2 = antenna.Rectangle('Length', 53.726e-3, 'Width', 3.6848e-3,
...
    'Center', [-25e-3, 67.664e-3]);
p2 = getShapeVertices(rect2);
rect3 = antenna.Rectangle('Length', 3.6848e-3, 'Width', 25.822e-3,
...
    'Center', [0e-3, 52.911e-3]);
```

```
p3 = getShapeVertices(rect3);
```

A continuación, se genera la antena con la suma de los tres rectángulos anteriores y se define el punto de alimentación.

```
% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3};
ant.Operation = 'P1+P2+P3';

% Define FeedPoint
ant.FeedLocation = [0e-3, 40e-3,0];
ant.FeedWidth = 3.5e-3;
```

Se define la frecuencia de referencia (900MHz) y el barrido de frecuencias (700:5:1500).

```
% Define frequency
plotFrequency = 900000000;

% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;
```

Finalmente se define una figura cada dato a mostrar.

```
% show for invertedLcoplanar
figure;
show(ant)

% s11 for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
rfplot(s)

% pattern for invertedLcoplanar
figure;
pattern(ant, plotFrequency)

% current for invertedLcoplanar
figure;
current(ant, plotFrequency)

% impedance for invertedLcoplanar
figure;
impedance(ant, freqRange)

% elevation for invertedLcoplanar
figure;
patternElevation(ant, plotFrequency)

% azimuth for invertedLcoplanar
figure;
patternAzimuth(ant, plotFrequency)
```

En el anexo 11.2 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) puede encontrarse el código completo.

Una vez generado el código se ejecuta la simulación obteniendo los siguientes datos.

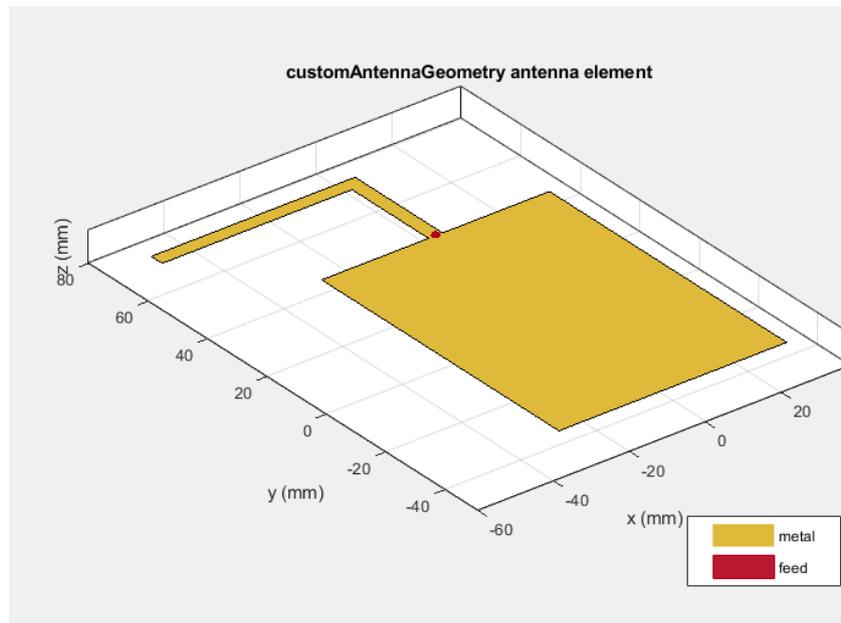


Ilustración 12 - InvertedLCoplanar generada por código

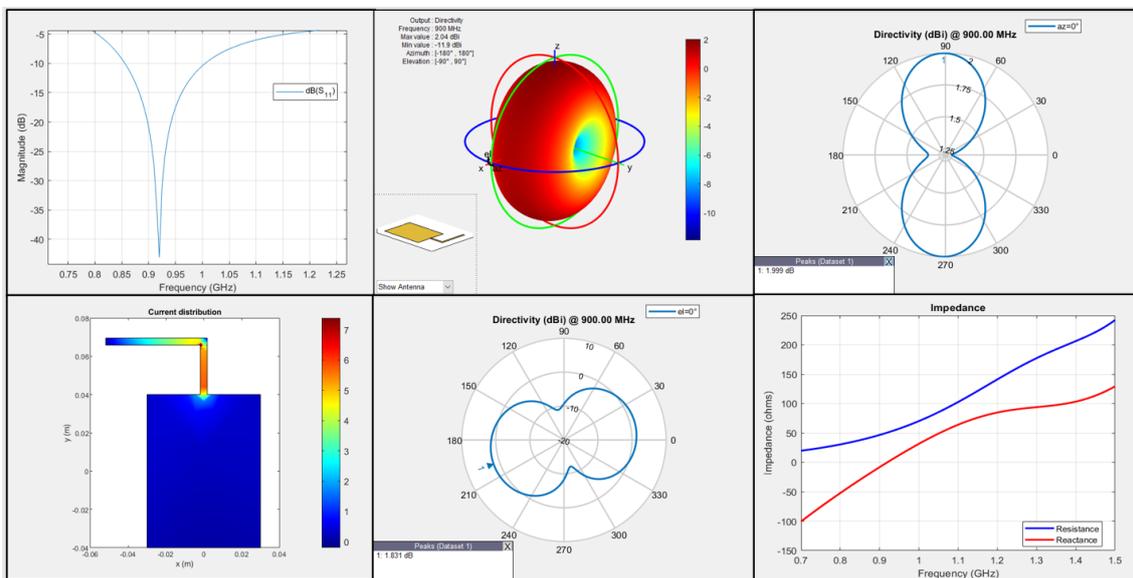


Ilustración 13 - Información disponible tras simular una antena creada

Los datos mostrados empezando por la fila de arriba, de izquierda a derecha son:

- Gráfica del parámetro S_{11} .
- Patrón de radiación en 3D.
- Diagrama de elevación.

Los datos de la fila inferior, de izquierda a derecha son:

- Distribución de corriente.
- Diagrama acimutal.
- Representación de la impedancia y la reactancia.

Comparativa de ancho de banda

Se comparan los anchos de banda relativos obtenidos mediante esta simulación y la simulación de la antena equivalente de las librerías contenido en la Tabla 6.

Antena	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
Librería	817	1097	957	29%
Código	818	1100	959	29%

Tabla 9 - Comparativa entre antena creada y contenida en la librería

Se logran los mismos resultados de ancho de banda (29%) para una antena generada mediante librerías y una antena generada mediante código.

Antena con el monopolo desplazado cerca del vértice

A continuación, se modifica el código para desplazar el monopolo a una posición próxima al vértice, y se obtiene su ancho de banda relativo. Esto nos será de utilidad para los próximos capítulos del trabajo. Para ello se modifica la coordenada del centro de cada uno de los rectángulos que componen el monopolo y la posición del punto de alimentación. El código para esta simulación se encuentra en el anexo 11.3 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con el monopolo desplazado al vértice.

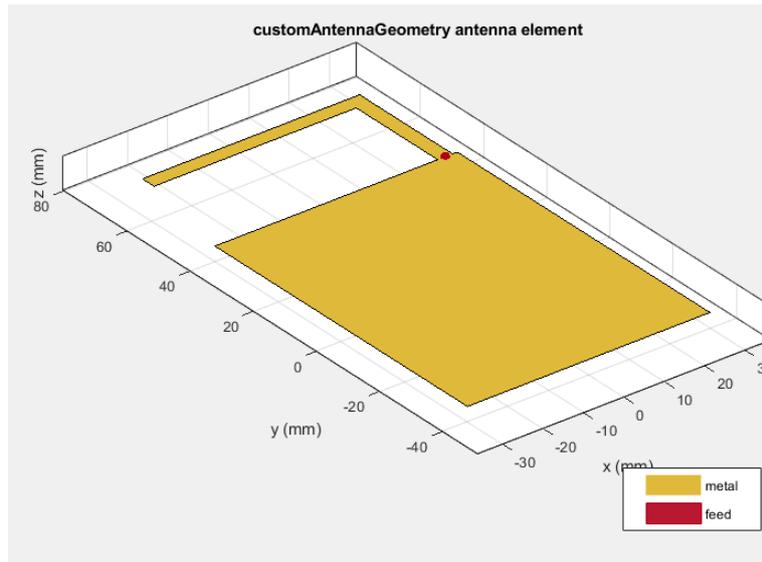


Ilustración 14 - InvertedLCoplanar con el monopolo desplazado

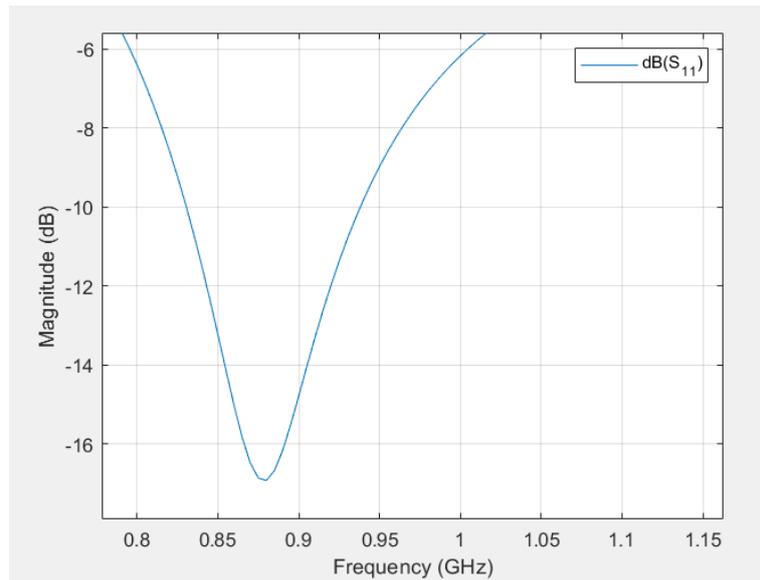


Ilustración 15 - Gráfica S₁₁ de antena (80x60mm) con monopolo desplazado

Con esta simulación se compara el ancho de banda relativo respecto al obtenido con el monopolo centrado, obteniendo los siguientes resultados.

Monopolo	F _{Inferior} MHz	F _{Superior} MHz	F _{Central} MHz	BW %
Centrado	818	1100	959	29%
Desplazado	795	1004	899	23%

Tabla 10 - Comparativa entre antena monopolo centrado y desplazado

Al desplazar el monopolo y sin tener un circuito de adaptación, se empeora el ancho de banda obtenido, pero, como ya ha sido mencionado anteriormente, para próximos capítulos es de interés tener el monopolo desplazado al vértice.

Orificios en el plano de masa

En este apartado se muestran las modificaciones necesarias en el código para añadir orificios en el plano de masa. Para ello, se añade un rectángulo por cada orificio con las dimensiones y posición deseadas. En la sección donde se define la antena mediante operaciones aritméticas, los rectángulos correspondientes a los orificios han de ser restados.

Para este ejemplo, en el que no se busca mejorar el desempeño, la sección del código donde se definen los orificios es la siguiente:

```

% Define Slots
slot1 = antenna.Rectangle('Length', 3e-3, 'Width', 4e-3, ...
    'Center', [15e-3, 38.5e-3]);
p2 = getShapeVertices(slot1);
slot2 = antenna.Rectangle('Length', 38e-3, 'Width', 3e-3, ...
    'Center', [-2.5e-3, 35e-3]);
p3 = getShapeVertices(slot2);
slot3 = antenna.Rectangle('Length', 3e-3, 'Width', 4e-3, ...
    'Center', [-20e-3, 31.5e-3]);
p4 = getShapeVertices(slot3);
slot4 = antenna.Rectangle('Length', 38e-3, 'Width', 3e-3, ...

```

```

    'Center', [ -2.5e-3, 28e-3]);
p5 = getShapeVertices(slot4);
slot5 = antenna.Rectangle('Length', 42.5e-3, 'Width', 3e-3,
    'Center', [-0.75e-3, 21e-3]);
p6 = getShapeVertices(slot5);

```

La sección en la que se define la antena y donde se puede observar que los elementos correspondientes a los orificios tienen signo negativo es la siguiente:

```

% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,p8};
ant.Operation = 'P1-P2-P3-P4-P5-P6+P7+P8';

```

El código completo de este ejemplo se encuentra en el anexo 11.4 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con orificios en su plano de masa.

Al realizar la simulación muestra la siguiente antena generada:

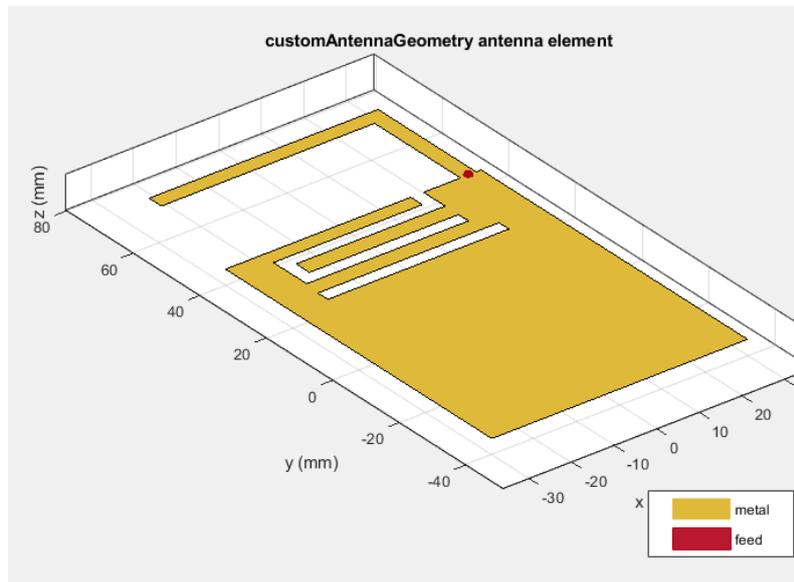


Ilustración 16 - InvertedLCoplanar con orificios

Según lo estudiado en esta sección, es posible añadir orificios en el plano de masa. Durante los siguientes capítulos se analiza por qué es interesante esta posibilidad.

4.3 Conclusiones

En este capítulo, se ha comprobado que Matlab permite la generación de antenas 2D mediante código para su posterior simulación. Esto nos permite generar antenas con geometrías no estándar, así como combinar antenas 2D. Se ha verificado que los resultados obtenidos presentan la misma fiabilidad que las simulaciones de antenas contenidas en las librerías.

En los próximos capítulos, se utilizarán los procedimientos mostrados anteriormente con finalidad de mejorar el desempeño de una antena mediante la modificación de su geometría.

5. Mejora del ancho de banda mediante la adición de un orificio en el plano de masa.

Se modifica la geometría del plano de masa de la antena mediante la adición de un orificio en distintas posiciones para estudiar cómo afecta esta modificación al ancho de banda de la antena.

5.1 Metodología y limitaciones

En este capítulo se utiliza el código de la antena InvertedLCoplanar cuyo plano de masa presenta unas dimensiones de 80x60mm y ubica el monopolo próximo al vértice (véase la Ilustración 15). A continuación, se añade un orificio en el plano de masa cuya finalidad es provocar que la corriente tenga que atravesar un camino curvo por el plano de masa y, en consecuencia, que tenga que recorrer más distancia. De esta forma, se alarga eléctricamente el plano de masa [3].

En este apartado se realizan simulaciones con el orificio en distintas posiciones para obtener el ancho de banda relativo en cada uno de los casos. Este ancho de banda relativo obtenido se compara con el ancho de banda de la misma antena sin orificio en el plano de masa.

Para este capítulo, se utilizan los mismos valores de referencia que en el resto del trabajo, es decir, la frecuencia de referencia es 900MHz, el barrido de frecuencias va desde 700 MHz hasta 1500MHz con intervalos de 5MHz, y el valor máximo de S_{11} para la obtención del ancho de banda relativo es de -6dB. El código se escribe con todas las funciones para lograr la misma información que con la simulación de una antena 2D de la librería, aunque solamente tengamos en cuenta el parámetro S_{11} .

Al utilizar esta metodología encontramos las siguientes limitaciones:

- Solamente se utilizan figuras rectangulares, pero para el diseño de este tipo de antenas se considera suficiente.
- Las dimensiones de cada uno de los rectángulos y sus posiciones han sido calculadas por otro lado y han de ser introducidas a mano, por lo que puede no ser tan preciso como el posicionamiento de los elementos de una antena de la librería.
- Los valores de $f_{inferior}$ y $f_{superior}$ han sido tomados de forma visual a partir de la gráfica. Este error humano no afecta a los objetivos de este trabajo.
- Las simulaciones han sido llevadas a cabo con un intervalo entre frecuencias de 5MHz entre punto y punto. Posteriormente, Matlab se encarga de unir estos puntos para formar la gráfica de S_{11} . Este error es despreciable para los objetivos del trabajo por ser S_{11} una función continua.
- Se ha tomado como valor de referencia el ancho de banda relativo sin tener en cuenta otras variables como, por ejemplo, el patrón de radiación.

- En este capítulo no se incluyen circuitos de adaptación. Se estudiará como añadir estos circuitos en próximos capítulos.

5.2 Estudio

En el presente estudio se van a realizar tres simulaciones distintas con un orificio de dimensiones 4x50mm, siempre ajustado al lado del largo de plano de masa más próximo al monopolo para alargar eléctricamente este plano. La diferencia entre las tres simulaciones distintas es únicamente la posición de este orificio en el eje de ordenadas. En la primera de estas simulaciones, el orificio está situado próximo al monopolo, en la segunda en el punto medio del largo del plano de masa, y en la tercera simulación en la parte más alejada del monopolo, para estas tres simulaciones se obtendrá la gráfica del parámetro S_{11} y el ancho de banda relativo.

Orificio en la parte superior del plano de masa

En este apartado se realiza la simulación con el orificio centrado en el punto con coordenadas (5, 28mm). El código puede encontrarse en el anexo 11.5 Código creado para una InvertedLCoPlanar (80x60) con un orificio en la parte superior.

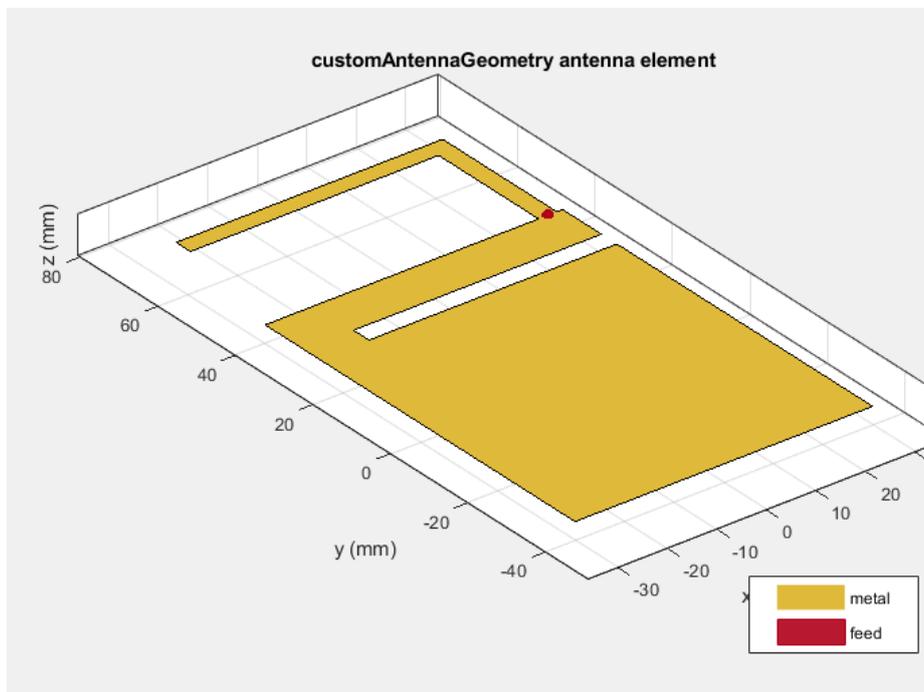


Ilustración 17 - Orificio en la parte superior del plano de masa

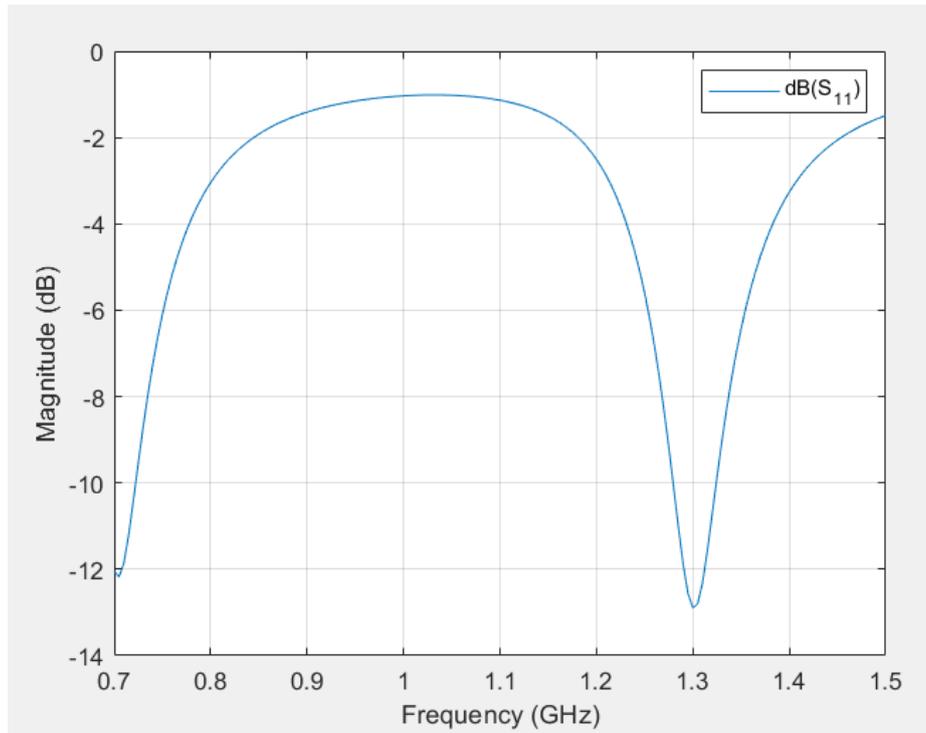


Ilustración 18 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte superior

Pos. Orificio	fInferior MHz	fSuperior MHz	fCentral MHz	BW %
Sin orificio	795	1004	899	23%
Superior	1253	1354	1303	8%

Tabla 11 - Comparativa entre antena sin orificio y orificio en la parte superior

En la Ilustración 18 se puede apreciar que esta antena con el orificio en la parte superior presenta un comportamiento multibanda, no mejora el ancho de banda con respecto a la antena sin orificio, sino que lo empeora notablemente (véase la Tabla 11). En el próximo capítulo se añadirá la representación de la carta de Smith, así como un circuito de adaptación, con la finalidad de conseguir el resultado esperado.

Orificio en la mitad del plano de masa

En este apartado, se repite la simulación y toma de datos del apartado anterior, pero ubicando el orificio en la coordenada (5, 0 mm) para situarlo en el punto medio del plano de masa desplazado hacia la derecha. Se obtienen los siguientes resultados:

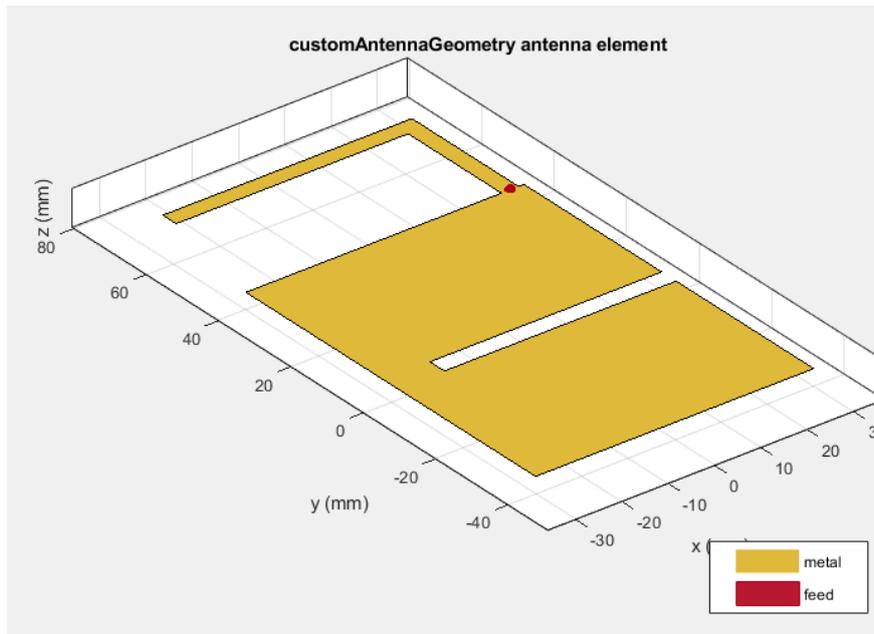


Ilustración 19 - Orificio en la parte media del plano de masa

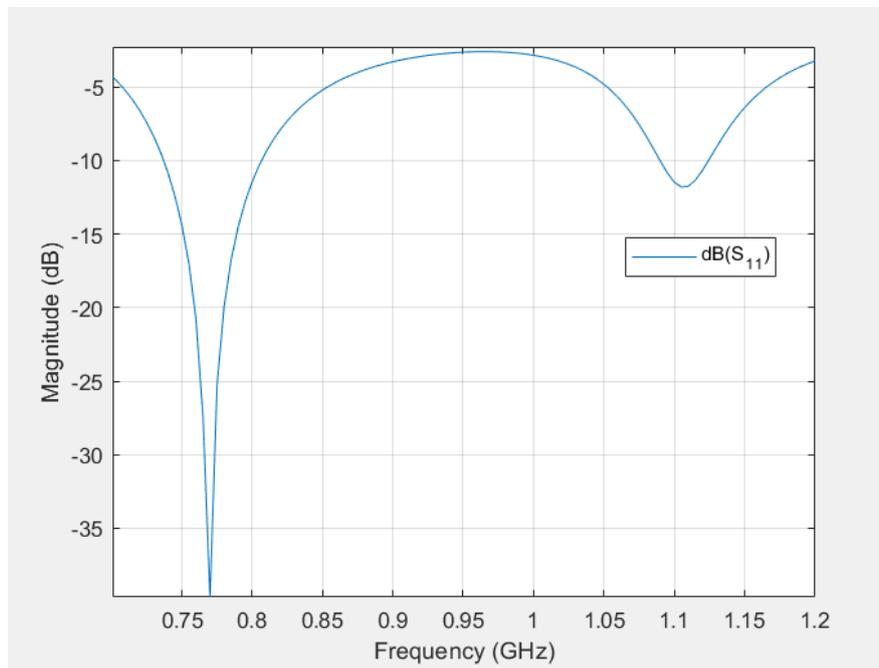


Ilustración 20 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte media

Pos. Orificio	f_{Inferior} MHz	f_{Superior} MHz	f_{Central} MHz	BW %
Sin orificio	795	1004	899	23%
Media	715	839	777	16%

Tabla 12 - Comparativa entre antena sin orificio y orificio en la parte media

Al igual que en la simulación anterior, se obtiene un comportamiento multibanda, pero no se mejora el ancho de banda relativo. En el próximo capítulo se estudia si la antena se encuentra desadaptada y si mediante la inclusión de un circuito de adaptación se mejora el resultado.

Orificio en la parte inferior del plano de masa

Se repite la simulación, esta vez con el orificio centrado en las coordenadas (5, -28 mm). Como resultado se han obtenido los siguientes datos:

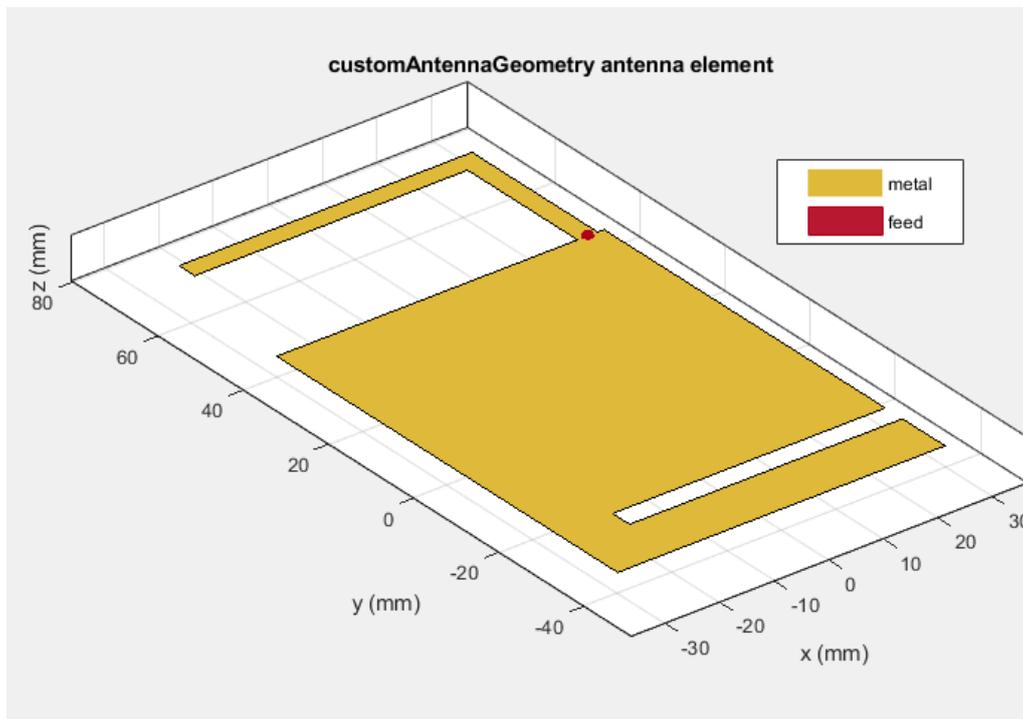


Ilustración 21 - Orificio en la parte inferior del plano de masa

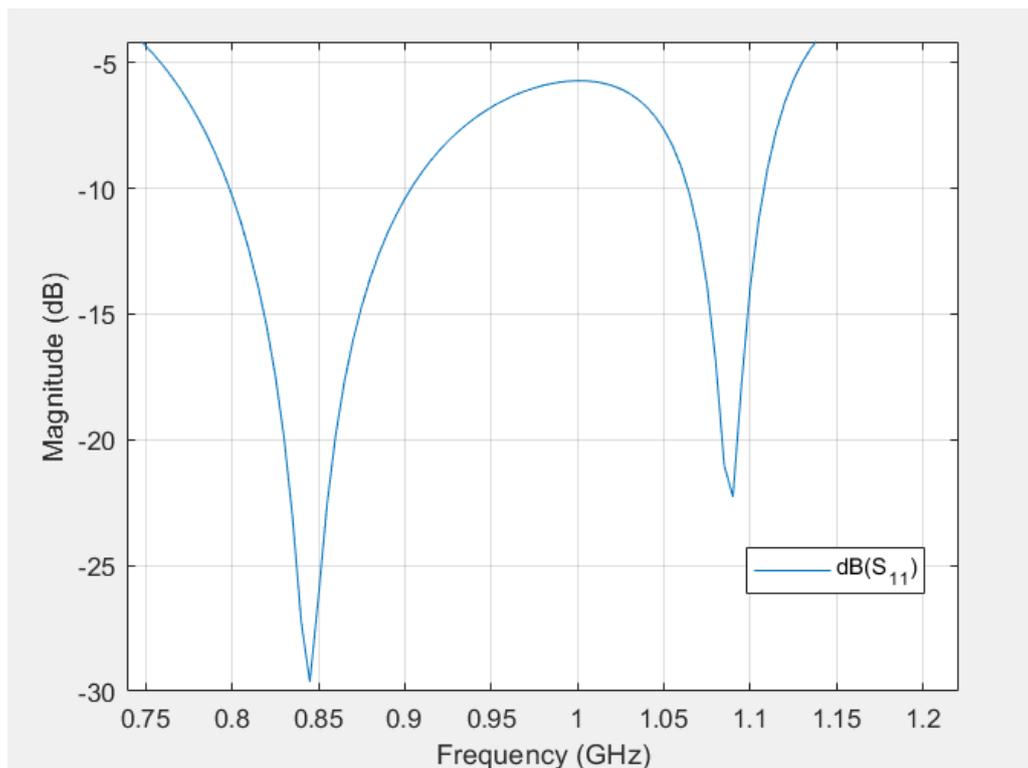


Ilustración 22 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte inferior

Pos. Orificio	F _{Inferior} MHz	F _{Superior} MHz	F _{Central} MHz	BW %
Sin orificio	795	1004	899	23%
Inferior	769	976	872	24%

Tabla 13 - Comparativa entre antena sin orificio y orificio en la parte inferior

Los resultados muestran que, en este caso, la antena también muestra un comportamiento multibanda debido a que entre las frecuencias de 976 y 1023 MHz el parámetro S_{11} supera el valor de -6dB. Aun así, como se aprecia en la Tabla 13, el ancho de banda relativo mejora un 1% respecto al caso sin orificio. Esta mejora en el ancho de banda no es apenas significativa, ni tampoco se acerca al porcentaje del ancho de banda relativo obtenido en el capítulo 3 para planos de masa de dimensiones óptimas. En el próximo capítulo se analiza si añadiendo un circuito de adaptación se consigue una mejoría notable.

5.3 Conclusiones

Durante este capítulo, hemos estudiado el efecto de un orificio en el plano de masa en distintas ubicaciones. Se ha observado que en solo uno de los tres casos estudiados hemos conseguido mejorar el ancho de banda relativo del plano de masa sin orificio y este aumento en el ancho de banda relativo no es significativo.

Al añadir este orificio, se produce un comportamiento multibanda y, como se ha observado, la posición de este orificio afecta al ancho de cada una de las bandas y a la proximidad entre bandas. Sin circuito de adaptación no se consigue mejorar el ancho de banda relativo, sino que además se produce que pueda dejarse de transmitir en la frecuencia deseada (900MHz) como puede apreciarse en la Ilustración 18 y en la Ilustración 19.

6. Redes de adaptación para antenas

En el presente capítulo, se analiza la posibilidad de añadir al análisis de nuestra antena la carta de Smith mediante código para obtener información relevante sobre la adaptación de la antena. Posteriormente, también mediante código se añade un circuito de adaptación que Matlab calcula para obtener la nueva gráfica del parámetro S_{11} y el camino de adaptación de este circuito sobre la carta de Smith [18].

Se utiliza esta modificación para estudiar si gracias a ella se consigue mejorar el desempeño de las antenas simuladas en el capítulo 5 para obtener un ancho de banda relativo mayor que el de la antena sin orificio.

Muchas antenas para aplicaciones Wireless se valen de redes de adaptación para sintonizar las frecuencias de operación, aumentar su ancho de banda o bien diseñar antenas multibanda [19]-[20].

6.1 Metodología y limitaciones

Se estudia la carta de Smith y el circuito de adaptación creado por Matlab para la antena sin orificio cuyo plano de masa tiene unas dimensiones de 80x60mm. Posteriormente se realiza el mismo procedimiento para los tres casos de la antena con orificio en el plano de masa mostrado en capítulo anterior. Finalmente se compara el ancho de banda con los obtenidos para la misma antena sin orificio y con la antena cuyas dimensiones son consideradas óptimas en el capítulo 3.

Para este capítulo, se utilizan los mismos valores de referencia que en el resto del trabajo, es decir, la frecuencia de referencia es 900MHz, el barrido de frecuencias va desde 700 MHz hasta 1500MHz con intervalos de 5MHz, y el valor máximo de S_{11} para la obtención del ancho de banda relativo es de -6dB. La carta de Smith y el circuito de adaptación son obtenidos para una impedancia de carga de 50Ω . El circuito de adaptación es generado para obtener una frecuencia central de 900MHz.

Al utilizar esta metodología encontramos las siguientes limitaciones:

- Los valores de $f_{inferior}$ y $f_{superior}$ han sido tomados de forma visual a partir de la gráfica. Este error humano no afecta a los objetivos de este trabajo.
- Las simulaciones han sido llevadas a cabo con un intervalo entre frecuencias de 5MHz entre punto y punto. Posteriormente, Matlab se encarga de unir estos puntos para formar la gráfica de S_{11} . Este error es despreciable para los objetivos del trabajo por ser S_{11} una función continua.
- Se ha tomado como valor de referencia el ancho de banda relativo sin tener en cuenta otras variables como, por ejemplo, el patrón de radiación.

6.2 Estudio

Se analiza la carta de Smith y la afección del circuito de adaptación al ancho de banda para la antena sin orificio en el plano de masa. A continuación, se repite el procedimiento para la antena con el orificio ubicado en tres posiciones distintas (véase capítulo 5), comparando el ancho de banda con el obtenido para la misma antena sin orificio.

Modificaciones en el código

Las modificaciones en el código para añadir la carta de Smith y para añadir un circuito de adaptación son las siguientes:

Primero se añade una figura para la representación de la carta de Smith.

