

Diseño y simulación de antenas y redes de adaptación en MATLAB

David Melgar Sanz

Máster de Ingeniería de Telecomunicación (plan 2017)

Tecnologías de antenas

Directores: Dr. Jaume Anguera Pros y Dra. Aurora Andújar Linares

Junio 2022



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>Diseño y simulación de antenas y redes de adaptación en MATLAB</i>
Nombre del autor:	<i>David Melgar Sanz</i>
Nombre del consultor/a:	<i>Dr. Jaume Anguera Pros Dra. Aurora Andújar Linares</i>
Nombre del PRA:	<i>Germán Cobo Rodríguez</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	06/2022
Titulación:	<i>Máster de Ingeniería de Telecomunicación (plan 2017)</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Tecnologías de antenas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español</i>
Palabras clave	<i>Antena, Matlab</i>
<p>Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): <i>Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.</i></p>	
<p>En este trabajo de Final de Máster se pretende descubrir el potencial que ofrece Matlab como herramienta de diseño y simulación de las antenas que ofrece en su librería y de redes de adaptación.</p> <p>Para ello, se ha diseñado y simulado dos antenas incluidas en la librería de Matlab, la InvertedLcoplanar y la InvertedFcoplanar. Además, se han modificado algunos parámetros de las antenas para ver cómo afecta a su comportamiento, en concreto, como afecta al ancho de banda.</p> <p>Y, después de optimizar las dos antenas, se ha hecho uso de la aplicación Matching Network Designer para diseñar redes de adaptación para mejorar el ancho de banda de las antenas anteriores.</p> <p>Como conclusión principal es que Matlab ofrece un gran abanico de posibilidades y tiene un potencial muy grande de cara este tipo de simulaciones, ya que además es un software que se usa en ámbitos académicos por lo que cualquier usuario tiene acceso a él, y no requiere de una gran complejidad de uso. Además, hemos visto que mediante el uso de redes de adaptación se puede mejorar el ancho de banda de las antenas diseñadas.</p>	

Abstract (in English, 250 words or less):

In this Master's Final Project, we intend to discover the potential that Matlab offers as a design and simulation tool for the antennas that it offers in its library and for adaptation networks.

To do this, two antennas included in the Matlab library, the InvertedLcoplanar and the InvertedFcoplanar, have been designed and simulated. In addition, some parameters of the antennas have been modified to see how it affects their behavior, specifically, how it affects bandwidth.

And, after optimizing the two antennas, the Matching Network Designer application has been used to design matching networks to improve the bandwidth of the previous antennas.

The main conclusion is that Matlab offers a wide range of possibilities and has great potential for this type of simulation, since it is also a software that is used in academic settings, so any user has access to it, and does not require highly complex to use. In addition, we have seen that through the use of adaptation networks, the bandwidth of the designed antennas can be improved.



Índice

1. Introducción.....	12
1.1 Contexto y justificación del Trabajo.....	12
1.2 Objetivos del Trabajo.....	12
1.3 Enfoque y método seguido.....	13
1.4 Planificación del Trabajo.....	13
1.5 Breve resumen de productos obtenidos.....	15
1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria.....	15
2. Fundamentos teóricos.....	17
2.1 Definición de antena.....	17
2.2 Impedancia de entrada.....	17
2.3 Coeficiente de reflexión.....	19
2.4 Relación de onda estacionaria.....	20
2.5 Ancho de banda.....	20
2.6 Diagrama de radiación.....	21
3. Diseño y simulación de antena del tipo InvertedLCoplanar a 900 MHz.....	22
4. Mejora del ancho de banda mediante variación de dimensión de la antena.....	27
4.1 Ancho de plano de masa fijo a 25 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	28
4.2 Ancho de plano de masa fijo a 50 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	29
4.3 Ancho de plano de masa fijo a 75 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	31
4.4 Ancho de plano de masa fijo a 100 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	32
4.5 Ancho de plano de masa fijo a 150 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	34
4.6 Ancho de plano de masa fijo a 200 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	35
4.7 Ancho de plano de masa fijo a 250 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	37
4.8 Ancho de plano de masa fijo a 300 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	38
4.9 Maximización del ancho de banda relativo.....	40
5. Diseño y simulación de antena del tipo InvertedFCoplanar a 900 MHz.....	43
6. Mejora del ancho de banda mediante variación de dimensión de la antena.....	47
6.1 Ancho de plano de masa fijo a 25 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	48
6.2 Ancho de plano de masa fijo a 50 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	49
6.3 Ancho de plano de masa fijo a 75 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	50
6.4 Ancho de plano de masa fijo a 100 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	51
6.5 Ancho de plano de masa fijo a 150 milímetros y longitud de plano de masa variable.....	52

6.6 Ancho de plano de masa fijo a 200 milímetros y longitud de plano de masa variable	53
6.7 Ancho de plano de masa fijo a 250 milímetros y longitud de plano de masa variable	54
6.8 Ancho de plano de masa fijo a 300 milímetros y longitud de plano de masa variable	55
6.9 Maximización del ancho de banda relativo	56
7. Redes de adaptación	61
7.2 Diseño de red de adaptación para las antenas optimizadas	64
8. Conclusiones	68
9. Bibliografía	69

Lista de figuras

Ilustración 1. Diagrama de Gantt del Trabajo Final de Máster	14
Ilustración 2. Carta de Smith	19
Ilustración 3. InvertedLCoplanar diseñada a 900 MHz en Antenna Designer	23
Ilustración 4. Parámetros S11 de la antena simulada a 900 MHz	23
Ilustración 5. Impedancia de la antena simulada a 900 MHz	24
Ilustración 6. Diagrama de radiación de la antena simulada a 900 MHz	24
Ilustración 7. Diagrama de elevación de la antena simulada a 900 MHz	25
Ilustración 8. Diagrama de azimut de la antena simulada a 900 MHz	25
Ilustración 9. Distribución de corriente de la antena simulada a 900 MHz	26
Ilustración 10. InvertedLcoplanar	27
Ilustración 11. Parámetros S11 de antena 25x25	28
Ilustración 12. Parámetros S11 de antena 25x50	28
Ilustración 13. Parámetros S11 de antena 25x75	28
Ilustración 14. Parámetros S11 de antena 25x100	28
Ilustración 15. Parámetros S11 de antena 25x150	28
Ilustración 16. Parámetros S11 de antena 25x200	28
Ilustración 17. Parámetros S11 de antena 25x250	28
Ilustración 18. Parámetros S11 de antena 25x300	28
Ilustración 19. Parámetros S11 de antena 50x25	29
Ilustración 20. Parámetros S11 de antena 50x50	29
Ilustración 21. Parámetros S11 de antena 50x75	29
Ilustración 22. Parámetros S11 de antena 50x100	29
Ilustración 23. Parámetros S11 de antena 50x150	30
Ilustración 24. Parámetros S11 de antena 50x200	30
Ilustración 25. Parámetros S11 de antena 50x250	30
Ilustración 26. Parámetros S11 de antena 50x300	30
Ilustración 27. Parámetros S11 de antena 75x25	31
Ilustración 28. Parámetros S11 de antena 75x50	31
Ilustración 29. Parámetros S11 de antena 75x75	31
Ilustración 30. Parámetros S11 de antena 75x100	31
Ilustración 31. Parámetros S11 de antena 75x150	31
Ilustración 32. Parámetros S11 de antena 75x200	31
Ilustración 33. Parámetros S11 de antena 75x250	31
Ilustración 34. Parámetros S11 de antena 75x300	31
Ilustración 35. Parámetros S11 de antena 100x25	32
Ilustración 36. Parámetros S11 de antena 100x50	32
Ilustración 37. Parámetros S11 de antena 100x75	32
Ilustración 38. Parámetros S11 de antena 100x100	32
Ilustración 39. Parámetros S11 de antena 100x150	33
Ilustración 40. Parámetros S11 de antena 100x200	33
Ilustración 41. Parámetros S11 de antena 100x250	33
Ilustración 42. Parámetros S11 de antena 100x300	33
Ilustración 43. Parámetros S11 de antena 150x25	34
Ilustración 44. Parámetros S11 de antena 150x50	34
Ilustración 45. Parámetros S11 de antena 150x75	34
Ilustración 46. Parámetros S11 de antena 150x100	34

Ilustración 47. Parámetros S ₁₁ de antena 150x150	34
Ilustración 48. Parámetros S ₁₁ de antena 150x200	34
Ilustración 49. Parámetros S ₁₁ de antena 150x250	34
Ilustración 50. Parámetros S ₁₁ de antena 150x300	34
Ilustración 51. Parámetros S ₁₁ de antena 200x25	35
Ilustración 52. Parámetros S ₁₁ de antena 200x50	35
Ilustración 53. Parámetros S ₁₁ de antena 200x75	35
Ilustración 54. Parámetros S ₁₁ de antena 200x100	35
Ilustración 55. Parámetros S ₁₁ de antena 200x150	36
Ilustración 56. Parámetros S ₁₁ de antena 200x200	36
Ilustración 57. Parámetros S ₁₁ de antena 200x250	36
Ilustración 58. Parámetros S ₁₁ de antena 200x300	36
Ilustración 59. Parámetros S ₁₁ de antena 250x25	37
Ilustración 60. Parámetros S ₁₁ de antena 250x50	37
Ilustración 61. Parámetros S ₁₁ de antena 250x75	37
Ilustración 62. Parámetros S ₁₁ de antena 250x100	37
Ilustración 63. Parámetros S ₁₁ de antena 250x150	37
Ilustración 64. Parámetros S ₁₁ de antena 250x200	37
Ilustración 65. Parámetros S ₁₁ de antena 250x250	37
Ilustración 66. Parámetros S ₁₁ de antena 250x300	37
Ilustración 67. Parámetros S ₁₁ de antena 300x25	38
Ilustración 68. Parámetros S ₁₁ de antena 300x50	38
Ilustración 69. Parámetros S ₁₁ de antena 300x75	38
Ilustración 70. Parámetros S ₁₁ de antena 300x100	38
Ilustración 71. Parámetros S ₁₁ de antena 300x150	39
Ilustración 72. Parámetros S ₁₁ de antena 300x200	39
Ilustración 73. Parámetros S ₁₁ de antena 300x250	39
Ilustración 74. Parámetros S ₁₁ de antena 300x300	39
Ilustración 75. Distribución del ancho de banda relativo	40
Ilustración 76. Ancho de banda relativo en función de la longitud y ancho del plano de masa	41
Ilustración 77. Parámetros S ₁₁ de antena 110x55	42
Ilustración 78. InvertedFCoplanar diseñada a 900 MHz en Antenna Designer	43
Ilustración 79. Parámetros S ₁₁ de la antena centrada a 900 MHz	44
Ilustración 80. Impedancia de la antena simulada	44
Ilustración 81. Diagrama de radiación de la antena simulada a 900 MHz	45
Ilustración 82. Diagrama de elevación de la antena simulada a 900 MHz	45
Ilustración 83. Diagrama de azimut de la antena simulada a 900 MHz	46
Ilustración 84. Distribución de corriente de la antena simulada a 900 MHz	46
Ilustración 85. Esquema de InvertedFCoplanar	47
Ilustración 86. Parámetros S ₁₁ de antenas de W = 25 mm, L variable y H = 1 mm	48
Ilustración 87. Parámetros S ₁₁ de antenas de W = 25 mm, L variable y H = 10 mm	48
Ilustración 88. Parámetros S ₁₁ de antenas de W = 50 mm, L variable y H = 1 mm	49
Ilustración 89. Parámetros S ₁₁ de antenas de W = 50 mm, L variable y H = 10 mm	49
Ilustración 90. Parámetros S ₁₁ de antenas de W = 75 mm, L variable y H = 1 mm	50

Ilustración 91. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 75$ mm, L variable y $H = 10$ mm	50
Ilustración 92. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 100$ mm, L variable y $H = 1$ mm	51
Ilustración 93. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 100$ mm, L variable y $H = 10$ mm	51
Ilustración 94. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 150$ mm, L variable y $H = 1$ mm	52
Ilustración 95. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 150$ mm, L variable y $H = 10$ mm	52
Ilustración 96. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 200$ mm, L variable y $H = 1$ mm	53
Ilustración 97. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 200$ mm, L variable y $H = 10$ mm	53
Ilustración 98. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 250$ mm, L variable y $H = 1$ mm	54
Ilustración 99. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 250$ mm, L variable y $H = 10$ mm	54
Ilustración 100. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 300$ mm, L variable y $H = 1$ mm	55
Ilustración 101. Parámetros S_{11} de antenas de $W = 300$ mm, L variable y $H = 10$ mm	55
Ilustración 102. Distribución del ancho de banda relativo	56
Ilustración 103. Ancho de banda relativo en función de la longitud y ancho del plano de masa	57
Ilustración 104. Distribución del ancho de banda relativo	59
Ilustración 105. Ancho de banda relativo en función de la longitud y ancho del plano de masa	59
Ilustración 106. Parámetros S_{11} de antena 110×55	60
Ilustración 107. Inicio de proyecto en Matching Network Designer	62
Ilustración 108. Red de adaptación de tipo Pi con $Q = 50$	63
Ilustración 109. Red de adaptación de tipo Pi con $Q = 1$	64
Ilustración 110. Parámetros S_{11} de antena optimizada y con red de adaptación	65
Ilustración 111. Carta de Smith con antena optimizada y con red de adaptación	65
Ilustración 112. Detalles de los componentes de la red de adaptación	66
Ilustración 113. Parámetros S_{11} de antena optimizada y con red de adaptación	66
Ilustración 114. Carta de Smith con antena optimizada y con red de adaptación	67
Ilustración 115. Detalles de los componentes de la red de adaptación	67

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

La temática de este Trabajo de Final de Máster surge ya que se quiere ver el potencial que ofrece Matlab, de cara a diseñar y simular diferentes tipos de antenas y redes de adaptación.

En la actualidad, se necesitan herramientas para simular y caracterizar antenas. Como bien se sabe, hay softwares específicos que están destinados solamente a realizar potentes simulaciones, pero el coste de estos programas es muy elevado, al igual que el uso de estos programas son muy complejos.

Por lo que el objetivo principal es utilizar el software Matlab, que es un sistema especializado en el cálculo numérico el cual ofrece un entorno de desarrollo integrado, además de contar con un lenguaje de programación propio, como es el lenguaje M.

Como cabe destacar, esta herramienta es mundialmente usada en entornos académicos, ya que este software es compatible con la gran parte de equipos y sistemas operativos, además de que no necesita tantos recursos como los softwares especializados en simulaciones complejas.

Matlab permite hacer simulaciones simples y rápidas de antenas en dos dimensiones.

1.2 Objetivos del Trabajo

Los objetivos específicos de este Trabajo Fin de Máster son los siguientes:

- Utilizar la aplicación “Antenna Designer” de Matlab, para simular diferentes tipos de antenas y encontrar las dimensiones óptimas.
- Diseñar y optimizar el tamaño de antenas para maximizar el ancho de banda. Se modificará el código de las antenas del tipo InvertedLcoplanar y, posteriormente, se simularán para obtener sus parámetros.
- Utilizar la aplicación “Matching Network Designer” de Matlab para diseñar, visualizar y comparar las posibles redes de adaptación para las antenas diseñadas y simuladas.
- Comparar los anchos de bandas de las antenas simuladas con y sin red de adaptación.
- Comparación de ancho de banda entre InvertedLcoplanar e InvertedFcoplanar.

1.3 Enfoque y método seguido

Para encarar este trabajo, en primer lugar, se ha simulado las antenas incluidas en la librería de la aplicación “Antenna Designer” para familiarizarnos con este entorno.

Al explorar a fondo esta aplicación y ver el potencial que ofrece, se ha seguido un sistema metódico para ir simulando y variando las dimensiones de las antenas, para encontrar sus parámetros. Entre sus parámetros, el más importante es el S11.

Al ver que si se modificaba las dimensiones de las antenas éstas no estaban bien adaptadas, se ha utilizado la aplicación “Matching Network Designer” para adaptarlas a la frecuencia correspondiente.

A partir de todas las simulaciones y las gráficas obtenidas, se han calculado los anchos de banda relativo y se ha estudiado como varía según cada antena.

1.4 Planificación del Trabajo

Durante este periodo de tiempo que se ha realizado el Trabajo Fin de Máster, se han realizado diversas reuniones con el fin de enfocar bien el trabajo hacia los objetivos establecidos y seguir una metodología correcta.

En la Tabla 1 se indican las tareas y las fechas que se han seguido.