```
% smithchart for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
smithplot(s)
```

A continuación, se incluye la creación del circuito de adaptación y una tabla que muestra por cada fila cada uno de los posibles circuitos obtenidos y en las columnas indica si el componente está en serie o paralelo, si es una bobina o un condensador y el valor numérico de su inductancia o su capacidad.

```
% MatchingNetwork for invertedLcoplanar
mn = matchingnetwork('LoadImpedance',s,'CenterFrequency',900000000);
c = circuitDescriptions(mn);
```

Se añade una figura que muestra la gráfica S_{11} resultante tras la adición del circuito de adaptación. Esta función crea una figura por cada uno de los circuitos de adaptación generados.

```
% s11 for invertedLcoplanar after MatchingNetwork
figure;
rfplot(mn)
```

Finalmente, se crea una figura que muestra el camino de adaptación del primero de los circuitos obtenidos. El primero de los circuitos obtenidos es el que Matlab considera como óptimo.

```
% Matching path for MatchingNetwork
figure;
smithplot(mn);
```

Antena con plano de masa de dimensiones 80x60mm sin orificio

Se añade la representación de la carta de Smith y el circuito de adaptación para una frecuencia central de 900MHz para la antena de la Ilustración 14. Se obtiene la carta de Smith antes de añadir el circuito de adaptación.

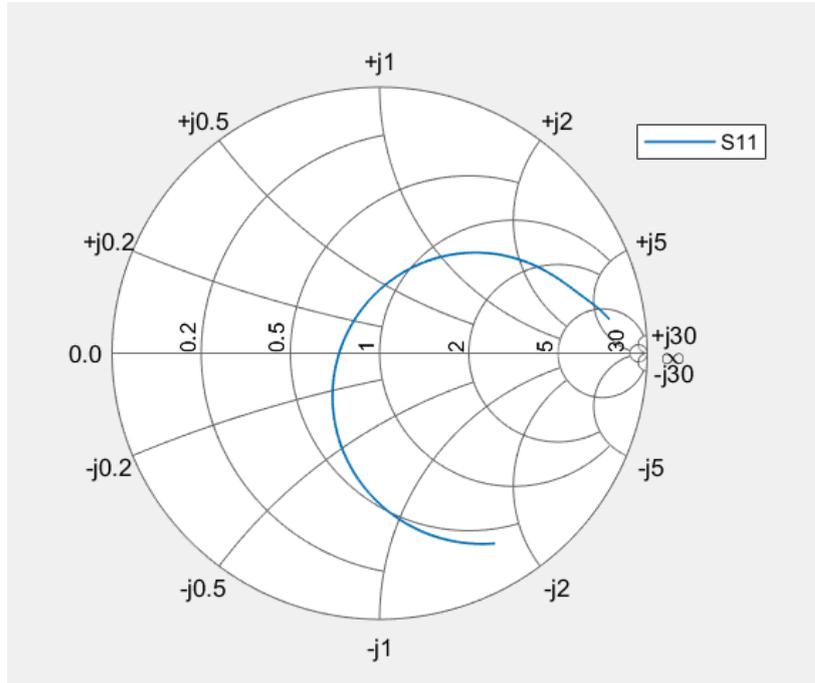


Ilustración 23 - Carta de Smith sin circuito de adaptación para antena sin orificio

Se aprecia en la carta de Smith (Ilustración 23) que, aunque posteriormente se incluya un circuito de adaptación este no va a mejorar considerablemente el ancho de banda. Esto se debe a que al desplazar la línea que corresponde al parámetro S_{11} no se consigue una diferencia notable respecto a al ancho de banda contenido dentro de $\rho=3$. A continuación, se obtienen los posibles circuitos de adaptación para la frecuencia central de 900MHz:

	<u>component1Type</u>	<u>component1Value</u>	<u>component2Type</u>	<u>component2Value</u>
Circuit 1	"Shunt C"	1.5702e-12	"Series L"	6.6115e-10
Circuit 2	"Shunt L"	1.9915e-08	"Series C"	5.3028e-12

Ilustración 24 - Circuitos de adaptación para antena sin orificio

El primero de los circuitos obtenidos consiste en un condensador en paralelo con una capacidad de 1,57pF y una bobina en serie cuya inductancia es de 66,11nH. El segundo de los circuitos obtenidos está compuesto por una bobina en paralelo de inductancia 19,92nH y un condensador en serie con una capacidad de 5,3pF. Finalmente se obtienen las gráficas del parámetro S_{11} de la antena con cada uno de los dos circuitos y el camino de adaptación del primero de los circuitos.

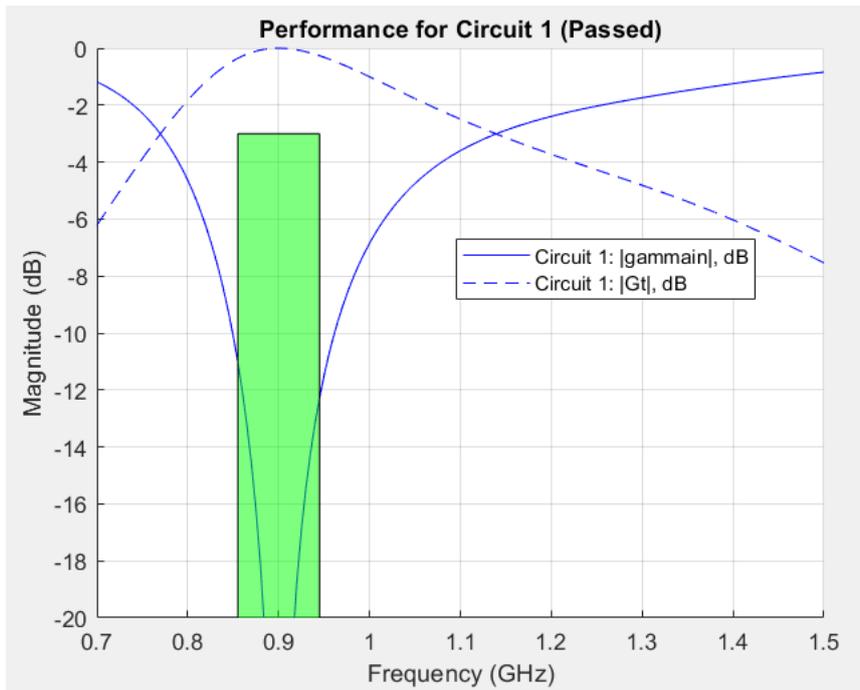


Ilustración 25 - Gráfica S_{11} de antena sin orificio adaptada con el circuito 1

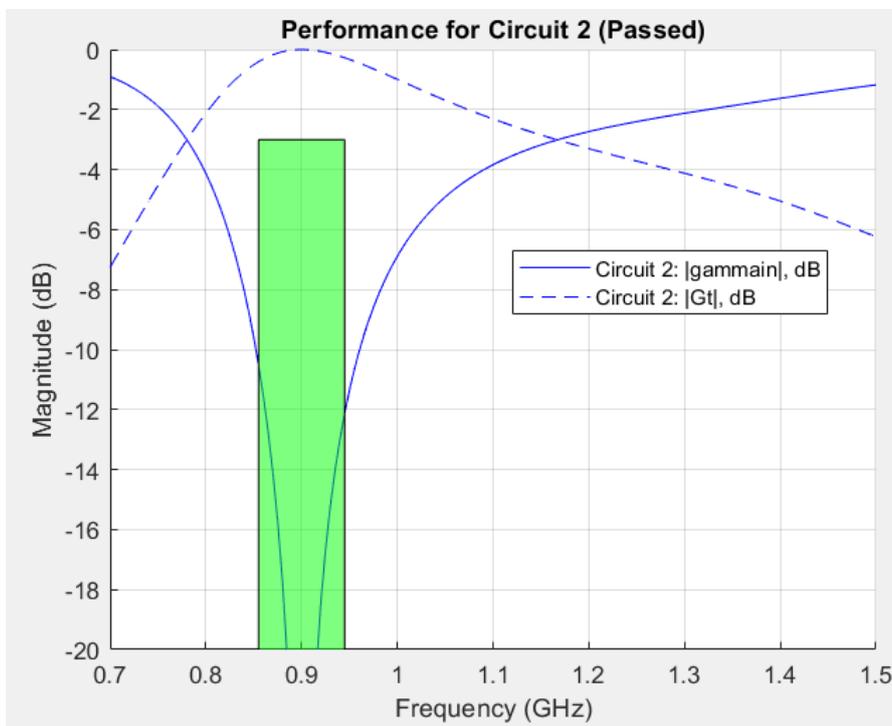


Ilustración 26 - Gráfica S_{11} de antena sin orificio adaptada con el circuito 2

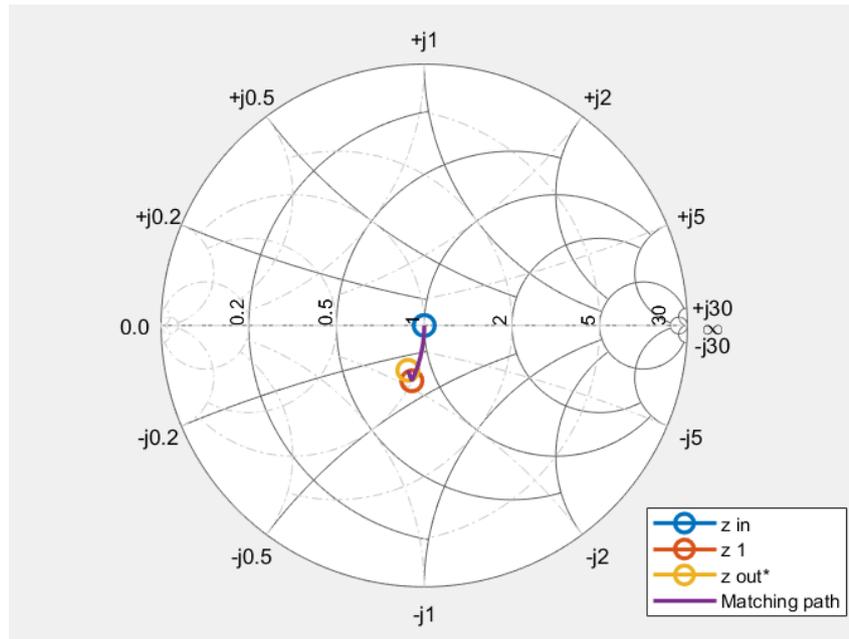


Ilustración 27 - Camino de adaptación del circuito 1

Se analizan los resultados de la simulación y se compara el ancho de banda relativo obtenido con cada uno de los circuitos de adaptación con el obtenido en la Tabla 10 para la misma antena sin circuito de adaptación.

Circuito	F _{Inferior} MHz	F _{Superior} MHz	F _{Central} MHz	BW %
Sin circuito	795	1004	899	23%
Circuito 1	817	1015	916	22%
Circuito 2	822	1018	920	21%

Tabla 14 - Comparativa entre antena sin orificio según circuito de adaptación

Al analizar la Tabla 14 se observa que, al añadir un circuito de adaptación a la antena que no presenta orificio en el plano de masa no se incrementa el ancho de banda, como es de esperar para una antena que ya se encuentra adaptada para la frecuencia de referencia.

Antena con orificio en la parte superior del plano de masa

Se repite la simulación para la antena de la Ilustración 17. La carta de Smith sin circuito de adaptación es la siguiente (Ilustración 28).

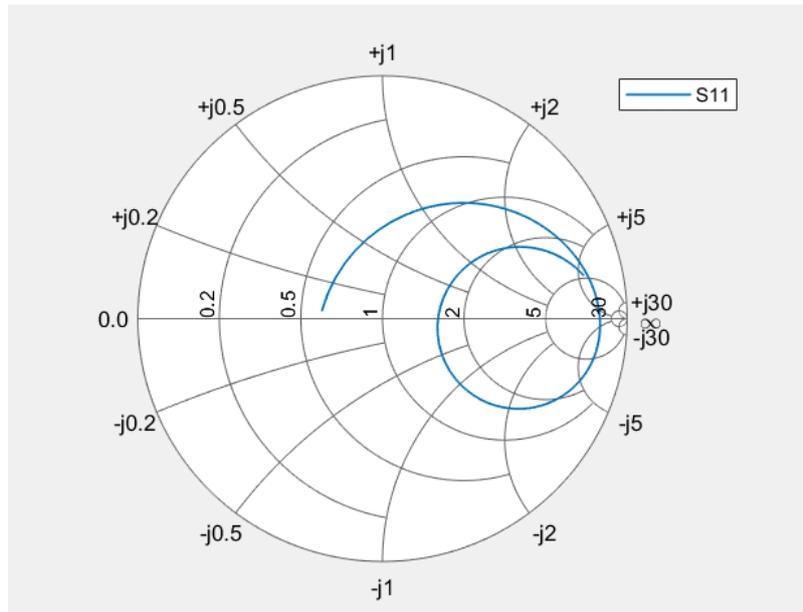


Ilustración 28 - Carta de Smith sin circuito de adaptación para antena con orificio en la parte superior

Al observar la carta de Smith puede apreciarse que, con un circuito de adaptación, es posible que al desplazar la línea correspondiente a S_{11} se aumente el ancho de banda. Sin embargo, no aumenta de manera significativa, ya que no va a ser posible contener el bucle que hace la representación dentro de $\rho=3$. Los circuitos de adaptación obtenidos son los siguientes.

	<u>component1Type</u>	<u>component1Value</u>	<u>component2Type</u>	<u>component2Value</u>
Circuit 1	"Series C"	1.0582e-12	"Shunt L"	5.6407e-08
Circuit 2	"Series L"	2.9552e-08	"Shunt C"	1.3881e-12

Ilustración 29 - Circuitos de adaptación para antena con orificio en la parte superior

El primero de los circuitos obtenidos consiste en un condensador en serie con una capacidad de 1,058pF y una bobina en paralelo cuya inductancia es de 56,4nH. El segundo de los circuitos obtenidos está compuesto por una bobina en serie de inductancia 29,55nH y un condensador en paralelo con una capacidad de 1,39pF. Finalmente se obtienen las gráficas del parámetro S_{11} de la antena con cada uno de los dos circuitos y el camino de adaptación del primero de los circuitos.

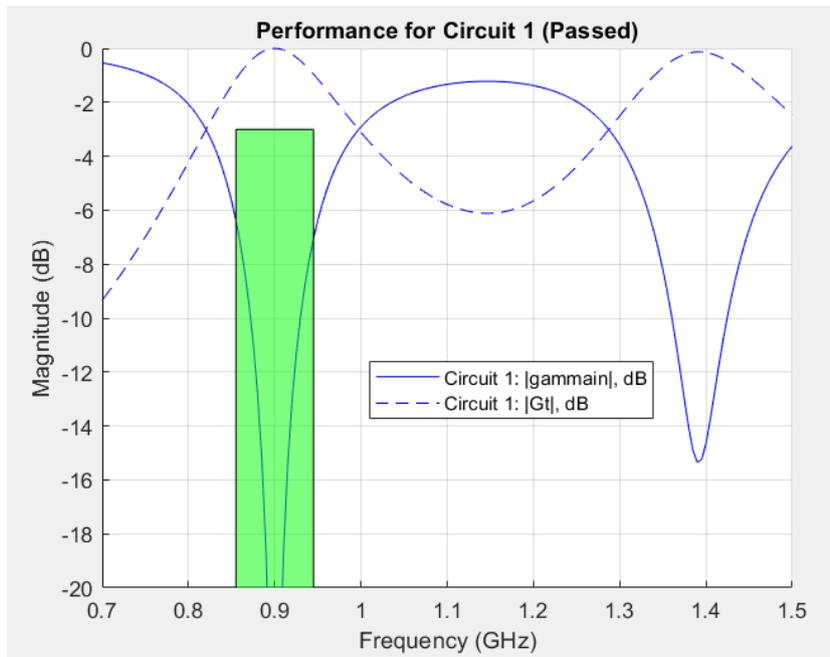


Ilustración 30 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte superior adaptada con el circuito 1

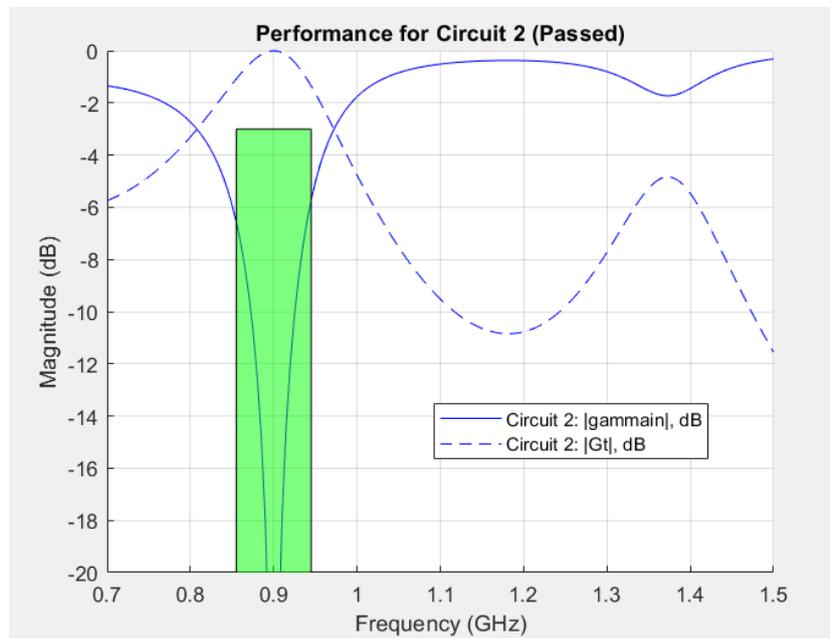


Ilustración 31 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte superior adaptada con el circuito 2

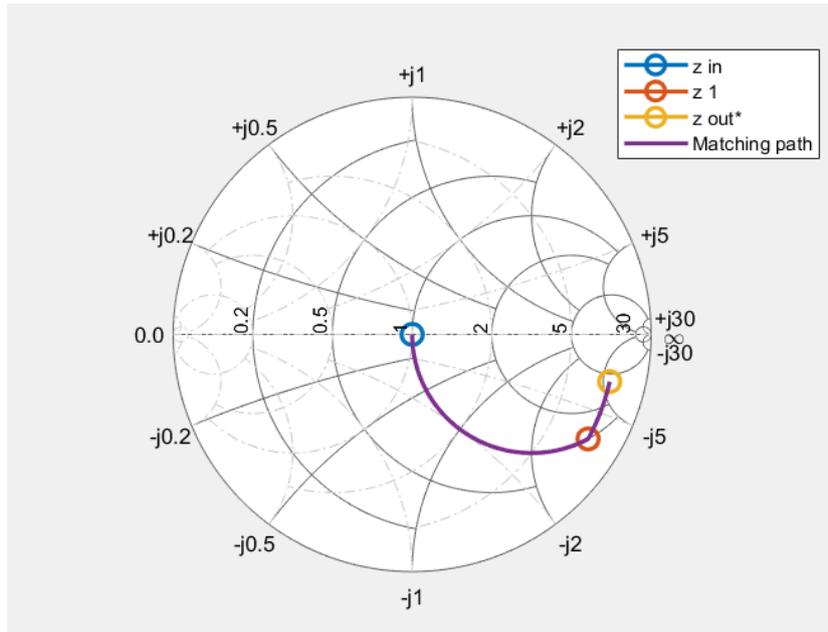


Ilustración 32 - Camino de adaptación del circuito 1

Se analiza el ancho de banda obtenido y se compara con el de la Tabla 11.

Circuito	fInferior MHz	fSuperior MHz	fCentral MHz	BW %
Sin circuito	1253	1354	1303	8%
Circuito 1	852	953	902	11%
Circuito 2	850	943	896	10%