Nombre de la tarea	Fecha de inicio	Fecha final	Duración
TRABAJO FINAL DE MÁSTER	17/02/2022	10/06/2022	113
ESPECIFICACIÓN DEL PROYECTO	17/02/2022	25/02/2022	8
Planteamiento de propuestas	17/02/2022	22/02/2022	5
Elección de propuesta	23/02/2022	25/02/2022	2
DOCUMENTACIÓN	26/02/2022	31/03/2022	33
<i>Doc. Teoría de Antenas</i>	26/02/2022	19/03/2022	21
<i>Doc. MATLAB y uso de MATLAB</i>	20/03/2022	31/03/2022	11
PRIMER DISEÑO	01/04/2022	10/04/2022	9
Diseño y simulación (antena coplanar L)	01/04/2022	10/04/2022	9
Redacción	05/04/2022	10/04/2022	5
SEGUNDO DISEÑO	11/04/2022	25/04/2022	14
Diseño y simulación (optimización tamaño)	11/04/2022	25/04/2022	14
Redacción	15/04/2022	25/04/2022	10
TERCER DISEÑO	26/04/2022	17/05/2022	21
Diseño y simulación (con redes de adaptación)	26/04/2022	17/05/2022	21
Redacción	01/05/2022	17/05/2022	16
CUARTO DISEÑO	18/05/2022	29/05/2022	11
Diseño y simulación (antena coplanar F)	18/05/2022	29/05/2022	11
Redacción	24/05/2022	29/05/2022	5
REDACCIÓN FINAL	30/05/2022	09/06/2022	10
<i>Acabar de redactar</i>	30/05/2022	04/06/2022	5
Maquetación TFM	30/05/2022	04/06/2022	5
Presentación PowerPoint	05/06/2022	09/06/2022	4
ENTREGA DOCUMENTO FINAL	10/06/2022	10/06/2022	1

Tabla 1. Planificación del Trabajo Final de Máster

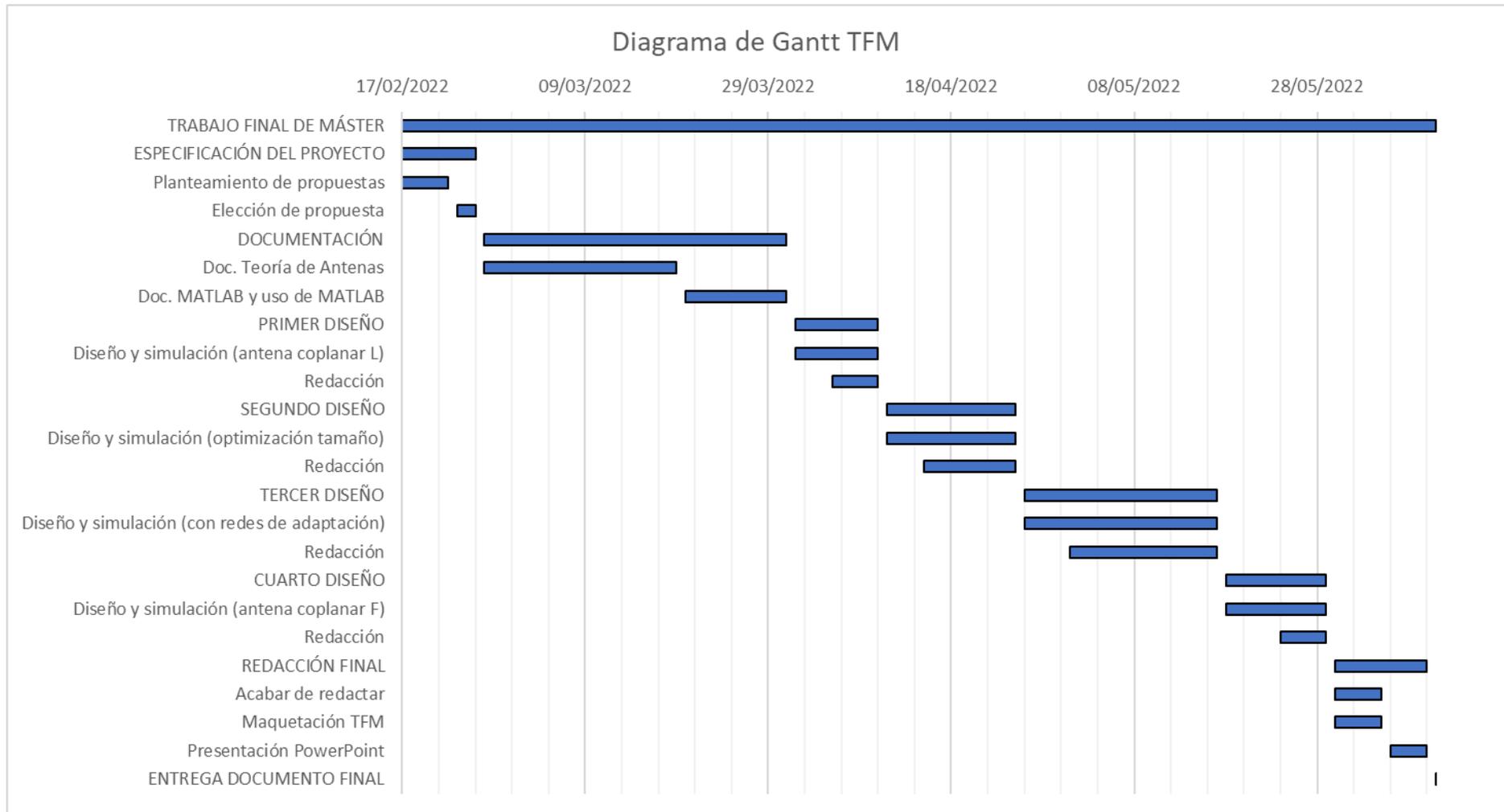


Ilustración 1. Diagrama de Gantt del Trabajo Final de Máster

1.5 Breve resumen de productos obtenidos

Como se ha comentado, este tipo de proyecto consiste en las simulaciones de los diseños obtenidos, por lo que los resultados que se obtienen son análisis, diseños y conclusiones.

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

Los capítulos del presente Trabajo de Final de Máster son:

- **Capítulo 1: Introducción.**
En este capítulo se hace una breve introducción, presentando el tema del Trabajo Final de Máster, se exponen los objetivos del actual proyecto y se presenta un diagrama de Gantt con todos los hitos del proyecto y los plazos de ejecución.
- **Capítulo 2: Fundamentos teóricos.**
En este capítulo se realiza un pequeño resumen de la Teoría de Antenas, donde se introducen los principales parámetros que caracterizan las antenas.
- **Capítulo 3: Diseño y simulación de antena del tipo InvertedLcoplanar a 900 MHz.**
En este capítulo se introduce la aplicación de Matlab de "Antenna Designer". Este capítulo sirve para familiarizarse con esta aplicación y ser una guía de cara a futuros estudiantes u otras personas interesadas en una aplicación para diseñar y simular antenas de manera sencilla. Para ello, se explica cómo se diseña y se simula el tipo de antena InvertedLcoplanar y se muestra las gráficas obtenidas.
- **Capítulo 4: Mejora del ancho de banda mediante variación de dimensión de la antena.**
En este capítulo se estudia el comportamiento del ancho de banda relativo de la antena simulada en el apartado anteriormente si se varía el ancho de plano de masa y la longitud de plano de masa.
- **Capítulo 5: Diseño y simulación de antena del tipo InvertedFcoplanar a 900 MHz.**
Este capítulo es similar al capítulo 3, pero esta vez se diseña y se simula una antena InvertedFcoplanar.
- **Capítulo 6: Mejora del ancho de banda mediante variación de dimensión de la antena.**
Este capítulo es similar al capítulo 4, pero esta vez se estudia el comportamiento del ancho de banda relativo de la antena simulada en el apartado anteriormente si se varía el ancho de plano de masa, la longitud de plano de masa y la altura de la antena desde el plano de masa.

- Capítulo 7: Redes de adaptación.
En este capítulo se trata de mejorar el ancho de banda de las mejores antenas obtenidas en los apartados anteriores mediante el uso de redes de adaptación. Para ello, se usa la aplicación de Matlab “Matching Network Designer”.
- Capítulo 8: Conclusiones.
En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas tras realizar este Trabajo Final de Máster.
- Capítulo 9: Bibliografía.
En este capítulo se incluyen los recursos consultados para la elaboración de este Trabajo Final de Máster.

2. Fundamentos teóricos

2.1 Definición de antena

Según define el IEEE (Institute of Electrical Engineers), una antena es aquella parte de un sistema de transmisión o recepción diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas.

Por este motivo, se dice que una antena es un componente imprescindible que forma parte de un sistema transmisor o receptor cuya finalidad es adaptar las ondas guiadas, que se transmiten por conductores o guías, a ondas que se propagan en el espacio libre.

Además, las antenas son componentes pasivos, es decir, no son capaces de añadir potencia a la señal, solamente son capaces de dirigir la señal hacia un área en particular.

La Teoría de las antenas nace de los desarrollos teóricos formulados por James Clerk Maxwell en 1873, los cuáles fueron corroborados por Heinrich Hertz en 1887.

Las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las corrientes y cargas que los crean.

El teorema de reciprocidad de Lorentz, que se puede demostrar a partir de las ecuaciones de Maxwell, afirma que los parámetros que caracterizan a una antena son idénticos en emisión como en la recepción. Por lo que los conceptos que se explican a continuación son válidos tanto para emisor como receptor.

Cabe destacar que las ondas electromagnéticas se caracterizan por:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde

- λ es la longitud de onda
- f es la frecuencia
- c es la velocidad de propagación de la luz.

2.2 Impedancia de entrada

Una antena es un dispositivo de un puerto y, como todos los dispositivos de un puerto, presenta una impedancia de entrada. Esta impedancia de entrada se define por la tensión y la corriente que existe en este punto.

$$Z_A = \frac{V_{in}}{I_{in}}$$

La impedancia de entrada tiene una parte real y una parte imaginaria, las cuales dependen de la frecuencia:

$$Z_A = R(\omega) + jX(\omega)$$

La ecuación anterior también se puede representar:

$$Z_A = R_r(\omega) + R_L(\omega) + jX_A(\omega)$$

Donde

- R_r es la resistencia de radiación. Esta resistencia que disiparía la misma potencia que la radiada por la antena.
- R_L es la resistencia de carga o de pérdidas. Esta resistencia representa las pérdidas que se producen en la antena, ya sea por el conductor o el dieléctrico.
- X_A permite modelar la potencia reactiva de la antena debida al desacoplo de impedancias entre la fuente y la antena.

La potencia radiada por la resistencia de radiación es:

$$P_r = \frac{1}{2} I^2 R_r$$

La potencia que radia la resistencia de carga o pérdidas es:

$$P_\Omega = \frac{1}{2} I^2 R_\Omega$$

Por lo tanto, la potencia entregada a la antena será la suma de las dos potencias anteriores:

$$P_A = P_r + P_\Omega = \frac{1}{2} I^2 (R_r + R_\Omega)$$

Para que una antena pueda transmitir toda la potencia recibida por el generador, tiene que estar adaptada, ya que de esta manera la potencia que procede del generador no se refleja.

Para que se cumpla esta condición, la impedancia de la antena tiene que ser la compleja conjugada de la impedancia de salida de la fuente.

$$X_A = -X_g$$

$$R_r + R_L = R_g$$

2.3 Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión (ρ) es la relación entre la amplitud de la onda reflejada y la amplitud de la onda incidente. Este parámetro mide la adaptación entre la impedancia de la línea de transmisión, que normalmente suele ser 50Ω , y la impedancia de la antena.

Este parámetro se expresa:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Donde Z_L es la impedancia de antena y Z_0 la impedancia de referencia.

En el caso de que la adaptación sea perfecta, es decir, cuando la potencia transmitida por el generador es igual a la potencia radiada por la antena, el coeficiente de reflexión 0.

Una herramienta muy utilizada para representar la impedancia compleja de una antena es la Carta de Smith.

A continuación, se indican los puntos clave de la carta de Smith:

- En el centro de la carta de Smith se representa la impedancia de referencia, también conocida como impedancia del generador. Este es el punto en el que existe una adaptación perfecta, ya que la ROE=1.
- En la izquierda se encuentra el cortocircuito, es decir, punto donde la resistencia es 0.
- En la derecha se encuentra el circuito abierto, es decir, punto donde la resistencia es infinita.

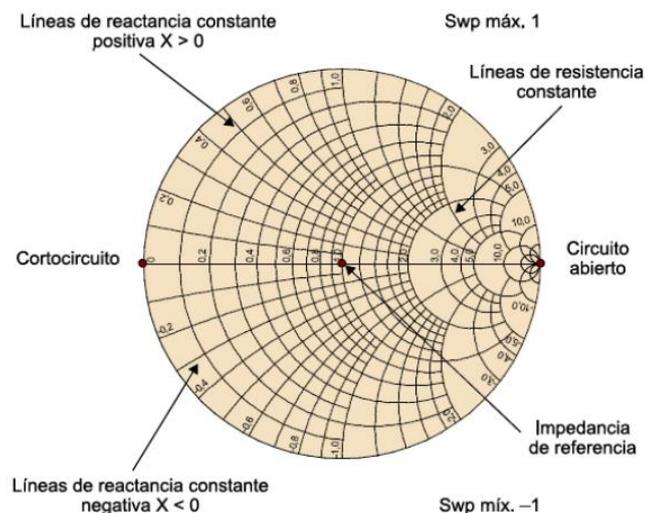


Ilustración 2. Carta de Smith

2.4 Relación de onda estacionaria

ROE es el parámetro que mide la relación de onda estacionaria, el cual se utiliza para medir la desadaptación de impedancias entre la antena y la fuente.

La expresión que relaciona la ROE y el S_{11} es:

$$ROE = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

En el caso de que la adaptación sea perfecta, es decir, cuando la potencia transmitida por el generador es igual a la potencia radiada por la antena, la ROE vale 1. Cuando la ROE es mayor de 1, no está perfectamente adaptada. Se suele decir que cuando la ROE es inferior a 3 puede considerarse que la antena está bien adaptada. Cuando la ROE es mayor de 3, se suele considerar que la antena no está adaptada.

2.5 Ancho de banda

El ancho de banda de una antena se define como el margen frecuencial en el que el coeficiente de reflexión de la antena es igual o inferior a un cierto valor de referencia. En este Trabajo Final de Máster se va a establecer que este valor sea -6 dB.

El ancho de banda se define en tanto por ciento como:

$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100$$

Donde f_2 y f_1 son las frecuencias donde la ROE vale un determinado valor y donde f_0 es la frecuencia central de la banda.

Generalmente se expresa el ancho de banda con la fórmula anterior, pero también hay otras fórmulas que relacionan el ancho de banda con el factor de calidad de una antena (Q). La expresión que relaciona ambos parámetros es:

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{1}{Q}$$

Donde Q mide las pérdidas de la antena que suelen provenir de la radiación, de la conducción y del propio dieléctrico. En general, Q está relacionado con el grosor del material dieléctrico y con la permitividad de este. Por ello, como se verá más adelante, cuando se desea tener un ancho de banda más grande se requiere un factor de calidad pequeño.

2.6 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación que caracterizan la antena en función de las diferentes direcciones del espacio a una distancia fija.

Con la antena situada en el origen de coordenadas y manteniendo la distancia constante, el patrón que se obtiene representa la distribución de la propiedad correspondiente en función de las variables angulares θ y ϕ . Las magnitudes más habituales para la representación del diagrama de radiación son la densidad de radiación y la intensidad de radiación.

Esta representación gráfica puede hacerse en 3D, aunque habitualmente también se representa en forma de cortes bidimensionales de los planos E (elevación) y H (azimut), definidos por la dirección de máxima radiación, y por los vectores campo eléctrico y campo magnético.

3. Diseño y simulación de antena del tipo InvertedLcoplanar a 900 MHz

En este apartado se usa la aplicación Antenna Designer de Matlab. El objetivo principal de este capítulo es poder seguir un sistema metódico para crear una antena tipo InvertedLcoplanar mediante esta aplicación.

Esta herramienta permite diseñar, visualizar y analizar antenas incluidas en la biblioteca de Antenna Toolbox de manera interactiva.

La aplicación mencionada permite crear todo tipo de antenas ya definidas en su librería. En este caso, se hace hincapié en la antena del tipo InvertedLcoplanar.

En primer lugar, se crea la antena comentada, con las siguientes características:

Antena InvertedLcoplanar	
Radiación	Toda
Polarización	Toda
Ancho de banda	Todo
Frecuencia de diseño	900 MHz

De las características anteriores solo vamos a tener en cuenta la frecuencia. La elección de la frecuencia es debido a que esa frecuencia corresponde a la banda de frecuencias de comunicaciones móviles GSM-900.

En primer lugar, se crea un nuevo diseño, donde se especifica los siguientes parámetros:

- Frecuencia de diseño
- Tipo de antena
- Estructura de respaldo
- Radiación
- Polarización
- Ancho de banda

En este caso, se hace incapie en el tipo de antena y la frecuencia de diseño. Las características del primer diseño son:

PRIMER DISEÑO	
Frecuencia de diseño	900 MHz
Tipo de antena	InvertedLcoplanar
Estructura de respaldo	Ninguna
Radiación	Toda
Polarización	Toda
Ancho de banda	Todo

Una vez creado el diseño, se obtiene la Ilustración 3. A la derecha de la imagen se representa la antena diseñada para la frecuencia seleccionada, en este caso 900 MHz y, a la izquierda de la imagen, se indica todas las medidas de la antena diseñada.