Tabla 15 - Comparativa entre antena con orificio en la parte superior según circuito de adaptación

Con el orificio en la parte superior del plano de masa y con el circuito de adaptación no se obtienen resultados de ancho de banda comparables a los de la antena sin orificio. Con la introducción del circuito de adaptación, esta antena sigue presentando un comportamiento multibanda en el rango de frecuencias entre 700 y 1500MHz, pero se consigue que al menos una de las dos bandas de transmisión se encuentre centrada en la frecuencia de 900MHz. Esta es la frecuencia a la que interesa que transmita según los valores acordados para este trabajo. El código utilizado para esta simulación se encuentra en el anexo 11.6 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte superior y con circuito de adaptación.

Antena con orificio en la parte media del plano de masa

Se añade la representación de la carta de Smith y el circuito de adaptación para una frecuencia central de 900MHz para la antena de la Ilustración 19. Se obtiene la carta de Smith antes de añadir el circuito de adaptación.

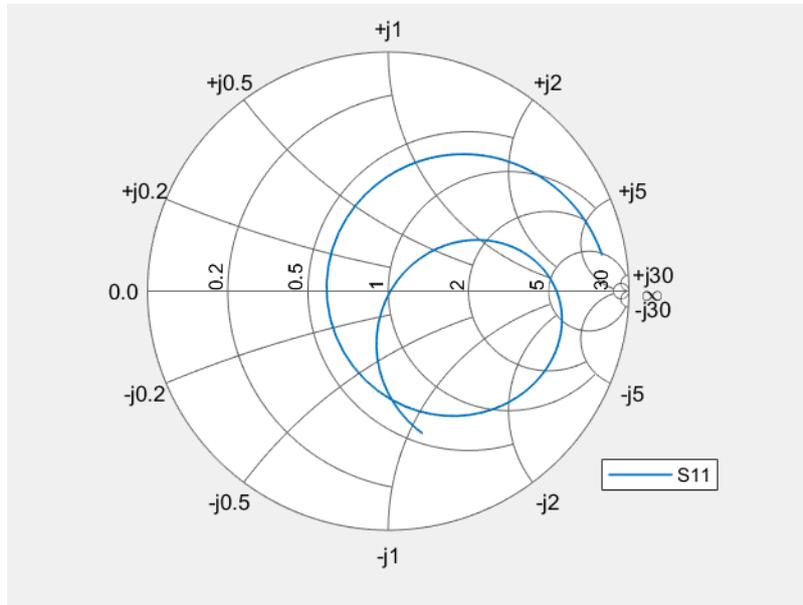


Ilustración 33 - Carta de Smith sin circuito de adaptación para antena con orificio en la parte media

De la misma manera que en el caso anterior, aunque se añada un circuito de adaptación a esta antena, va a ser difícil que se logre contener todo el bucle de la línea de S_{11} dentro de $\rho=3$. Los circuitos de adaptación obtenidos son los siguientes.

	<u>component1Type</u>	<u>component1Value</u>	<u>component2Type</u>	<u>component2Value</u>
Circuit 1	"Series C"	1.701e-12	"Shunt L"	2.4163e-08
Circuit 2	"Series L"	1.8385e-08	"Shunt C"	1.4687e-12

Ilustración 34 - Circuitos de adaptación para antena con orificio en la parte media

El primero de los circuitos obtenidos consiste en un condensador en serie con una capacidad de 1,7pF y una bobina en paralelo cuya inductancia es de 24,16nH. El segundo de los circuitos obtenidos está compuesto por una bobina en serie de inductancia 18,39nH y un condensador en paralelo con una capacidad de 1,47pF. Finalmente, se obtienen las gráficas del parámetro S_{11} de la antena con cada uno de los dos circuitos y el camino de adaptación del primero de los circuitos.

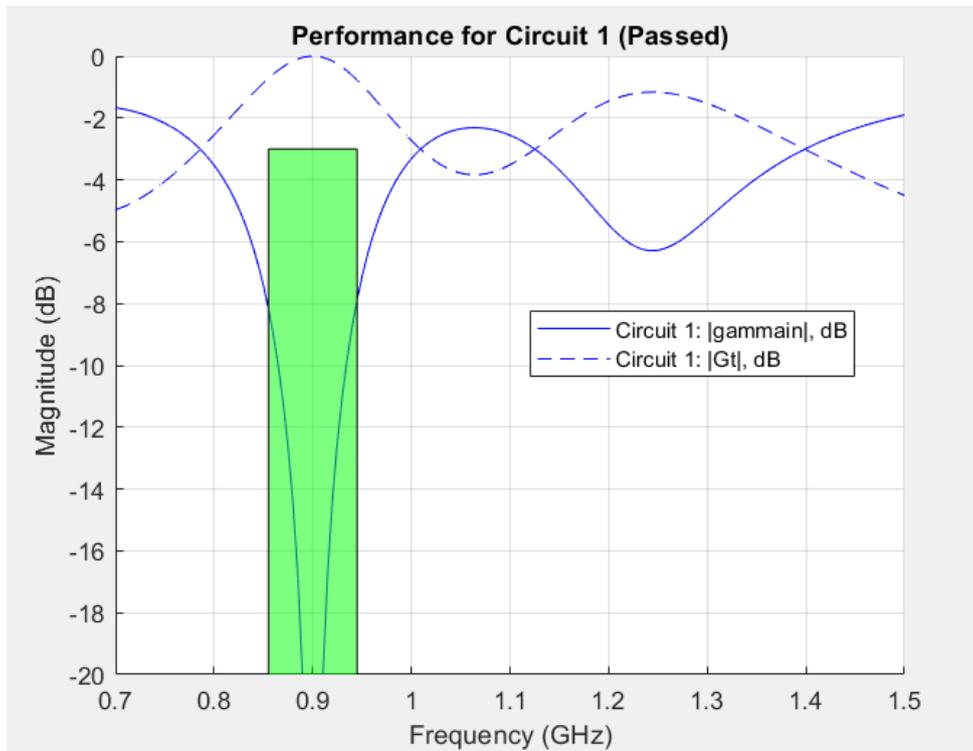


Ilustración 35 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte media adaptada con el circuito 1

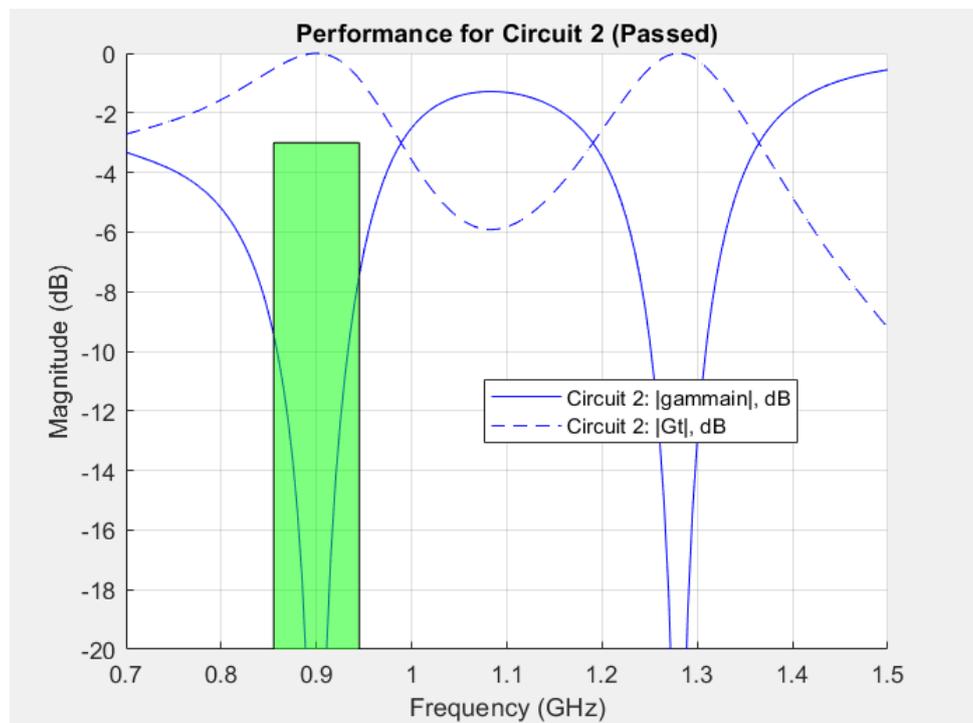


Ilustración 36 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte media adaptada con el circuito 2

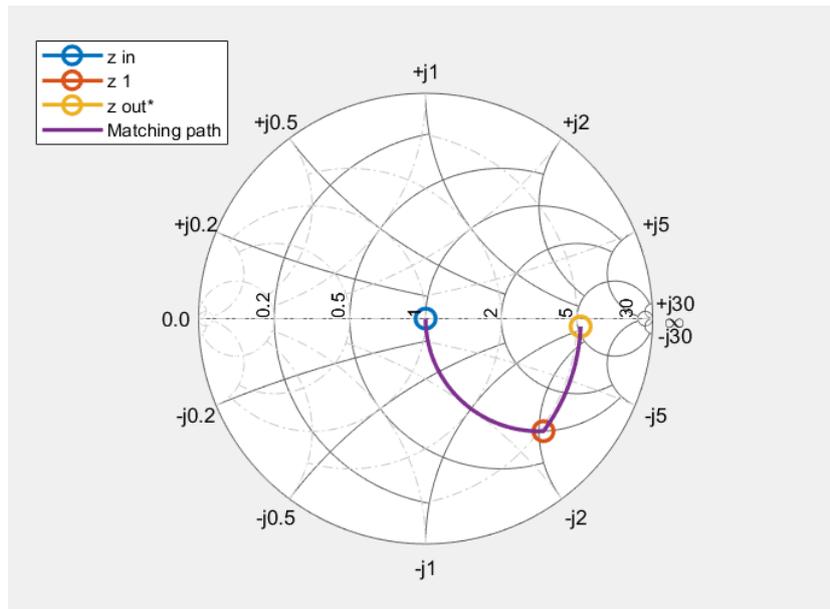


Ilustración 37 - Camino de adaptación del circuito 1

Se analizan los resultados de la simulación y se compara el ancho de banda relativo obtenido con cada uno de los circuitos de adaptación con el obtenido en la Tabla 12 para la misma antena sin circuito de adaptación.

Circuito	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
Sin circuito	715	839	777	16%
Circuito 1	837	959	898	14%
Circuito 2	817	954	885	15%

Tabla 16 - Comparativa entre antena con orificio en la parte media según circuito de adaptación

Con el orificio en la parte media del plano de masa y con los dos circuitos de adaptación generados con Matlab no se consigue un ancho de banda comparable con el de la antena sin orificio. La antena con orificio en la parte media de su plano de masa presenta un comportamiento multibanda en el rango de frecuencias analizadas tanto con circuito de adaptación como sin él. Sin embargo, gracias al circuito de adaptación se consigue que una de las bandas de transmisión esté centrada en torno a la frecuencia de referencia (900MHz). El código utilizado para esta simulación se encuentra en el anexo 11.7 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte media y con circuito de adaptación.

Antena con orificio en la parte inferior del plano de masa

Se añade la representación de la carta de Smith y el circuito de adaptación para una frecuencia central de 900MHz para la antena de la Ilustración 21. Se obtiene la carta de Smith antes de añadir el circuito de adaptación.

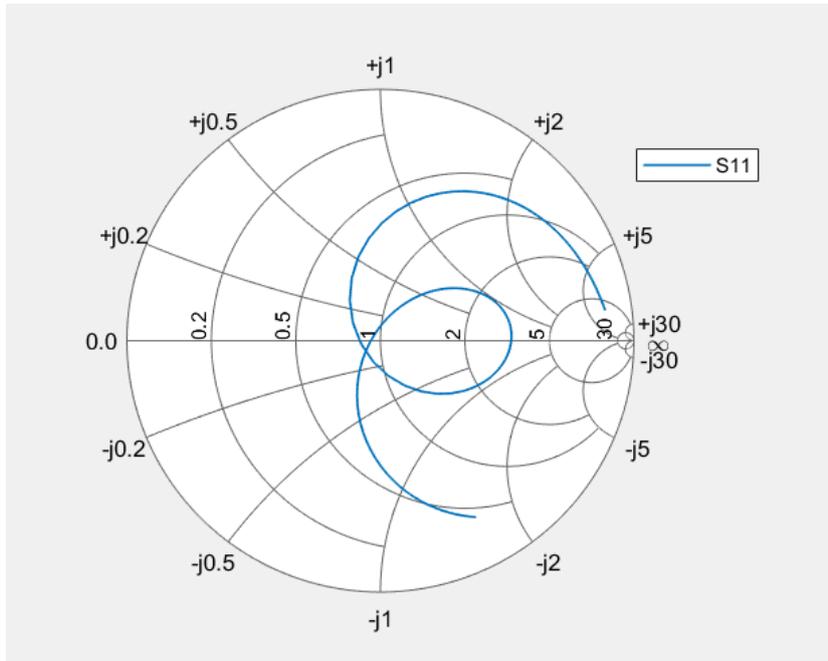


Ilustración 38 - Carta de Smith sin circuito de adaptación para antena con orificio en la parte inferior

En la Ilustración 38 se aprecia que parece posible mediante la adición de un circuito de adaptación conseguir que todo el bucle de la línea de S_{11} esté contenido dentro de $\rho=3$. Esto implica que, en vez de presentar un comportamiento multibanda para el rango de frecuencias analizadas, se logra una única banda de transmisión con un ancho de banda superior. Los circuitos de adaptación obtenidos son los siguientes.

	<u>component1Type</u>	<u>component1Value</u>	<u>component2Type</u>	<u>component2Value</u>
Circuit 1	"Series L"	7.3564e-09	"Shunt C"	2.6679e-12
Circuit 2	"Series C"	4.251e-12	"Shunt L"	3.8611e-08

Ilustración 39 - Circuitos de adaptación para antena con orificio en la parte inferior

El primero de los circuitos obtenidos consiste en una bobina en serie con una inductancia de 7,36nH y un condensador en paralelo cuya capacidad es de 2,67pF. El segundo de los circuitos obtenidos está compuesto por un condensador en serie de capacidad 4,25pF y una bobina en paralelo con una inductancia de 38,61nH. Finalmente, se obtienen las gráficas del parámetro S_{11} de la antena con cada uno de los dos circuitos y el camino de adaptación del primero de los circuitos.

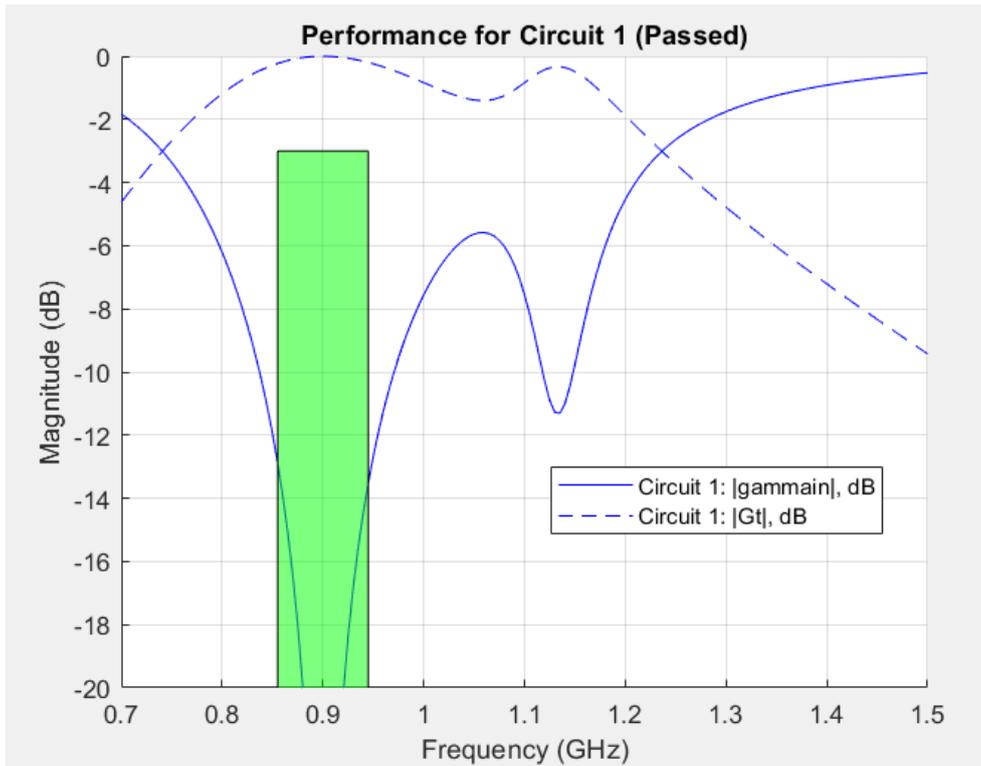


Ilustración 40 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte inferior adaptada con el circuito 1

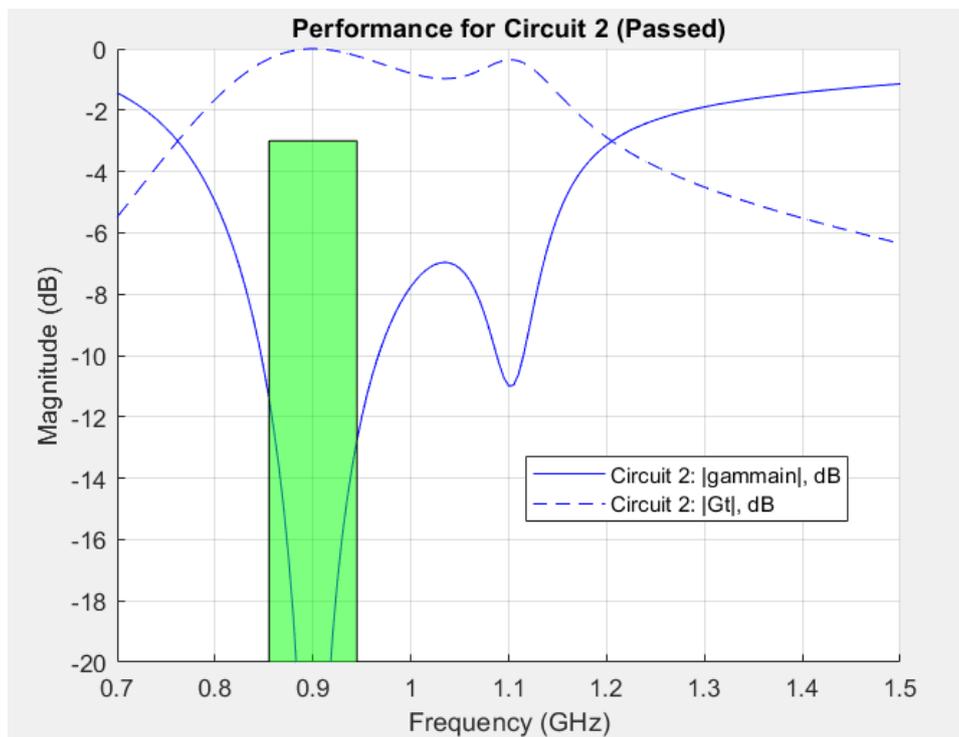


Ilustración 41 - Gráfica S_{11} de antena con orificio en la parte inferior adaptada con el circuito 2

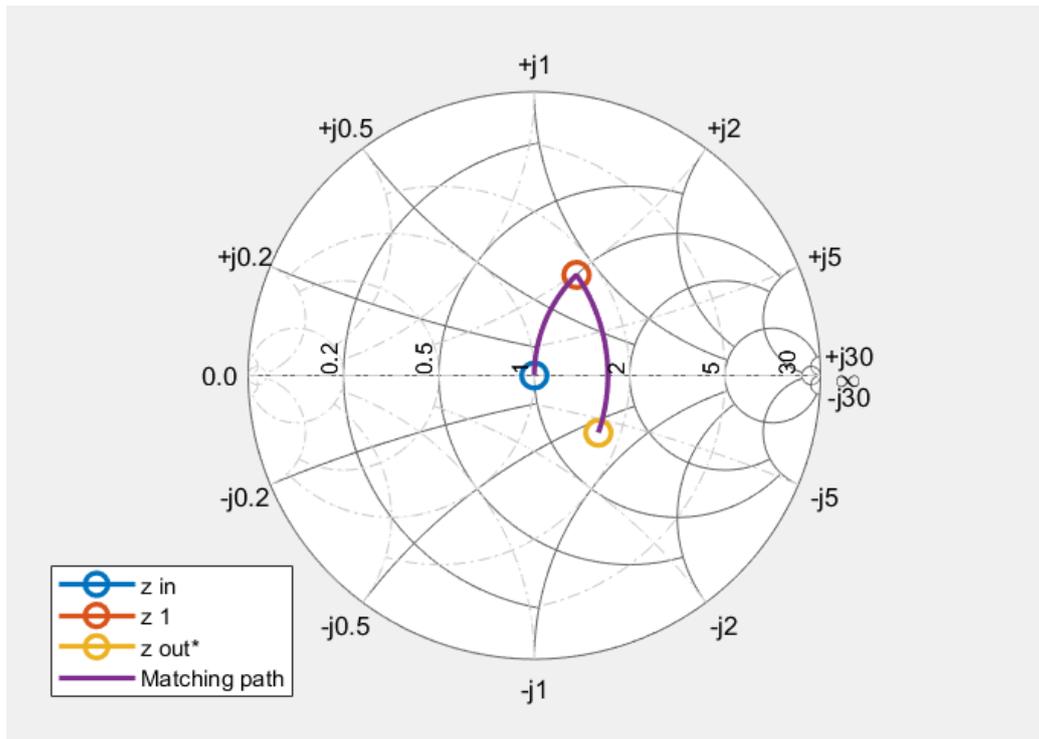


Ilustración 42 - Camino de adaptación del circuito 1

Se analizan los resultados de la simulación y se compara el ancho de banda relativo obtenido con cada uno de los circuitos de adaptación con el obtenido en la Tabla 13 para la misma antena sin circuito de adaptación.