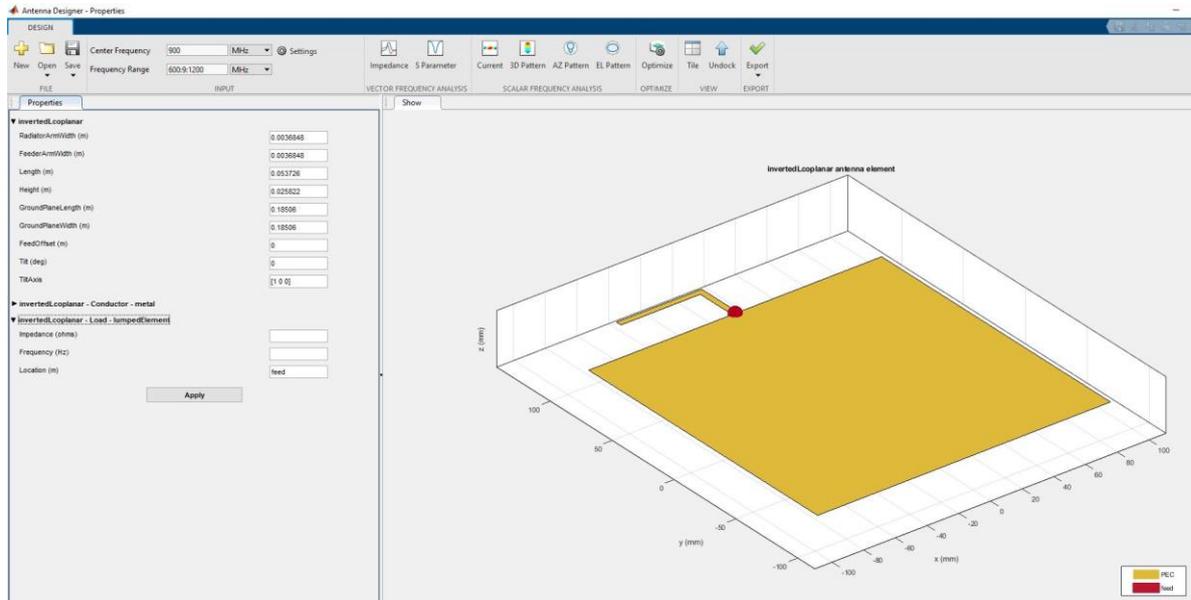


Ilustración 3. InvertedLoop planar diseñada a 900 MHz en Antenna Designer

En la Ilustración 4, se muestra los parámetros S11, que corresponden al coeficiente de reflexión de la antena, donde se puede observar que la frecuencia de resonancia se halla en 907 MHz.

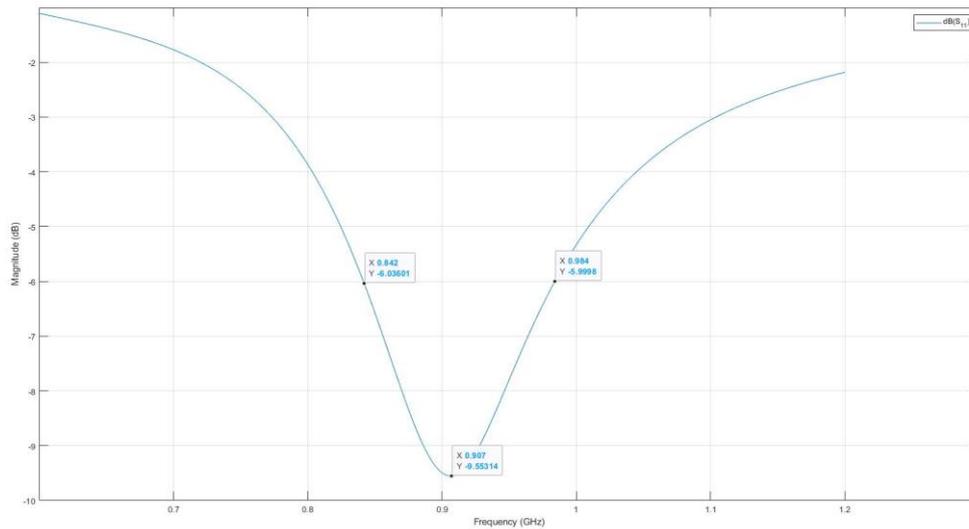


Ilustración 4. Parámetros S11 de la antena simulada a 900 MHz

En la Ilustración 5, se muestra la impedancia de entrada. Los valores indicados corresponden a la resistencia y a la reactancia en la frecuencia de resonancia. En concreto, se obtiene una resistencia de 25,43 Ω y una reactancia de 5,54 Ω .

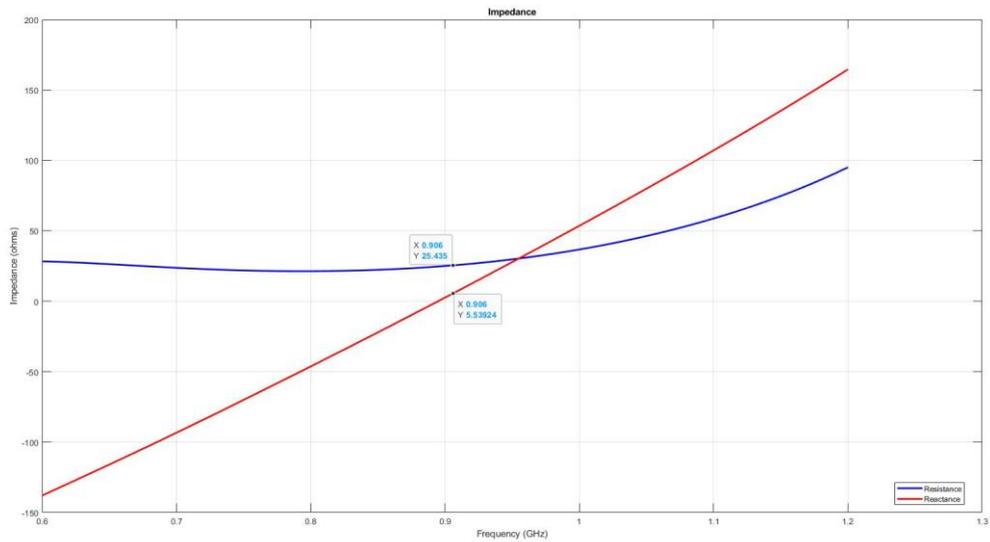


Ilustración 5. Impedancia de la antena simulada a 900 MHz

En la Ilustración 6 se representa el diagrama de radiación de la antena simulada a la frecuencia de resonancia. Corresponde con un diagrama omnidireccional cuya directividad máxima es de 4,1 dBi.

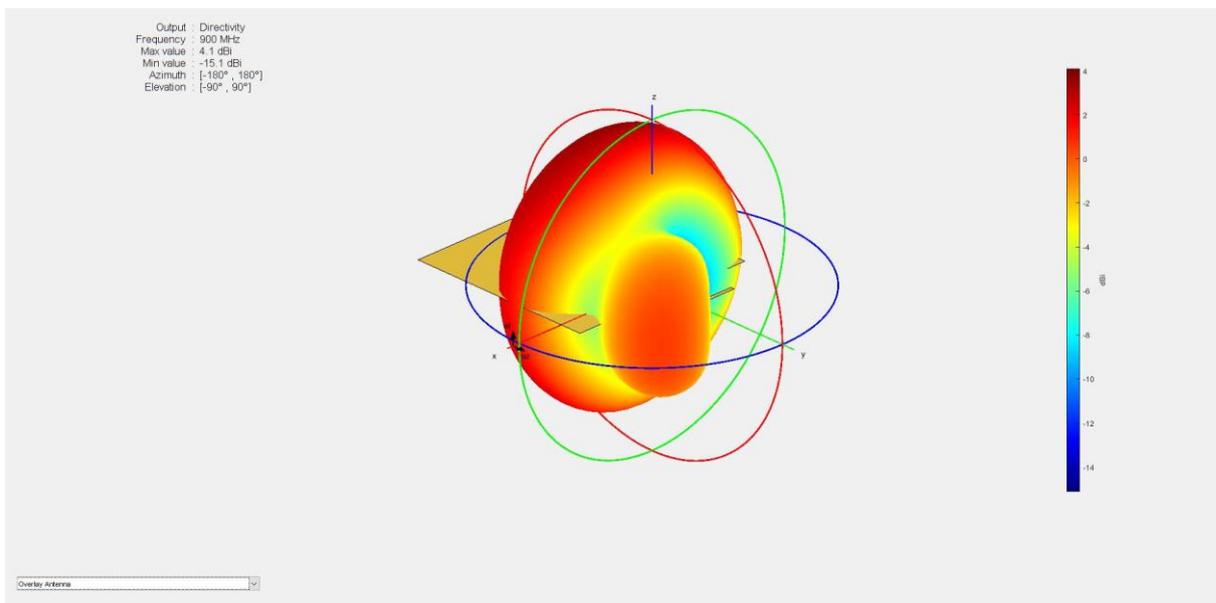


Ilustración 6. Diagrama de radiación de la antena simulada a 900 MHz

En la Ilustración 7 se representa el diagrama de elevación de la antena simulada a la frecuencia de resonancia.