Circuito	f _{Inferior} MHz	f _{Superior} MHz	f _{Central} MHz	BW %
Sin circuito	769	976	872	24%
Circuito 1	795	1033	914	26%
Circuito 2	813	1144	978	34%

Tabla 17 - Comparativa entre antena con orificio en la parte inferior según circuito de adaptación

Con el orificio en la parte inferior y el primer circuito de adaptación no se consigue contener todo el bucle de S_{11} en la carta de Smith dentro de $\rho=3$. Para este caso, se logra mejorar el ancho de banda respecto a la antena sin orificio en un 3%, pero aún sigue presentando un comportamiento multibanda (véase Ilustración 40). Sin embargo, haciendo uso del segundo circuito de adaptación se consigue que todo el bucle esté dentro de $\rho=3$, lo que provoca que ambas bandas de transmisión estén juntas. De esta manera, se consigue un ancho de banda significativamente mayor (34%). El código completo puede encontrarse en el anexo 11.8 Código creado para una InvertedLCoPlanar (80x60) con un orificio en la parte inferior y con circuito de adaptación.

6.3 Conclusiones

En este capítulo se ha mostrado un procedimiento válido por el cual se obtienen circuitos de adaptación para una frecuencia dada sin realizar manualmente ningún cálculo. Con el procedimiento descrito se consigue centrar una de las bandas de transmisión de las antenas con orificios en la parte superior y media del plano de masa en la frecuencia deseada. Finalmente, en la antena que presenta un orificio en la parte inferior del plano de masa se consigue, mediante el uso de un circuito de adaptación juntar las dos bandas de transmisión y obtener un ancho de banda significativamente mayor al de la antena sin orificio.

Queda verificado que Matlab es una herramienta útil y con una complejidad suficiente para el estudio del efecto de la geometría del plano de masa de las antenas 2D.

7. Obtención de una antena 2D a partir de una imagen

En el presente capítulo se analiza la posibilidad de la obtención de antenas 2D a partir de una imagen [21], para ello, se hace uso del Image processing Toolbox de Matlab [16]. Tras la obtención de la geometría de la antena a partir de una imagen, se puede simular y obtener los mismos datos que con una antena cuya geometría ha sido generada por código. Se pueden combinar ambas metodologías para añadir modificaciones mediante código a la antena obtenida mediante una imagen.

7.1 Metodología y limitaciones

Se va a estudiar un ejemplo para comprobar la metodología de obtención de geometrías a partir de imágenes. Este ejemplo consiste en una antena 2D contenida en la documentación de referencia [2]. Con esto no se busca obtener ningún resultado en concreto sobre el desempeño de estas antenas, sino estudiar la convergencia entre Image processing Toolbox y Antenna Toolbox para la obtención de antenas a partir de una imagen.

Al utilizar esta metodología, encontramos las siguientes limitaciones:

- La calidad de la imagen y el contraste de la antena con el fondo juegan un papel fundamental que pueden provocar errores en la geometría obtenida
- Image Segmentator tiene una precisión limitada que provoca que los vértices y curvas presenten errores.
- Para reducir la necesidad de computación se dividen los puntos obtenidos en un factor de 32, esto aumenta la imprecisión en la geometría obtenida.

7.2 Estudio

El procedimiento puede dividirse en los siguientes pasos:

- Importar la imagen: es importante que tenga buena calidad y que la antena tenga un alto contraste con el fondo.
- Segmentar la imagen: en ese paso se indica manualmente con la herramienta "Graph Cut" [16] qué parte de la imagen es fondo y qué parte nos interesa. Finalmente se exporta el código generado para utilizarlo en nuestro script.
- Se escala la geometría obtenida en los pasos anteriores para que tenga las dimensiones deseadas. De esta manera, se pasan a utilizar coordenadas cartesianas.
- Se reducen los puntos obtenidos en un factor de 32. Se utiliza este factor debido a que consigue resultados aceptables sin requerir una capacidad de cómputo muy grande.
- Se genera una antena con la geometría obtenida y se añade un punto de alimentación.

Image Processing Toolbox

En esta primera parte se abre la imagen con nombre `monopoleloop.png` obtenida del documento [2].

Nótese: Esta imagen ha sido editada con un editor de imágenes previamente para eliminar líneas auxiliares y el plano de masa, para así añadirlo posteriormente mediante código.

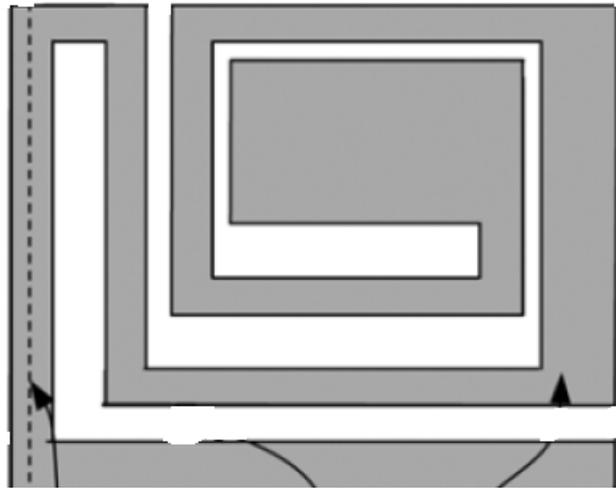


Ilustración 43 - `Monopoleloop.png`

A continuación, se abre la imagen con la App “Image Segmenter” de Matlab y se utiliza la herramienta Graphic Cut para diferenciar manualmente la antena del fondo (véase Ilustración 44 - Graphic Cut Ilustración 44).

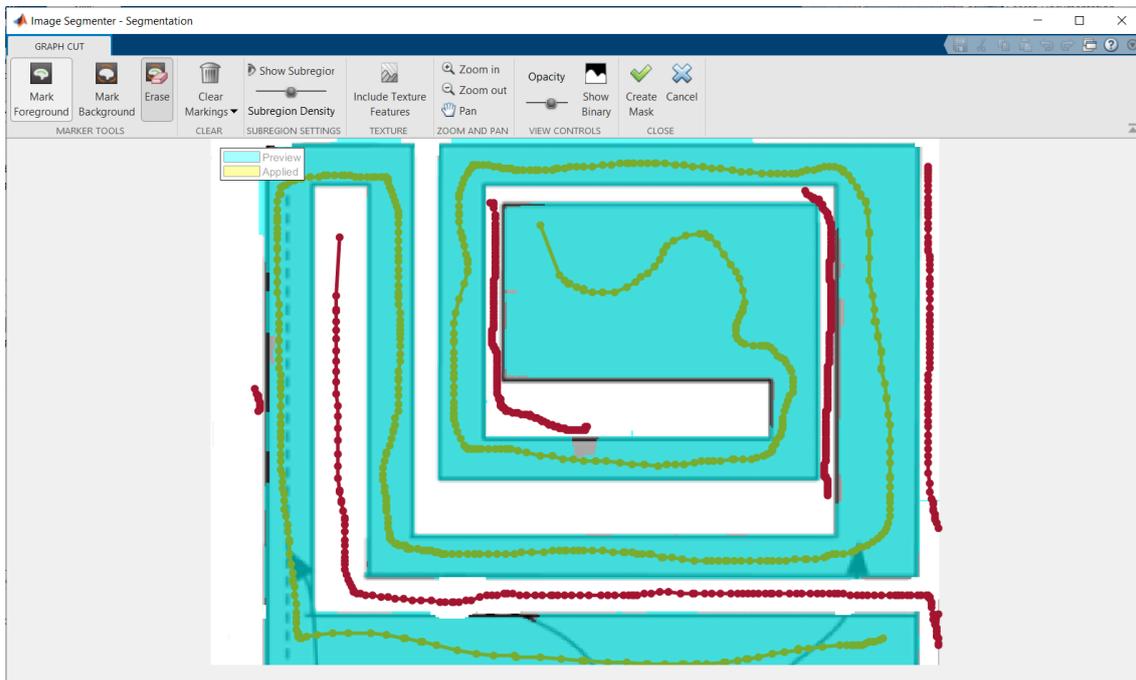


Ilustración 44 - Graphic Cut

Una vez diferenciada la antena del fondo se pueden eliminar irregularidades de los bordes de la antena con la herramienta Active contours, poniendo el valor de las iteraciones en 100.

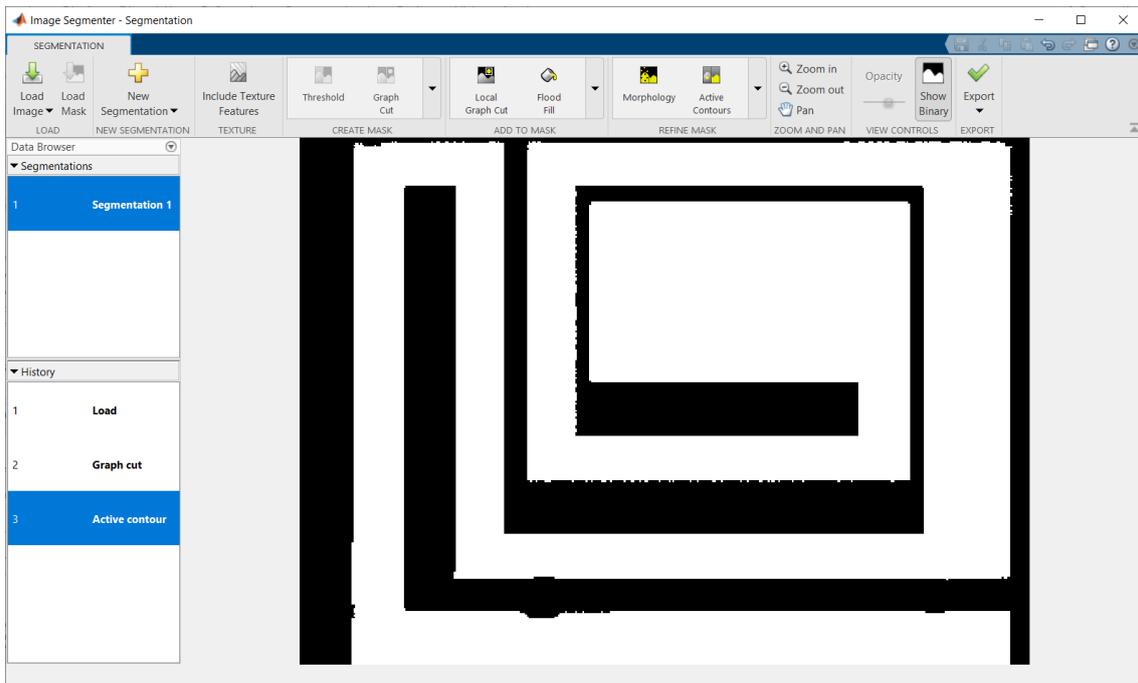


Ilustración 45 - Active Contours

En la Ilustración 45 se puede apreciar el resultado tras el uso de las dos herramientas mencionadas anteriormente. Una vez tengamos una máscara que se considere como válida, se exporta utilizando el botón de export. De esta manera, se genera el código de la máscara que se acaba de crear. El código exportado puede observarse en el anexo 11.9 Código exportado Image Processing Toolbox

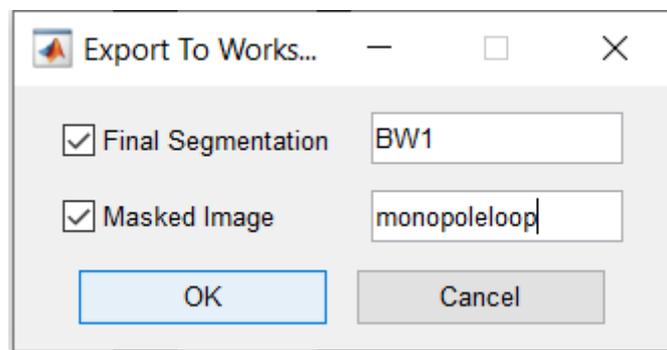


Ilustración 46 - Export MaskedImage

Creación de la antena

Se utiliza la imagen original y la máscara exportada para generar una antena con la geometría obtenida de la imagen. A continuación, se indica cada sección del código junto con su explicación.

Primero se importa la imagen original (Ilustración 43):