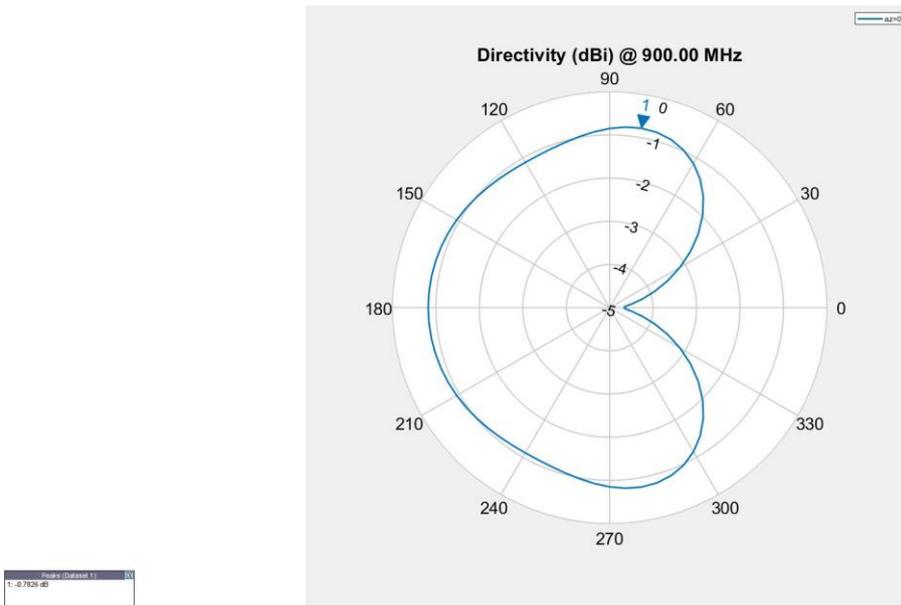


Ilustración 7. Diagrama de elevación de la antena simulada a 900 MHz

En la Ilustración 8 se representa el diagrama de azimut de la antena simulada a la frecuencia de resonancia.

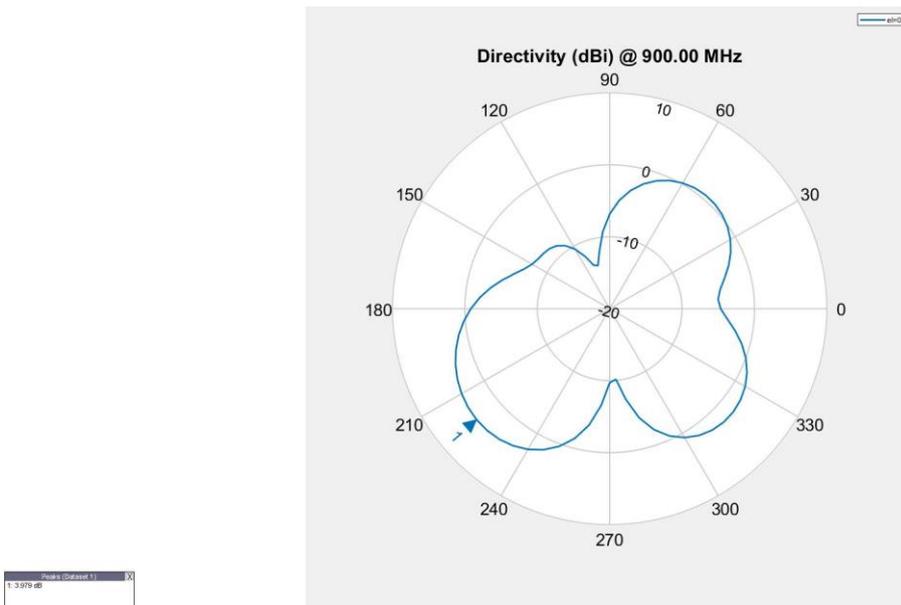


Ilustración 8. Diagrama de azimut de la antena simulada a 900 MHz

En la Ilustración 10 se representa la distribución de corriente en la antena simulada a la frecuencia de resonancia.

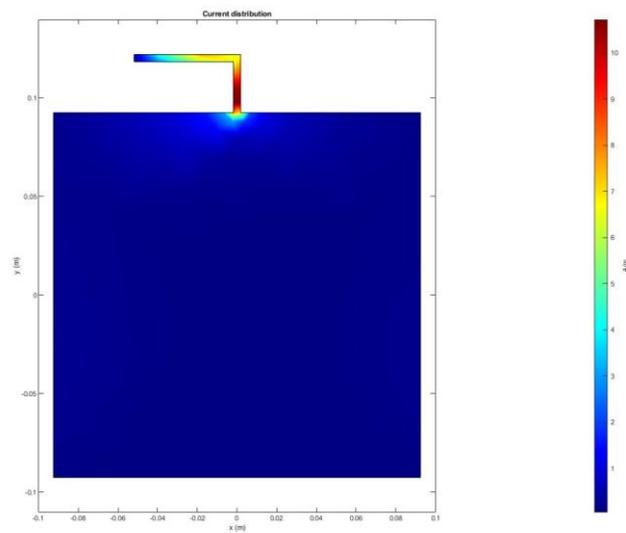


Ilustración 9. Distribución de corriente de la antena simulada a 900 MHz

Cabe destacar que la antena obtenida tiene las dimensiones óptimas para la frecuencia diseñada.

4. Mejora del ancho de banda mediante variación de dimensión de la antena

Como bien se ha visto en el apartado anterior, se ha seguido un sistema metódico para crear una antena tipo InvertedLcoplanar mediante la aplicación de Matlab “Antenna Toolbox”.

El objetivo de este apartado es variar dos parámetros de la antena obtenida y simularla para ver cómo cambia el ancho de banda relativo y a que frecuencia está adaptada. Todo esto se observará en la gráfica de parámetros S_{11} .

Los parámetros que variarán son los siguientes:

- GroundPlaneWidth. Este parámetro corresponde al ancho del plano de masa. Se va a variar entre 50 y 300 milímetros.
- GroundPlaneLength. Este parámetro corresponde a la longitud del plano de masa. Se va a variar entre 50 y 300 milímetros.

En la Ilustración 10 se representan un esquema de la antena.

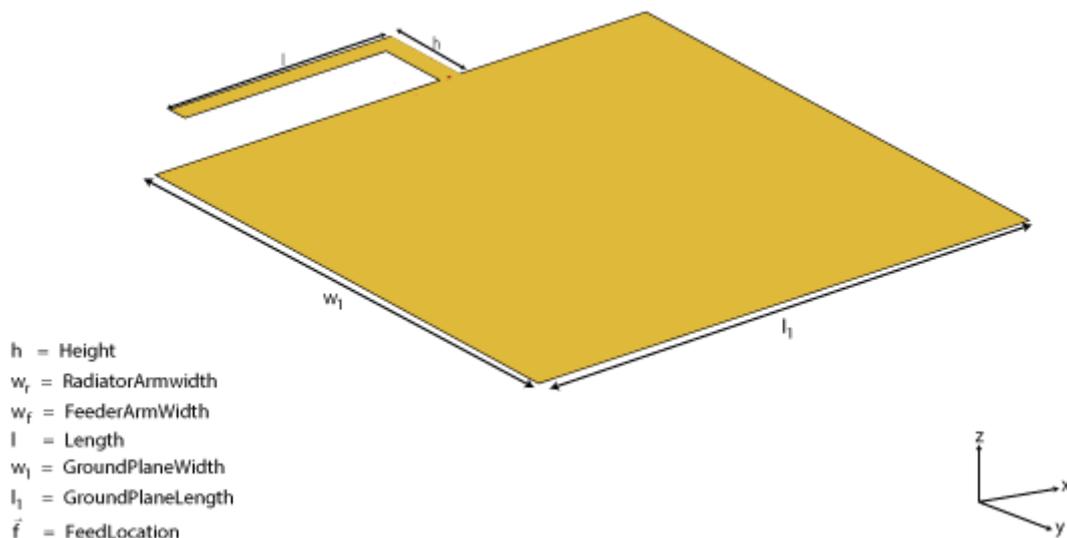


Ilustración 10. InvertedLcoplanar

Como se ha comentado, el valor que se va a usar para calcular el ancho de banda son 6 dB.

Como se puede observar, las simulaciones se realizan en un barrido de frecuencias comprendido entre 400 y 1200 MHz.

Este apartado se va a dividir en subapartados, de esta forma se va a ir variando el tamaño.

4.1 Ancho de plano de masa fijo a 25 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestra una gráfica donde se incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas con un ancho fijo de 25 mm y una longitud variable:

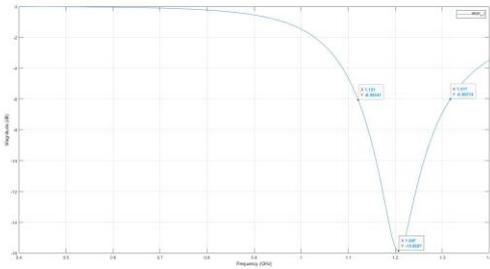


Ilustración 11. Parámetros S_{11} de antena 25x25

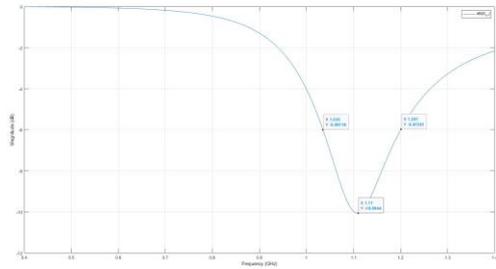


Ilustración 12. Parámetros S_{11} de antena 25x50

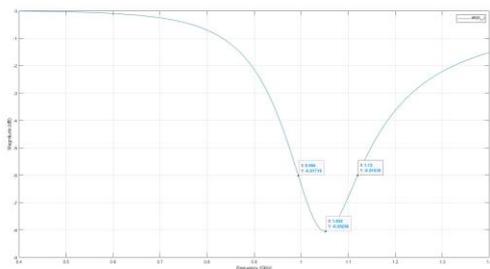


Ilustración 13. Parámetros S_{11} de antena 25x75

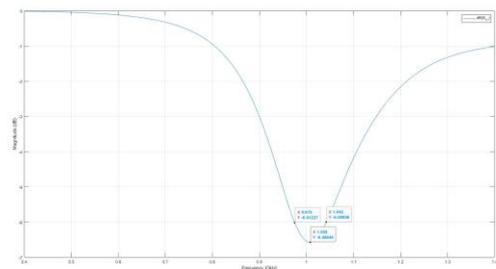


Ilustración 14. Parámetros S_{11} de antena 25x100

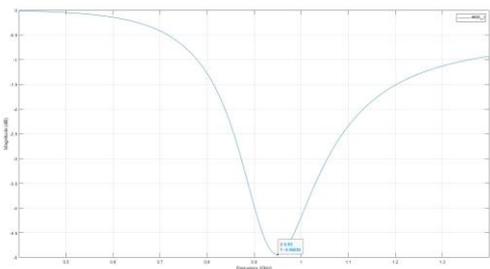


Ilustración 15. Parámetros S_{11} de antena 25x150

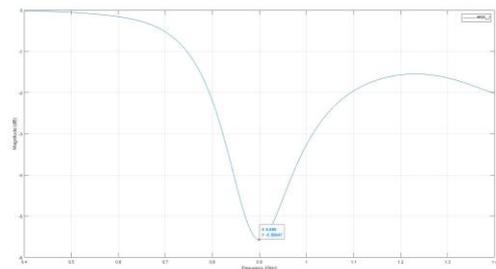


Ilustración 16. Parámetros S_{11} de antena 25x200

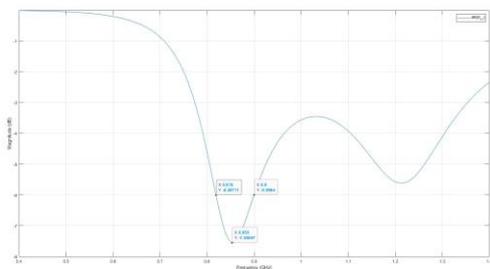


Ilustración 17. Parámetros S_{11} de antena 25x250

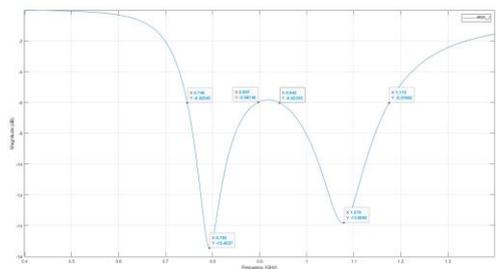


Ilustración 18. Parámetros S_{11} de antena 25x300

A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas, ya que en la antena de 25x25 la frecuencia central se encuentra en 1,207 MHz y en la antena de 25x200 la frecuencia central se encuentra en 0,899 MHz.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena presenta un comportamiento multi banda. En este caso y en el rango de frecuencias representado, a partir de una longitud del plano de masa superior a 250 milímetros la antena presenta este comportamiento.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 50 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.

4.2 Ancho de plano de masa fijo a 50 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestra una gráfica donde se incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas con un ancho fijo de 50 mm y una longitud variable:

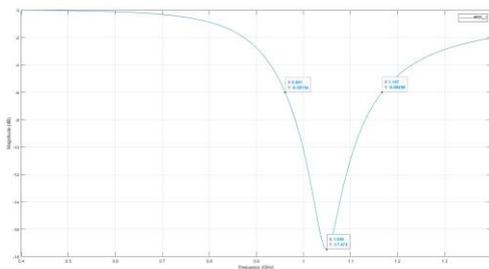


Ilustración 19. Parámetros S_{11} de antena 50x25

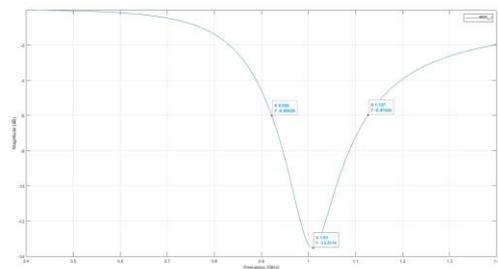


Ilustración 20. Parámetros S_{11} de antena 50x50

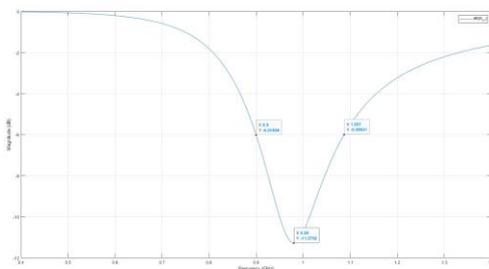


Ilustración 21. Parámetros S_{11} de antena 50x75

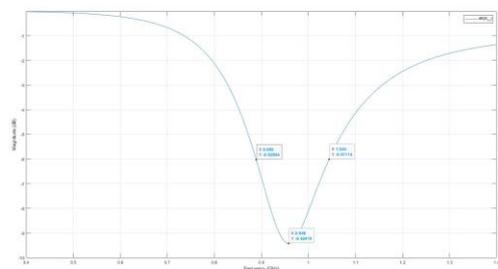
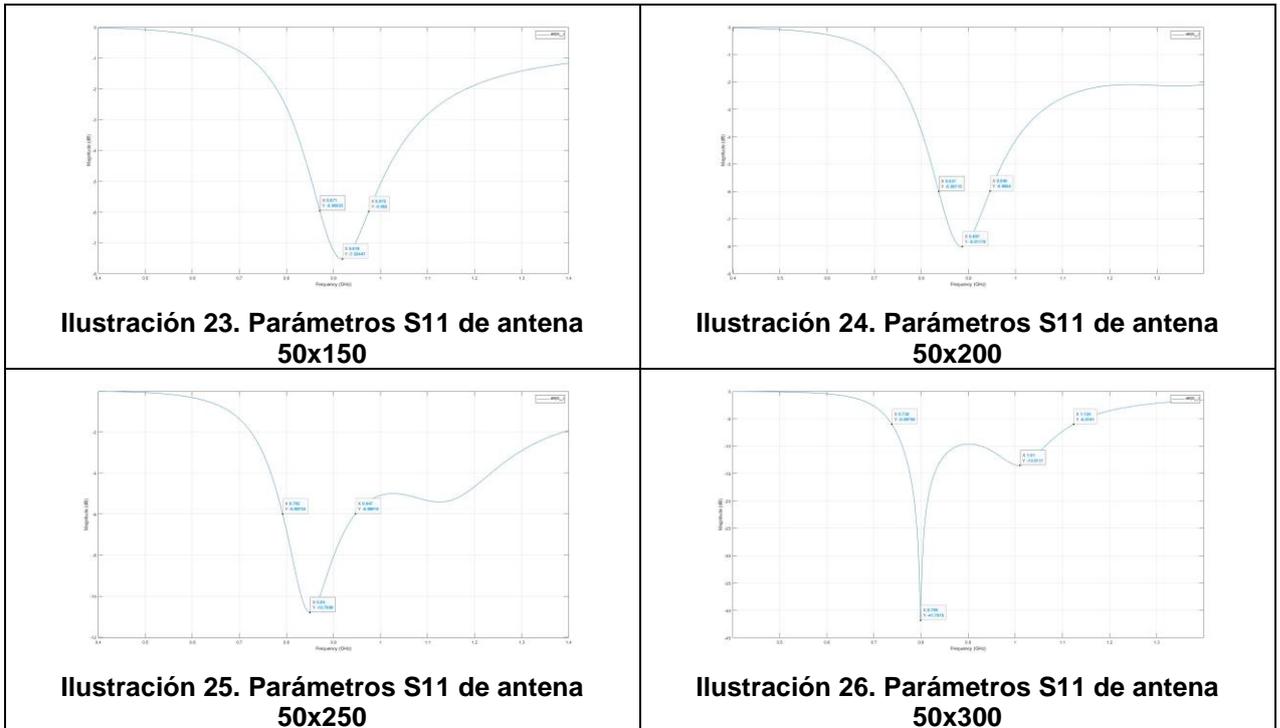