```
% Read original Image
I = imread('monopoleloop.PNG');
```

Se aplica a esta imagen la máscara exportada de del Image Processing Tool (véase Ilustración 46). En este caso la máscara se llama “monopoleloop” y su contenido se encuentra en el anexo 11.9 Código exportado Image Processing Toolbox. Además, se crea una figura para mostrar el resultado de la máscara aplicada a la imagen (véase Ilustración 47).

```
% Apply exported mask and display the result
BWf = monopoleloop(I);
figure
imshow(BWf)
```

Se adapta el resultado a un sistema de dimensiones por unidades de medida, en este caso metros y se escala según los valores indicados en esta sección del código

```
% Scale per pixel based on tag dimensions
B = bwboundaries(BWf);
xmax = max(B{1}(:,1));
xmin = min(B{1}(:,1));
ymax = max(B{1}(:,2));
ymin = min(B{1}(:,2));
L = 35e-3;
W = 35e-3;
LperColpixel = L/(xmax-xmin);
WperRowpixel = W/(ymax-ymin);
Bp = B;
for i = 1:length(Bp)
    Bp{i} = [Bp{i}(:,1).*LperColpixel Bp{i}(:,2).*WperRowpixel
zeros(size(Bp{i},1),1)];
end
p = cell2mat(Bp);
x = p(:,1);
y = p(:,2);
figure
plot(x,y, '*')
grid on
axis equal
xlabel('x (m)')
ylabel('y (m)')
title('Boundary points')
```

El código anterior da como resultado un número muy elevado de puntos, lo que aumenta la capacidad de cómputo necesaria. Debido a lo mencionado anteriormente, se reduce el número de puntos en un factor de 32 y se comprueba con los resultados que estos siguen siendo válidos, ya que se genera la antena con la geometría deseada.

```
% Reduce the number of points by a factor of 32
D = 32;
xD = x(1:D:end);
```

```

yD = y(1:D:end);
BpD{1} = Bp{1}(1:D:end,:);
figure
hold on
plot(xD,yD,'r*')
shg
grid on
axis equal

```

Se añade el plano de masa de dimensiones 35x45mm y un rectángulo sobre el que se colocará la alimentación.

Nótese: Los parámetros de ancho y largo de cada uno de los rectángulos están invertidos en el software respecto a lo considerado en el trabajo, es decir, el valor de Width corresponde con la longitud del rectángulo y el parámetro Length corresponde con el ancho. Esto es así a lo largo de todo el trabajo.

```

% Define GroundPlane
gp1 = antenna.Rectangle('Length', 45e-3, 'Width', 35e-3, ...
                        'Center', [57.5e-3 20.5e-3]);
p1 = getShapeVertices(gp1);

% Define Feeding rectangle
sf1 = antenna.Rectangle('Length', 3e-3, 'Width', 3e-3, ...
                        'Center', [31e-3 11.5e-3]);
p2 = getShapeVertices(sf1);

```

Se genera una antena con la adición de los tres elementos anteriores, se define el punto de alimentación y se crea una figura que muestre el resultado final:

```

% Define Antenna
c = customAntennaGeometry;
c.Boundary = [BpD(1) {p1,p2}];
c.Operation = 'P1+P2+P3';

% Define Feeding Point
c.FeedLocation = [31e-3 11.5e-3 0];
c.FeedWidth = 1e-3;
figure
show(c)

```

Finalmente, se añade una figura para cada uno de los resultados obtenidos durante la simulación de la misma manera que se explica en el capítulo 4.

```

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;
% Define frequency range
freqRange = (700:5:3000) * 1e6;
% s11
figure;
s = sparameters(c, freqRange);
rfplot(s)
% pattern
figure;
pattern(c, plotFrequency)

```

```

% current
figure;
current(c, plotFrequency)
% impedance
figure;
impedance(c, freqRange)
% elevation
figure;
patternElevation(c, plotFrequency)
% azimuth
figure;
patternAzimuth(c, plotFrequency)
% smithchart
figure;
s = sparameters(c, freqRange);
smithplot(s)

```

Puede encontrarse el código completo en el anexo 11.10 Código generado para la simulación de una antena obtenida a partir de una imagen.

Al ejecutar la simulación se obtiene las siguientes figuras:

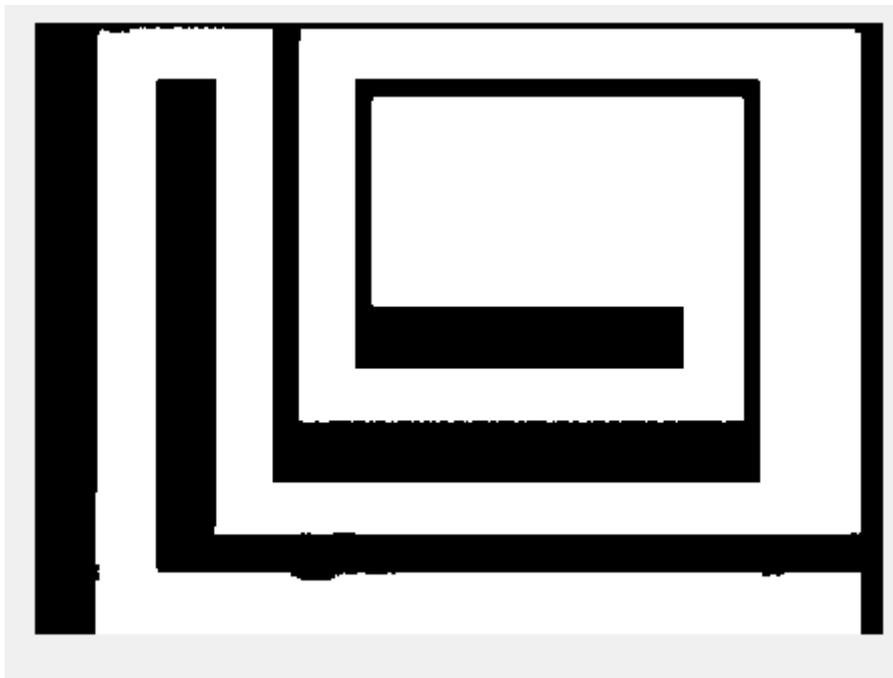


Ilustración 47 - Máscara aplicada sobre la imagen original

La primera figura obtenida es la aplicación de la máscara generada con Image Processing Tool sobre la imagen original.

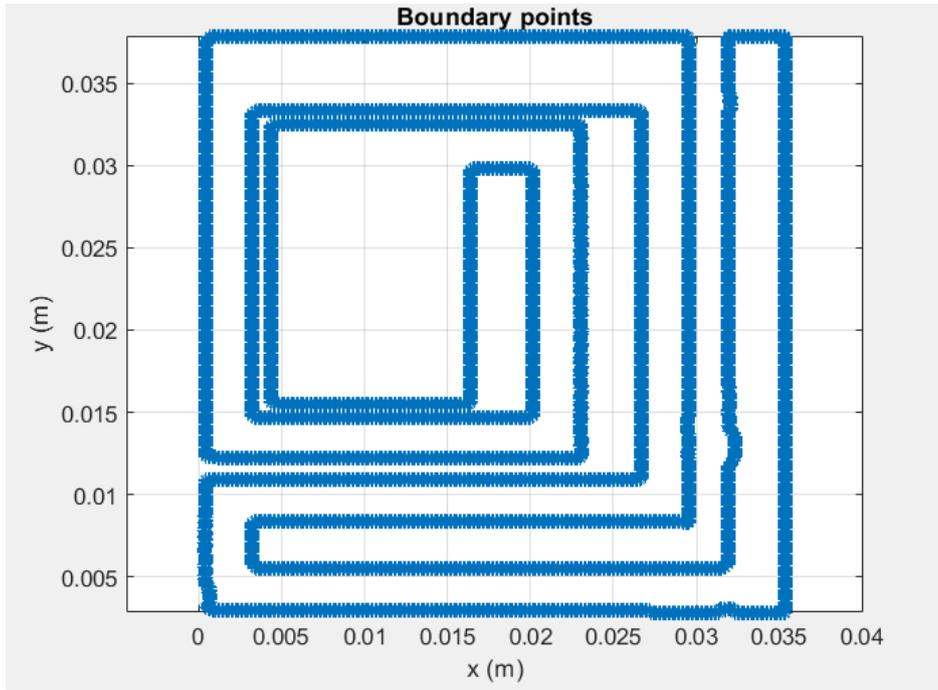


Ilustración 48 - Puntos del perímetro en ejes cartesianos y escala real

Se obtienen los puntos del perímetro de la máscara para, posteriormente, poder regenerar la geometría de la imagen. Para ello y con finalidad de reducir la capacidad de cómputo necesaria se reduce el número de puntos en un factor de 32.

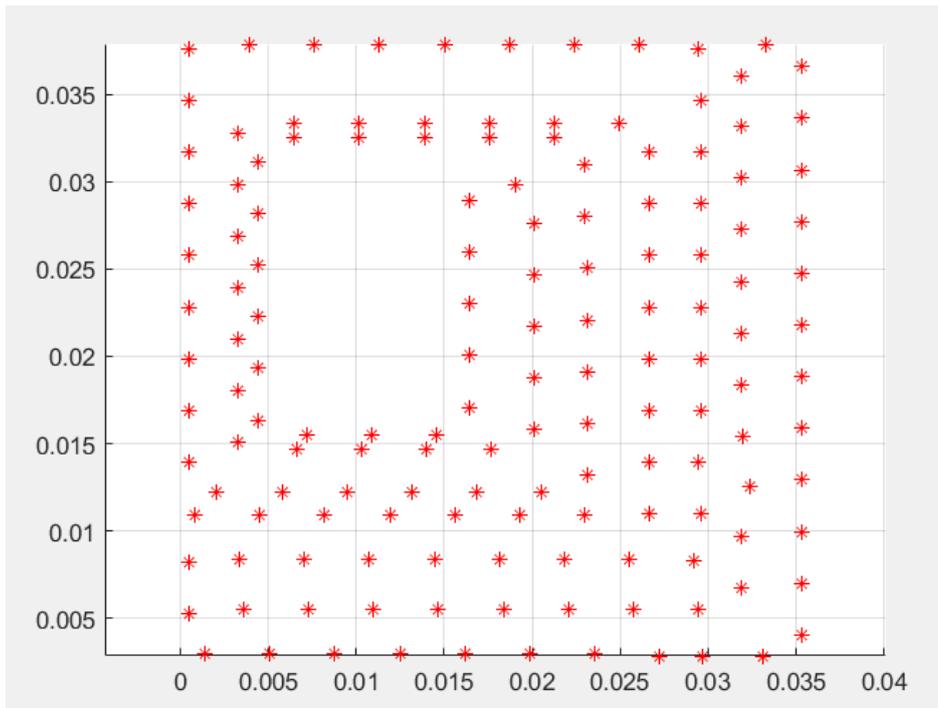


Ilustración 49 - Reducción del número de puntos en un factor 32

A continuación, se genera la antena con la geometría obtenida a partir de la imagen, la adición de un plano de masa y de un punto para la alimentación.

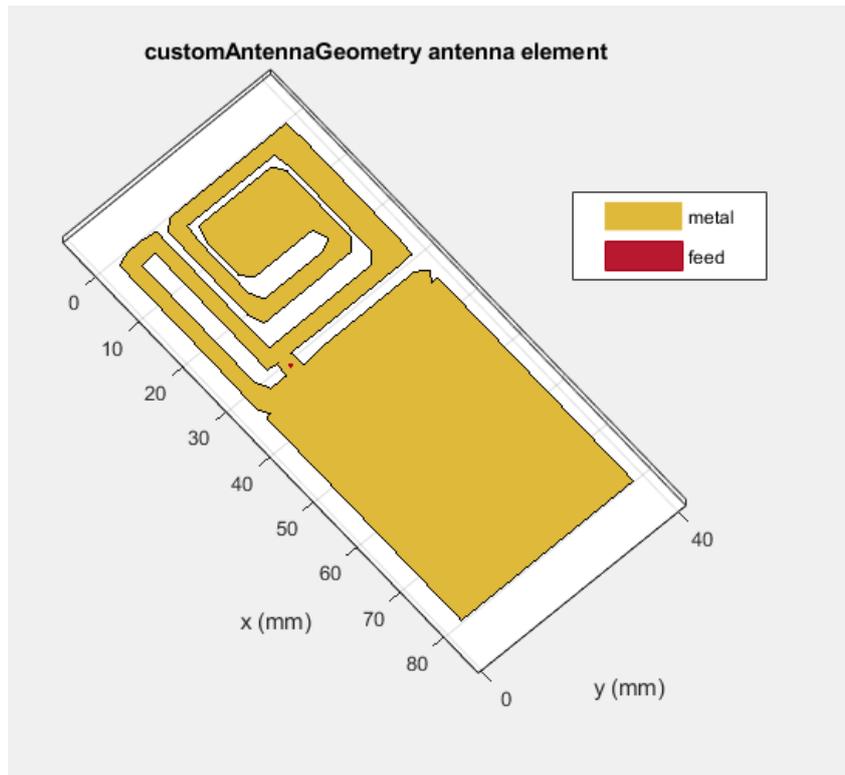


Ilustración 50 - Antena generada a partir de una imagen

Finalmente, se obtiene información del desempeño de esta antena mediante la simulación.

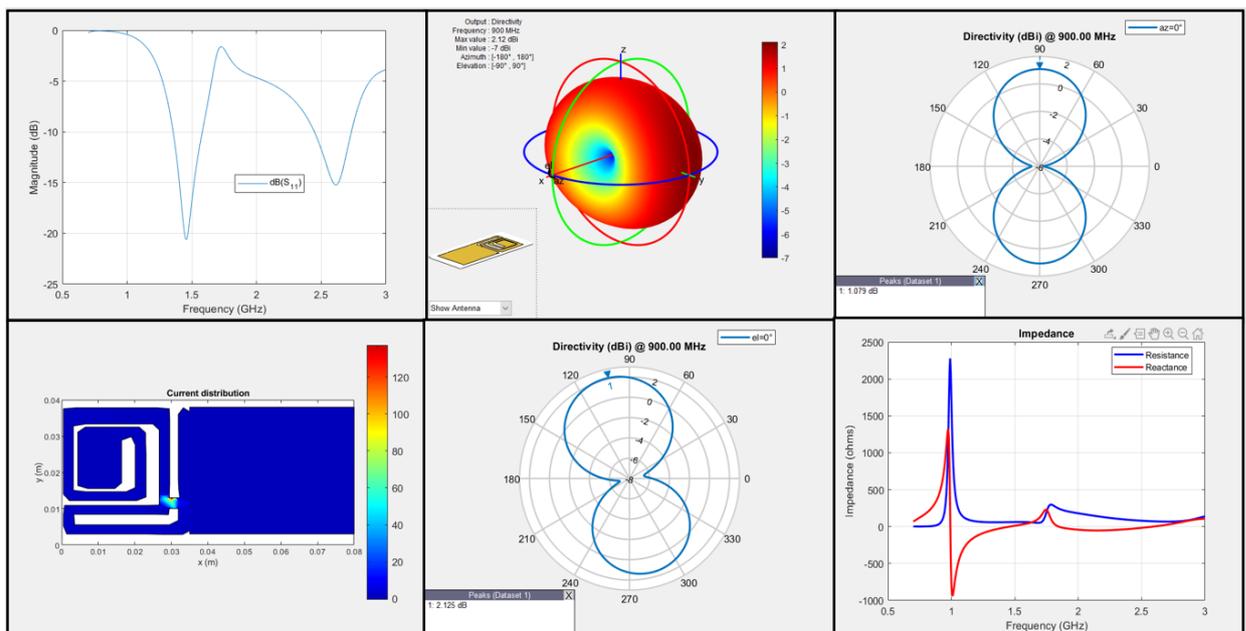


Ilustración 51 - Información disponible tras simular antena obtenida

Los datos mostrados empezando por la fila de arriba, de izquierda a derecha son:

- Gráfica del parámetro S_{11} .
- Patrón de radiación en 3D.

- Diagrama de elevación.

Los datos de la fila inferior, de izquierda a derecha son:

- Distribución de corriente.
- Diagrama acimutal.
- Representación de la impedancia y la reactancia.

Además, se muestra adicionalmente la carta de Smith según lo indicado en el capítulo 6.

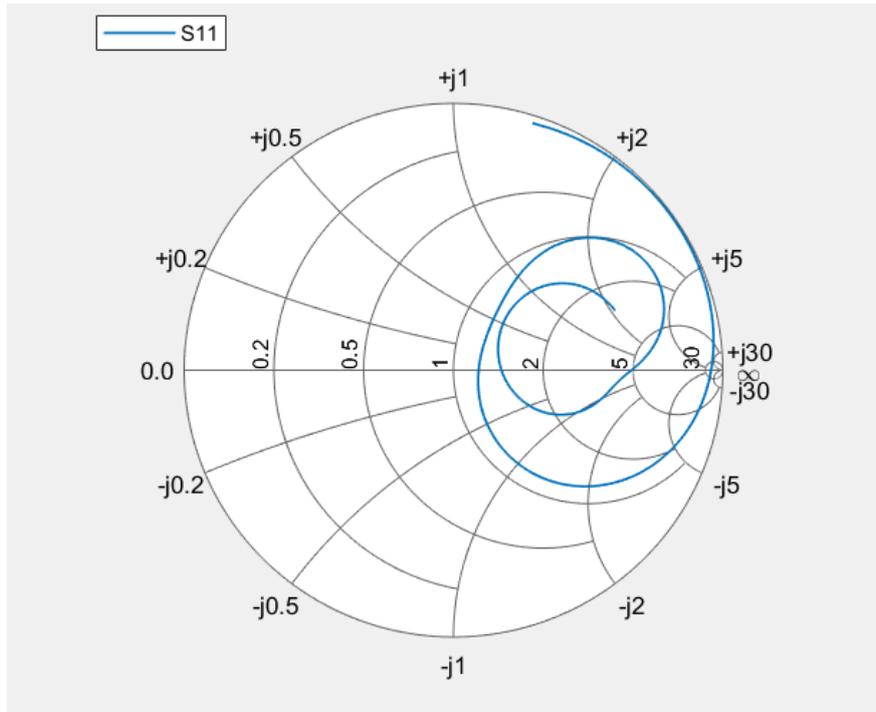


Ilustración 52 - Carta de Smith de la antena obtenida

7.3 Conclusiones

En este capítulo, se ha mostrado un procedimiento por el cual se pueden simular antenas cuyas geometrías son obtenidas mediante una imagen. Para ello, se hace uso de la convergencia entre dos aplicaciones de Matlab como son Antenna Toolbox e Image processing Toolbox. El procedimiento descrito es replicable para otras imágenes y presenta una amplia gama de posibilidades para la simulación de antenas 2D con geometrías no estándar.

Se ha verificado que todos los procedimientos descritos en capítulos anteriores son compatibles y pueden usarse en conjunto. En este caso en el que parte de la antena se obtiene a partir de una imagen, el plano de masa y la alimentación se añaden mediante código para finalmente simular y obtener los datos.

8. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es estudiar las posibilidades de Matlab para el estudio de antenas 2D con geometrías no estándar. Se han analizado antenas contenidas en las librerías de Matlab mediante sucesivas simulaciones y toma de datos. Tras ello, se han estudiado formas de crear antenas con geometrías de diseño propio explorando dos posibles caminos, como puede ser la creación mediante código o a partir de una imagen. Además, se han utilizado estas herramientas para resolver un problema real, que consiste en mejorar el ancho de banda de una antena mediante la adición de un circuito de adaptación y un orificio en su plano de masa. Por tanto, se han logrado con éxito los objetivos definidos para el presente trabajo.

Se ha demostrado que Matlab es una herramienta útil y potente para la simulación de antenas 2D gracias a la multitud de aplicaciones de Matlab y la convergencia entre ellas.

Según las características de este trabajo, la planificación ha sido la adecuada, puesto que ha sido necesaria una labor extensa de investigación para averiguar utilidades de Matlab a incluir en el presente trabajo, así como conocer los límites de Matlab para el estudio de antenas 2D. Por otro lado, debido a la gran cantidad de simulaciones realizadas separar las fases de toma de datos y la escritura del trabajo ha sido acertado para no obtener conclusiones precipitadas antes de tener una vista general de todos los resultados.

En este trabajo se sientan las bases para futuros estudios. Las posibilidades de futuros trabajos son inmensas debido a la intersección de Antenna Toolbox junto con multitud de aplicaciones de Matlab. Se pueden estudiar de la misma forma otros tipos de antenas 2D, antenas 2D con elementos parásitos resonantes. Es posible imprimir alguno de los diseños sobre una PCB o incluso mediante impresión 3D haciendo uso de filamentos conductores para estudiar el desempeño real de estas geometrías en una cámara anecoica y comparar los resultados con las simulaciones realizadas. Se pueden incluir estas antenas con geometrías no estándar en materiales didácticos de titulaciones universitarias para analizar de manera práctica la importancia del plano de masa en estas antenas 2D.

9. Glosario

2D	Dos Dimensiones
3D	Tres Dimensiones
BW	BandWidth
dB	Decibelio
F	Faradios
f _{Central}	Frecuencia Central
f _{Inferior}	Frecuencia Inferior
f _{Superior}	Frecuencia Superior
GSM	Global System for Mobile communications
H	Henrios
Hz	Hercios
PCB	Printed Circuit Board
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
Ω	Ohmios

10. Bibliografía

- [1] K. L. Wong, G. Y. Lee, and T. W. Chiou, "A low-profile planar monopole antenna for multiband operation of mobile handsets," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 1, 2003, doi: 10.1109/TAP.2003.809044.
- [2] H. W. Hsieh, Y. C. Lee, K. K. Tiong, and J. S. Sun, "Design of a multiband antenna for mobile handset operations," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 200–203, 2009, doi: 10.1109/LAWP.2008.2011655.
- [3] J. Anguera, "Ground Plane Contribution in Wireless," vol. 26, no. September, pp. 101–114, 2012.
- [4] J. Anguera, A. Andújar, M. C. Huynh, C. Orlenius, C. Picher, and C. Puente, "Advances in antenna technology for wireless handheld devices," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/838364.
- [5] J. Anguera, A. Cabedo, C. Picher, I. Sanz, M. Ribó, and C. Puente, "Multiband handset antennas by means of groundplane modification," *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, no. 2, pp. 1253–1256, 2007, doi: 10.1109/APS.2007.4395729.
- [6] C. Picher, J. Anguera, A. Andujar, C. Puente, and S. Kahng, "Analysis of the human head interaction in handset antennas with slotted ground planes," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 2, pp. 36–56, 2012, doi: 10.1109/MAP.2012.6230717.
- [7] A. Cabedo, J. Anguera, C. Picher, M. Ribó, and C. Puente, "Multiband handset antenna combining a PIFA, slots, and ground plane modes," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 9, pp. 2526–2533, 2009, doi: 10.1109/TAP.2009.2027039.
- [8] C. Mathworks and A. H. Drive, "Company overview," *Transcatheter Valve Ther.*, pp. 214–233, 2020, doi: 10.3109/9781439810828-14.
- [9] H. Xu *et al.*, "A compact and low-profile loop antenna with six resonant modes for LTE smartphone," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 9, pp. 3743–3751, 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2582919.
- [10] S. Cao, Y. Jiao, G. Zhao, and B. Yang, "A compact planar inverted-F antenna for handset application," *Proc. - 2009 3rd IEEE Int. Symp. Microwave, Antenna, Propag. EMC Technol. Wirel. Commun. MAPE 2009*, pp. 673–675, 2009, doi: 10.1109/MAPE.2009.5355624.
- [11] A. Iftikhar, M. N. Rafiq, M. M. Masud, B. Ijaz, S. Roy, and B. D. Braaten, "A dual band balanced planar inverted F antenna (PIFA) for mobile applications," *IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp.*, pp. 1196–1197, 2013, doi: 10.1109/APS.2013.6711258.
- [12] J. Anguera, I. Sanz, J. Mumbrú, and C. Puente, "Multiband handset antenna with a parallel excitation of PIFA and slot radiators," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 2, pp. 348–356, 2010, doi: 10.1109/TAP.2009.2038183.
- [13] Dassault Systèmes Simulia Corp, "CST Studio Suite Recommended Hardware." <https://www.3ds.com/support/hardware-and-software/simulia-system-information/cst-studio-suite/cst-studio-suite/> (accessed Dec. 19, 2020).
- [14] C. Mathworks and A. H. Drive, "System Requirements - Release 2020a - Windows," vol. 10, p. 2020, 2019.

- [15] C. Mathworks and A. H. Drive, "Antenna ToolBox User's Guide R 2020 a," 2020.
- [16] C. Mathworks and A. H. Drive, "Image Processing Toolbox TM User's Guide R 2018 a," p. 5700, 2014.
- [17] "Create antenna represented by 2-D custom geometry - MATLAB - MathWorks España." <https://es.mathworks.com/help/antenna/ref/customantennageometry.html> (accessed Dec. 19, 2020).
- [18] "Create matching network for 1-port network and generate circuit object - MATLAB - MathWorks España." https://es.mathworks.com/help/rf/ref/matchingnetwork.html?searchHighlight=matchingnetwork&s_tid=srchtitle (accessed Dec. 19, 2020).
- [19] J. Anguera, A. Andujar, G. Mestre, J. Rahola, and J. Juntunen, "Design of Multiband Antenna Systems for Wireless Devices Using Antenna Boosters [Application Notes]," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 20, no. 12, pp. 102–114, 2019, doi: 10.1109/MMM.2019.2941662.
- [20] S. Risco, J. Anguera, A. Andújar, A. Pérez, and C. Puente, "Coupled monopole antenna design for multiband handset devices," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, no. 2, pp. 359–364, Feb. 2010, doi: 10.1002/mop.24893.
- [21] "Antenna Model Generation and Full-Wave Analysis From A Photo - MATLAB & Simulink - MathWorks España." <https://es.mathworks.com/help/antenna/ug/antenna-model-generation-and-full-wave-analysis-from-a-photo.html> (accessed Dec. 19, 2020).

11. Anexos

11.1 Código exportado de InvertedLCoplanar

A continuación, se muestra el código exportado de una antena tipo InvertedLCoplanar generada mediante las librerías de Antenna Toolbox.

```
% Create a invertedLcoplanar antenna
% Generated by MATLAB(R) 9.7 and Antenna Toolbox 4.1.

%% Antenna Properties
% Design antenna at frequency 900000000Hz
antennaObject = design(invertedLcoplanar,900000000);
% Properties changed
antennaObject.GroundPlaneWidth = 0.08;
antennaObject.GroundPlaneLength = 0.15;

%% Antenna Analysis
% Define plot frequency
plotFrequency = 900000000;
% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;
% show for invertedLcoplanar
figure;
show(antennaObject)
% current for invertedLcoplanar
figure;
current(antennaObject, plotFrequency)
% pattern for invertedLcoplanar
figure;
pattern(antennaObject, plotFrequency)
% azimuth for invertedLcoplanar
figure;
patternAzimuth(antennaObject, plotFrequency)
% elevation for invertedLcoplanar
figure;
patternElevation(antennaObject, plotFrequency)
% impedance for invertedLcoplanar
figure;
impedance(antennaObject, freqRange)
% s11 for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(antennaObject, freqRange);
rfplot(s)
```

11.2 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60)

A continuación, se muestra el código creado de una antena tipo InvertedLCoplanar con un plano de masa de dimensiones 80x60mm.

```
close all;
% Define GroundPlane
rect1 = antenna.Rectangle('Length', 60e-3, 'Width', 80e-3);
p1 = getShapeVertices(rect1);

% Define monopole
rect2 = antenna.Rectangle('Length', 53.726e-3, 'Width', 3.6848e-3,
...
    'Center', [-25e-3, 67.664e-3]);
p2 = getShapeVertices(rect2);
rect3 = antenna.Rectangle('Length', 3.6848e-3, 'Width', 25.822e-3,
...
    'Center', [0e-3, 52.911e-3]);
p3 = getShapeVertices(rect3);

% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3};
ant.Operation = 'P1+P2+P3';

% Define FeedPoint
ant.FeedLocation = [0e-3, 40e-3,0];
ant.FeedWidth = 3.5e-3;

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;

% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;

% show for invertedLcoplanar
figure;
show(ant)

% s11 for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
rfplot(s)

% pattern for invertedLcoplanar
figure;
pattern(ant, plotFrequency)

% current for invertedLcoplanar
figure;
current(ant, plotFrequency)

% impedance for invertedLcoplanar
figure;
impedance(ant, freqRange)

% elevation for invertedLcoplanar
```

```
figure;  
patternElevation(ant, plotFrequency)  
  
% azimuth for invertedLcoplanar  
figure;  
patternAzimuth(ant, plotFrequency)
```

11.3 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con el monopolo desplazado al vértice.

A continuación, se muestra el código creado de una antena tipo InvertedLCoplanar con un plano de masa de dimensiones 80x60mm con el monopolo desplazado al vértice del plano de masa.

```
close all;
% Define GroundPlane
rect1 = antenna.Rectangle('Length', 60e-3, 'Width', 80e-3);
p1 = getShapeVertices(rect1);

% Define monopole
rect2 = antenna.Rectangle('Length', 53.726e-3, 'Width', 3.6848e-3,
...
    'Center', [2e-3, 67.664e-3]);
p2 = getShapeVertices(rect2);
rect3 = antenna.Rectangle('Length', 3.6848e-3, 'Width', 25.822e-3,
...
    'Center', [27e-3, 52.911e-3]);
p3 = getShapeVertices(rect3);

% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3};
ant.Operation = 'P1+P2+P3';

% Define FeedPoint
ant.FeedLocation = [27e-3, 40e-3, 0];
ant.FeedWidth = 3.5e-3;

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;

% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;

% show for invertedLcoplanar
figure;
show(ant)

% s11 for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
rfplot(s)

% pattern for invertedLcoplanar
figure;
pattern(ant, plotFrequency)

% current for invertedLcoplanar
figure;
current(ant, plotFrequency)

% impedance for invertedLcoplanar
figure;
impedance(ant, freqRange)
```

```
% elevation for invertedLcoplanar  
figure;  
patternElevation(ant, plotFrequency)  
  
% azimuth for invertedLcoplanar  
figure;  
patternAzimuth(ant, plotFrequency)
```

11.4 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con orificios en su plano de masa.

A continuación, se muestra el código creado de una antena tipo InvertedLCoplanar con un plano de masa de dimensiones 80x60mm con el monopolo desplazado al vértice del plano de masa y con orificios en el mismo.

```

close all;
% Define GroundPlane
rect1 = antenna.Rectangle('Length', 60e-3, 'Width', 80e-3);
p1 = getShapeVertices(rect1);

% Define Slots
slot1 = antenna.Rectangle('Length', 3e-3, 'Width', 4e-3, ...
    'Center', [15e-3, 38.5e-3]);
p2 = getShapeVertices(slot1);
slot2 = antenna.Rectangle('Length', 38e-3, 'Width', 3e-3, ...
    'Center', [-2.5e-3, 35e-3]);
p3 = getShapeVertices(slot2);
slot3 = antenna.Rectangle('Length', 3e-3, 'Width', 4e-3, ...
    'Center', [-20e-3, 31.5e-3]);
p4 = getShapeVertices(slot3);
slot4 = antenna.Rectangle('Length', 38e-3, 'Width', 3e-3, ...
    'Center', [-2.5e-3, 28e-3]);
p5 = getShapeVertices(slot4);
slot5 = antenna.Rectangle('Length', 42.5e-3, 'Width', 3e-3, ...
    'Center', [-0.75e-3, 21e-3]);
p6 = getShapeVertices(slot5);

% Define monopole
rect2 = antenna.Rectangle('Length', 53.726e-3, 'Width', 3.6848e-3,
    ...
    'Center', [2e-3, 67.664e-3]);
p7 = getShapeVertices(rect2);
rect3 = antenna.Rectangle('Length', 3.6848e-3, 'Width', 25.822e-3,
    ...
    'Center', [27e-3, 52.911e-3]);
p8 = getShapeVertices(rect3);

% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,p8};
ant.Operation = 'P1-P2-P3-P4-P5-P6+P7+P8';

% Define FeedPoint
ant.FeedLocation = [27e-3, 40e-3,0];
ant.FeedWidth = 3.5e-3;

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;

% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;

% show for invertedLcoplanar
figure;

```

```
show(ant)

% s11 for slotAntenna
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
rfplot(s)

% pattern for slotAntenna
figure;
pattern(ant, plotFrequency)

% current for slotAntenna
figure;
current(ant, plotFrequency)

% impedance for slotAntenna
figure;
impedance(ant, freqRange)

% elevation for slotAntenna
figure;
patternElevation(ant, plotFrequency)

% azimuth for slotAntenna
figure;
patternAzimuth(ant, plotFrequency)
```

11.5 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte superior

A continuación, se muestra el código creado de una antena tipo InvertedLCoplanar con un plano de masa de dimensiones 80x60mm con el monopolo desplazado al vértice del plano de masa y con un orificio en la parte superior del mismo.

```
close all;
% Define GroundPlane
rect1 = antenna.Rectangle('Length', 60e-3, 'Width', 80e-3);
p1 = getShapeVertices(rect1);

% Define Slot
slot1 = antenna.Rectangle('Length', 50e-3, 'Width', 4e-3, ...
    'Center', [5e-3, 28e-3]);
p2 = getShapeVertices(slot1);

% Define monopole
rect2 = antenna.Rectangle('Length', 53.726e-3, 'Width', 3.6848e-3,
    ...
    'Center', [2e-3, 67.664e-3]);
p3 = getShapeVertices(rect2);
rect3 = antenna.Rectangle('Length', 3.6848e-3, 'Width', 25.822e-3,
    ...
    'Center', [27e-3, 52.911e-3]);
p4 = getShapeVertices(rect3);

% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3,p4};
ant.Operation = 'P1-P2+P3+P4';

% Define FeedPoint
ant.FeedLocation = [27e-3, 40e-3,0];
ant.FeedWidth = 3.5e-3;

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;

% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;

% show for invertedLcoplanar
figure;
show(ant)

% s11 for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
rfplot(s)

% pattern for invertedLcoplanar
figure;
pattern(ant, plotFrequency)

% current for invertedLcoplanar
```

```
figure;  
current(ant, plotFrequency)  
  
% impedance for invertedLcoplanar  
figure;  
impedance(ant, freqRange)  
  
% elevation for invertedLcoplanar  
figure;  
patternElevation(ant, plotFrequency)  
  
% azimuth for invertedLcoplanar  
figure;  
patternAzimuth(ant, plotFrequency)
```

11.6 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte superior y con circuito de adaptación

A continuación, se muestra el código creado de una antena tipo InvertedLCoplanar con un plano de masa de dimensiones 80x60mm con el monopolo desplazado al vértice del plano de masa, con un orificio en la parte superior del mismo, mostrando la carta de Smith y generando circuitos de adaptación.

```
close all;
% Define GroundPlane
rect1 = antenna.Rectangle('Length', 60e-3, 'Width', 80e-3);
p1 = getShapeVertices(rect1);

% Define Slot
slot1 = antenna.Rectangle('Length', 50e-3, 'Width', 4e-3, ...
    'Center', [5e-3, 28e-3]);
p2 = getShapeVertices(slot1);

% Define monopole
rect2 = antenna.Rectangle('Length', 53.726e-3, 'Width', 3.6848e-3,
    ...
    'Center', [2e-3, 67.664e-3]);
p3 = getShapeVertices(rect2);
rect3 = antenna.Rectangle('Length', 3.6848e-3, 'Width', 25.822e-3,
    ...
    'Center', [27e-3, 52.911e-3]);
p4 = getShapeVertices(rect3);

% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3,p4};
ant.Operation = 'P1-P2+P3+P4';

% Define FeedPoint
ant.FeedLocation = [27e-3, 40e-3,0];
ant.FeedWidth = 3.5e-3;

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;

% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;

% show for invertedLcoplanar
figure;
show(ant)

% s11 for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
rfplot(s)

% pattern for invertedLcoplanar
figure;
pattern(ant, plotFrequency)

% current for invertedLcoplanar
```

```

figure;
current(ant, plotFrequency)

% impedance for invertedLcoplanar
figure;
impedance(ant, freqRange)

% elevation for invertedLcoplanar
figure;
patternElevation(ant, plotFrequency)

% azimuth for invertedLcoplanar
figure;
patternAzimuth(ant, plotFrequency)

% smithchart for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
smithplot(s)

% MatchingNetwork for invertedLcoplanar
mn = matchingnetwork('LoadImpedance',s,'CenterFrequency',900000000);
c = circuitDescriptions(mn);

% s11 for invertedLcoplanar after MatchingNetwork
figure;
rfplot(mn)

% Matching path for MatchingNetwork
figure;
smithplot(mn);

```

11.7 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte media y con circuito de adaptación

A continuación, se muestra el código creado de una antena tipo InvertedLCoplanar con un plano de masa de dimensiones 80x60mm con el monopolo desplazado al vértice del plano de masa, con un orificio en la parte media del mismo, mostrando la carta de Smith y generando circuitos de adaptación.

```
close all;
% Define GroundPlane
rect1 = antenna.Rectangle('Length', 60e-3, 'Width', 80e-3);
p1 = getShapeVertices(rect1);

% Define Slot
slot1 = antenna.Rectangle('Length', 50e-3, 'Width', 4e-3, ...
    'Center', [5e-3, 0e-3]);
p2 = getShapeVertices(slot1);

% Define monopole
rect2 = antenna.Rectangle('Length', 53.726e-3, 'Width', 3.6848e-3,
    ...
    'Center', [2e-3, 67.664e-3]);
p3 = getShapeVertices(rect2);
rect3 = antenna.Rectangle('Length', 3.6848e-3, 'Width', 25.822e-3,
    ...
    'Center', [27e-3, 52.911e-3]);
p4 = getShapeVertices(rect3);

% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3,p4};
ant.Operation = 'P1-P2+P3+P4';

% Define FeedPoint
ant.FeedLocation = [27e-3, 40e-3,0];
ant.FeedWidth = 3.5e-3;

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;

% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;

% show for invertedLcoplanar
figure;
show(ant)

% s11 for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
rfplot(s)

% pattern for invertedLcoplanar
figure;
pattern(ant, plotFrequency)

% current for invertedLcoplanar
```

```

figure;
current(ant, plotFrequency)

% impedance for invertedLcoplanar
figure;
impedance(ant, freqRange)

% elevation for invertedLcoplanar
figure;
patternElevation(ant, plotFrequency)

% azimuth for invertedLcoplanar
figure;
patternAzimuth(ant, plotFrequency)

% smithchart for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
smithplot(s)

% MatchingNetwork for invertedLcoplanar
mn = matchingnetwork('LoadImpedance',s,'CenterFrequency',900000000);
c = circuitDescriptions(mn);

% s11 for invertedLcoplanar after MatchingNetwork
figure;
rfplot(mn)

% Matching path for MatchingNetwork
figure;
smithplot(mn);

```

11.8 Código creado para una InvertedLCoplanar (80x60) con un orificio en la parte inferior y con circuito de adaptación

A continuación, se muestra el código creado de una antena tipo InvertedLCoplanar con un plano de masa de dimensiones 80x60mm con el monopolo desplazado al vértice del plano de masa, con un orificio en la parte inferior del mismo, mostrando la carta de Smith y generando circuitos de adaptación.

```
close all;
% Define GroundPlane
rect1 = antenna.Rectangle('Length', 60e-3, 'Width', 80e-3);
p1 = getShapeVertices(rect1);

% Define Slot
slot1 = antenna.Rectangle('Length', 50e-3, 'Width', 4e-3,          ...
    'Center', [5e-3, -28e-3]);
p2 = getShapeVertices(slot1);

% Define monopole
rect2 = antenna.Rectangle('Length', 53.726e-3, 'Width', 3.6848e-3,
    ...
    'Center', [2e-3, 67.664e-3]);
p3 = getShapeVertices(rect2);
rect3 = antenna.Rectangle('Length', 3.6848e-3, 'Width', 25.822e-3,
    ...
    'Center', [27e-3, 52.911e-3]);
p4 = getShapeVertices(rect3);

% Define Antenna
ant = customAntennaGeometry;
ant.Boundary = {p1,p2,p3,p4};
ant.Operation = 'P1-P2+P3+P4';

% Define FeedPoint
ant.FeedLocation = [27e-3, 40e-3,0];
ant.FeedWidth = 3.5e-3;

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;

% Define frequency range
freqRange = (700:5:1500) * 1e6;

% show for invertedLcoplanar
figure;
show(ant)

% s11 for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
rfplot(s)

% pattern for invertedLcoplanar
figure;
pattern(ant, plotFrequency)

% current for invertedLcoplanar
```

```

figure;
current(ant, plotFrequency)

% impedance for invertedLcoplanar
figure;
impedance(ant, freqRange)

% elevation for invertedLcoplanar
figure;
patternElevation(ant, plotFrequency)

% azimuth for invertedLcoplanar
figure;
patternAzimuth(ant, plotFrequency)

% smithchart for invertedLcoplanar
figure;
s = sparameters(ant, freqRange);
smithplot(s)

% MatchingNetwork for invertedLcoplanar
mn = matchingnetwork('LoadImpedance',s,'CenterFrequency',900000000);
c = circuitDescriptions(mn);

% s11 for invertedLcoplanar after MatchingNetwork
figure;
rfplot(mn)

% Matching path for MatchingNetwork
figure;
smithplot(mn);

```

11.9 Código exportado Image Processing Toolbox

A continuación, se muestra el código exportado de la App Image Processing Toolbox que contiene la máscara para la imagen monopoleloop.png utilizada en el capítulo 7.

```
function [BW,maskedImage] = segmentImage(RGB)
%segmentImage Segment image using auto-generated code from imageSegmenter app
% [BW,MASKEDIMAGE] = segmentImage(RGB) segments image RGB using
% auto-generated code from the imageSegmenter app. The final segmentation
% is returned in BW, and a masked image is returned in MASKEDIMAGE.

% Auto-generated by imageSegmenter app on 22-Nov-2020
%-----

% Convert RGB image into L*a*b* color space.
X = rgb2lab(RGB);

% Graph cut
foregroundInd = [12900 12910 13547 13810 13845 14417 15026 15330 16244 16856
17772 17773 18689 19606 20205 20816 20829 21135 21427 22345 22359 23875 24181
24807 25711 26336 27253 27547 27559 27865 28479 28771 29402 29689 29710 30301
30325 30636 30945 31219 31259 31571 31578 31831 31895 32001 32007 32012 32016
32020 32210 32297 32298 32332 32335 32341 32443 32530 32539 32542 32548 32558
32566 32588 32589 32596 32647 32652 32655 32656 32878 32887 32966 33055 33276
33278 33361 33586 33667 33668 33894 34200 34509 34816 35123 35431 35738 36351
37882 40026 41862 41965 41970 41974 41977 42168 42266 42285 42287 42597 42634
42638 42642 42647 42652 42873 42906 42932 42962 42963 43219 43231 43274 43392
43527 43531 43584 43585 43769 43786 43896 43899 43906 43910 43914 43919 43920
43924 43927 43931 43934 43937 44244 44394 44553 44697 44860 44993 45167 45308
45474 45534 45605 45780 45911 45920 46393 46522 46699 47451 47617 47745 47983
48969 48981 49208 49759 49886 50497 50511 50737 50803 50984 51290 51429 51721
51902 52333 52573 52653 52879 53126 53251 53571 54103 54795 54962 55087 55939
56019 56245 56311 56617 56923 57105 57535 57841 57854 58081 58759 58999 59305
59371 59383 59553 59689 60595 60835 60913 61389 62125 62443 62671 63361 63531
63961 64506 64585 65061 65503 65797 66341 67021 67033 67203 67645 67871 67939
68857 69094 69175 69651 70387 70624 70705 71181 71611 72235 72405 72529 72835
73072 73141 73753 73765 74242 74977 74989 75826 75907 76078 76132 76507 76519
77425 77437 78220 78343 78661 79193 79445 79751 79873 79886 80192 81281 81641
81709 82335 82865 83239 83730 83865 84036 84157 84783 85006 85381 86008 86178
86314 86484 86605 87232 87402 88066 88135 88763 88931 89359 89971 90154 90293
90583 90820 91071 91126 91377 91501 92294 92418 92435 92655 93212 93336 93352
94129 94254 94269 94739 94796 94866 95045 95186 95187 95656 95784 96266 96267
96396 96410 96572 96702 97008 97620 97634 97795 97855 97925 98101 98231 98407
98537 98713 99019 99149 99326 99761 99776 99938 99997 100067 100679 101307
102139 103143 103363 104281 104673 105591 105811 106117 106509 107427 107647
108345 109177 109263 109875 110095 111098 111929 112016 112541 112628 112934
113152 113548 114161 114373 114374 114468 115082 115389 115592 115697 115895
116312 116500 116622 116932 117100 117246 117274 117275 117286 117300 117315
117395 117557 117564 117571 117572 117671 117672 117680 117692 117938 117948
117959 117967 ];
backgroundInd = [2660 2666 2667 2675 2685 2693 2698 2705 2711 2942 2949 2957
3017 3230 3231 3240 3329 3642 3832 4263 4434 4435 4569 4613 4614 4616 4881
5038 5191 5192 5194 5196 5242 5503 5504 5564 5643 5941 6122 6190 6191 6201
6208 6428 6546 6830 6836 6842 7040 7652 7693 7697 7985 7986 7988 7991 7995
8288 8289 8290 8570 9182 10100 10712 11630 12242 12548 12853 13159 13465
13771 14383 14689 15301 15913 16219 16831 21163 22092 22109 22121 22191 22196
```

22203	22208	22212	22222	22225	22227	22232	22443	22451	22493	22544	22545	22645
22766	22794	22858	22862	22863	22951	23079	23080	23094	23173	23257	23391	23563
23790	23791	23794	23869	24175	24410	24411	24413	24481	24722	24787	25032	25034
25036	25037	25345	25399	25652	25705	25960	25961	26011	26268	26317	26575	26576
26882	27189	27495	28107	28413	28765	29332	29377	29683	30295	30556	30907	31213
31474	31519	31825	32131	32437	32743	33005	33049	33661	33967	34273	34536	35191
36066	36109	36721	37068	37072	37077	37081	37086	37090	37094	37098	37291	37362
37368	37369	37406	37500	37503	37508	37510	37511	37515	37518	37519	37521	37523
37524	37527	37639	37659	37660	37663	37715	37717	37720	37723	37726	37727	37730
37749	37752	37755	37759	37765	37768	37772	37776	37781	37784	37789	37793	37797
37801	37836	37838	38040	38043	38045	38048	38051	38146	38251	38453	38515	38761
39169	39375	39990	40046	40604	41525	41576	42750	43759	44065	44280	44371	44586
44677	44983	45249	45289	45901	46207	46473	46513	46819	47431	47647	47953	48043
48655	49267	49374	49375	49377	49378	49380	49383	49636	49640	49642	49645	49647
49650	49652	49654	49655	49656	49658	49661	49663	49665	49667	49669	49670	49672
49675	49677	49679	49689	49691	49696	49697	49699	49700	49702	49703	49704	49706
49708	49709	49711	49713	49714	49715	49716	49718	49719	49931	49934	49938	50027
50029	50095	50185	50229	50230	50232	50235	50335	50336	50530	50533	50643	50645
50758	50797	50827	50828	50830	50831	50833	50834	51133	51259	51260	51715	51745
51875	51982	52021	52051	52181	52488	52633	52663	52795	52849	53101	53275	53407
53551	53857	54018	54125	54193	54323	54469	54775	54805	55240	55296	55387	55602
55655	55961	56030	56156	56459	56764	56765	56948	57223	57374	57436	57491	57529
57742	57835	57867	57984	58289	58448	58714	58754	58785	58786	58900	58966	59020
59366	59938	59978	60010	60122	60284	60590	60734	60896	61108	61161	61202	61234
61508	61653	62120	62152	62385	62426	63038	63070	63184	63251	63344	63609	63956
63988	64568	64874	64905	65022	65139	65485	65635	65636	65638	65945	66006	66097
66129	66253	66255	66403	66563	66669	67015	67047	67175	67321	67482	67893	67933
67965	68239	68402	68545	68576	68882	69116	69157	69321	69494	69627	69678	69769
69984	70034	70381	70412	70687	70851	71024	71208	71258	71299	71911	71942	72075
72523	72687	72829	72993	73094	73166	73441	73747	74053	74217	74268	74359	74696
74930	74971	75236	75277	75889	75920	76052	76195	76460	76501	76716	77113	77419
77450	77581	77989	78031	78643	78804	78858	78949	79255	79561	79592	79825	79898
80027	80173	80479	80785	81091	81355	81612	81703	82009	82040	82474	82621	82885
83233	83570	83845	84182	84309	84365	84415	84457	84671	84763	84794	85375	85406
85532	85681	85682	86143	86294	86324	86557	86600	86752	87212	87518	87548	87667
87824	88130	88343	88436	88583	88649	88699	88742	88772	89048	89354	89500	89660
89690	89966	90534	90608	90884	91028	91190	91334	91402	91496	91527	91708	91802
91946	92108	92252	92414	92445	92676	93026	93332	93497	93638	93784	93803	93850
93944	93975	94206	94250	94413	94414	94512	94556	94587	94704	94862	95021	95168
95317	95321	95324	95473	95505	95779	95992	96085	96348	96391	96697	96729	97522
97572	97953	98184	98490	98566	98872	99356	99790	100020	100096	100402	100580	
101320	102162	102416	102544	103334	103640	103692	103768	104380	104686	105169		
105222	105910	106087	106522	106828	107004	107134	107310	107364	107440	107616		
108053	108228	108534	108666	108786	108788	108791	108793	108795	108798	108802		
108805	108808	108810	108812	108815	108818	108819	108820	108823	108826	108828		
108831	108834	108835	108838	108840	108841	108842	108973	108974	108976	108977		
108979	108981	108982	108984	109028	109030	109032	109033	109036	109037	109038		
109040	109042	109044	109080	109081	109083	109086	109089	109200	109291	109292		
109293	109295	109296	109298	109300	109301	109303	109305	109307	109310	109312		
109314	109315	109317	109318	109320	109322	109324	109327	109328	109329	109331		
109334	109352	109354	109356	109359	109361	109364	109365	109367	109369	109371		
109373	109376	109378	109379	109380	109381	109385	111037	111956	114098	114404		
115935	117159	118690	119608	121445	122975	123587	124811	125117	125729	126340		
126341	126646	126660	126661	126664	126665	126958	126961	126964	126973	126974		
126976	126977	126980	126982	127225	127229	127233	127237	127241	127244	127251		
127255	127259	127260	127288	127289	127291	127292	127293	127294	127320	127321		
127325	127350	127352	127354	127356	127359	127364	127366	127368	127370	127372		
127373	127378	127515	127518	127520	127524	127528	127600	127638	127656	127658		
127666	127667	127716	127719	127723	127726	127729	127731	127733	127734	127737		

```

127738 127741 127744 127749 127753 127756 127759 127762 127765 127768 127772
127775 127798 127800 127805 127808 127809 127811 127814 127817 127906 127980
127984 127987 127989 127992 127994 127995 127996 128002 128005 128012 128015
128018 128020 128085 128087 128091 128092 128096 128101 128256 128260 128304
128305 128570 128610 128611 ];
L = superpixels(X,1388,'IsInputLab',true);

% Convert L*a*b* range to [0 1]
scaledX = prepLab(X);
BW = lazysnapping(scaledX,L,foregroundInd,backgroundInd);

% Active contour
iterations = 100;
BW = activecontour(X, BW, iterations, 'Chan-Vese');

% Create masked image.
maskedImage = RGB;
maskedImage(repmat(~BW,[1 1 3])) = 0;
end

function out = prepLab(in)

% Convert L*a*b* image to range [0,1]
out = in;
out(:,:,1) = in(:,:,1) / 100; % L range is [0 100].
out(:,:,2) = (in(:,:,2) + 86.1827) / 184.4170; % a* range is [-
86.1827,98.2343].
out(:,:,3) = (in(:,:,3) + 107.8602) / 202.3382; % b* range is [-
107.8602,94.4780].

end

```

11.10 Código generado para la simulación de una antena obtenida a partir de una imagen

A continuación, se muestra el código creado para la simulación de una antena cuya geometría ha sido generada a partir de una imagen

```
close all;

% Read original Image
I = imread('monopoleloop.PNG');

% Apply exported mask and display the result
Bwf = monopoleloop(I);
figure
imshow(Bwf)

% Scale per pixel based on tag dimensions
B = bwboundaries(Bwf);
xmax = max(B{1}(:,1));
xmin = min(B{1}(:,1));
ymax = max(B{1}(:,2));
ymin = min(B{1}(:,2));
L = 35e-3;
W = 35e-3;
LperColpixel = L/(xmax-xmin);
WperRowpixel = W/(ymax-ymin);
Bp = B;
for i = 1:length(Bp)
    Bp{i} = [Bp{i}(:,1).*LperColpixel Bp{i}(:,2).*WperRowpixel
zeros(size(Bp{i},1),1)];
end
p = cell2mat(Bp);
x = p(:,1);
y = p(:,2);
figure
plot(x,y, '*')
grid on
axis equal
xlabel('x (m)')
ylabel('y (m)')
title('Boundary points')

% Reduce the number of points by a factor of 32
D = 32;
xD = x(1:D:end);
yD = y(1:D:end);
BpD{1} = Bp{1}(1:D:end,:);
figure
hold on
plot(xD,yD, 'r*')
shg
grid on
axis equal

% Define GroundPlane
gp1 = antenna.Rectangle('Length', 45e-3, 'Width', 35e-3, ...
                        'Center', [57.5e-3 20.5e-3]);
```

```

p1 = getShapeVertices(gp1);

% Define Feeding rectangle
sf1 = antenna.Rectangle('Length', 3e-3, 'Width', 3e-3, ...
                        'Center', [31e-3 11.5e-3]);
p2 = getShapeVertices(sf1);

% Define Antenna
c = customAntennaGeometry;
c.Boundary = [BpD(1) {p1,p2}];
c.Operation = 'P1+P2+P3';

% Define Feeding Point
c.FeedLocation = [31e-3 11.5e-3 0];
c.FeedWidth = 1e-3;
figure
show(c)

% Define frequency
plotFrequency = 900000000;
% Define frequency range
freqRange = (700:5:3000) * 1e6;
% s11
figure;
s = sparameters(c, freqRange);
rfplot(s)
% pattern
figure;
pattern(c, plotFrequency)
% current
figure;
current(c, plotFrequency)
% impedance
figure;
impedance(c, freqRange)
% elevation
figure;
patternElevation(c, plotFrequency)
% azimuth
figure;
patternAzimuth(c, plotFrequency)
% smithchart
figure;
s = sparameters(c, freqRange);
smithplot(s)

```