Ilustración 22. Parámetros S_{11} de antena 50x100



A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S₁₁ de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas, ya que en la antena de 50x25 la frecuencia central se encuentra en 1,049 MHz y en la antena de 50x300 la frecuencia central se encuentra en 0,799 MHz. Ocurre exactamente lo mismo que en el apartado anterior.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena intenta tener un comportamiento multibanda. En este caso y en el rango de frecuencias representado, a partir de una longitud del plano de masa superior a 250 milímetros la antena presenta este comportamiento. Ocurre exactamente lo mismo que en el apartado anterior.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda disminuye, excepto a partir de 250 mililitros que empieza a aumentar.

4.3 Ancho de plano de masa fijo a 75 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestra una gráfica donde se incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas con un ancho fijo de 75 mm y una longitud variable:

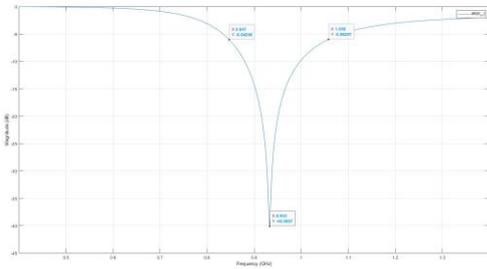


Ilustración 27. Parámetros S_{11} de antena 75x25

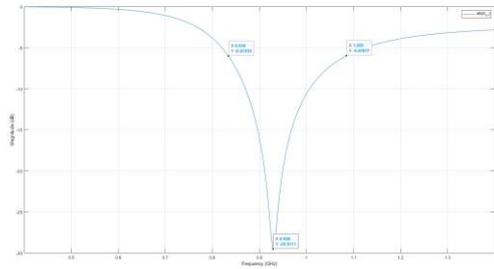


Ilustración 28. Parámetros S_{11} de antena 75x50

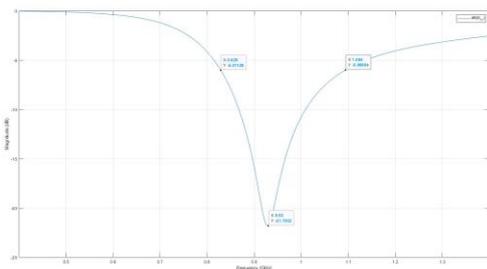


Ilustración 29. Parámetros S_{11} de antena 75x75

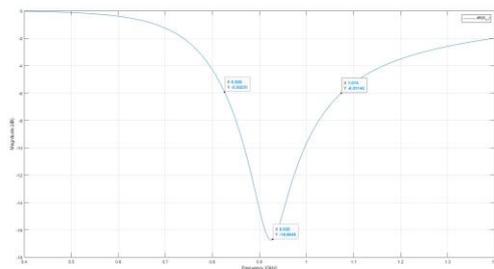


Ilustración 30. Parámetros S_{11} de antena 75x100

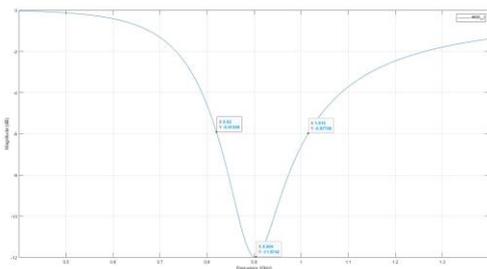


Ilustración 31. Parámetros S_{11} de antena 75x150

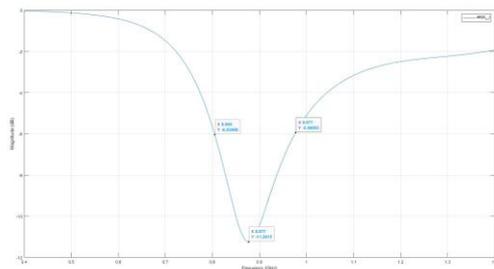


Ilustración 32. Parámetros S_{11} de antena 75x200

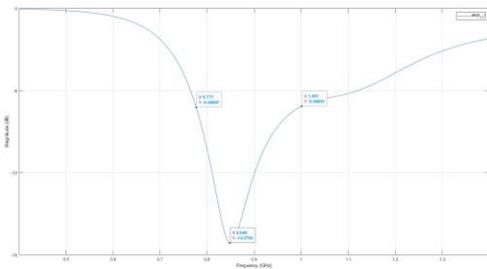


Ilustración 33. Parámetros S_{11} de antena 75x250

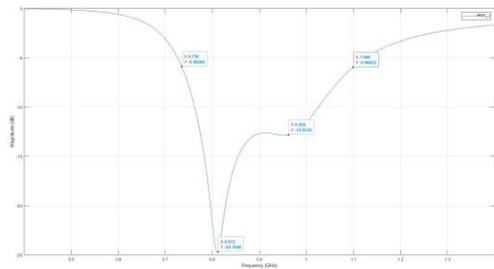


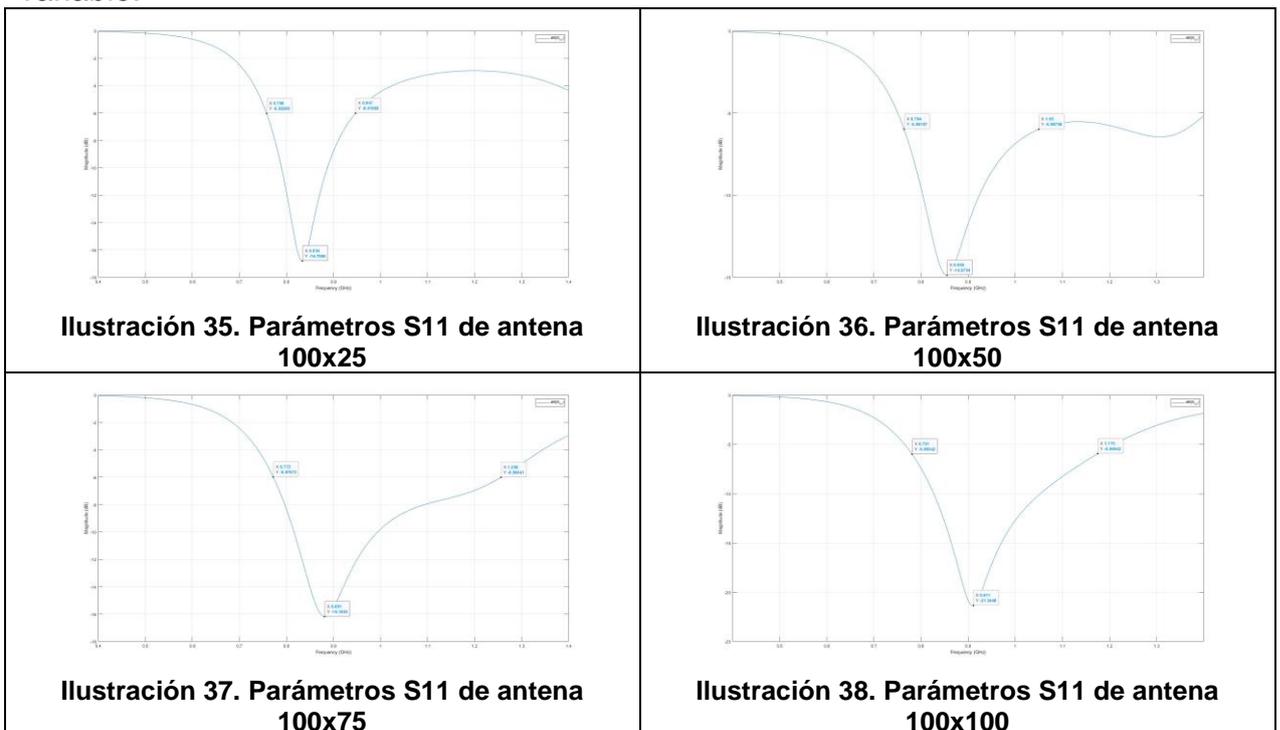
Ilustración 34. Parámetros S_{11} de antena 75x300

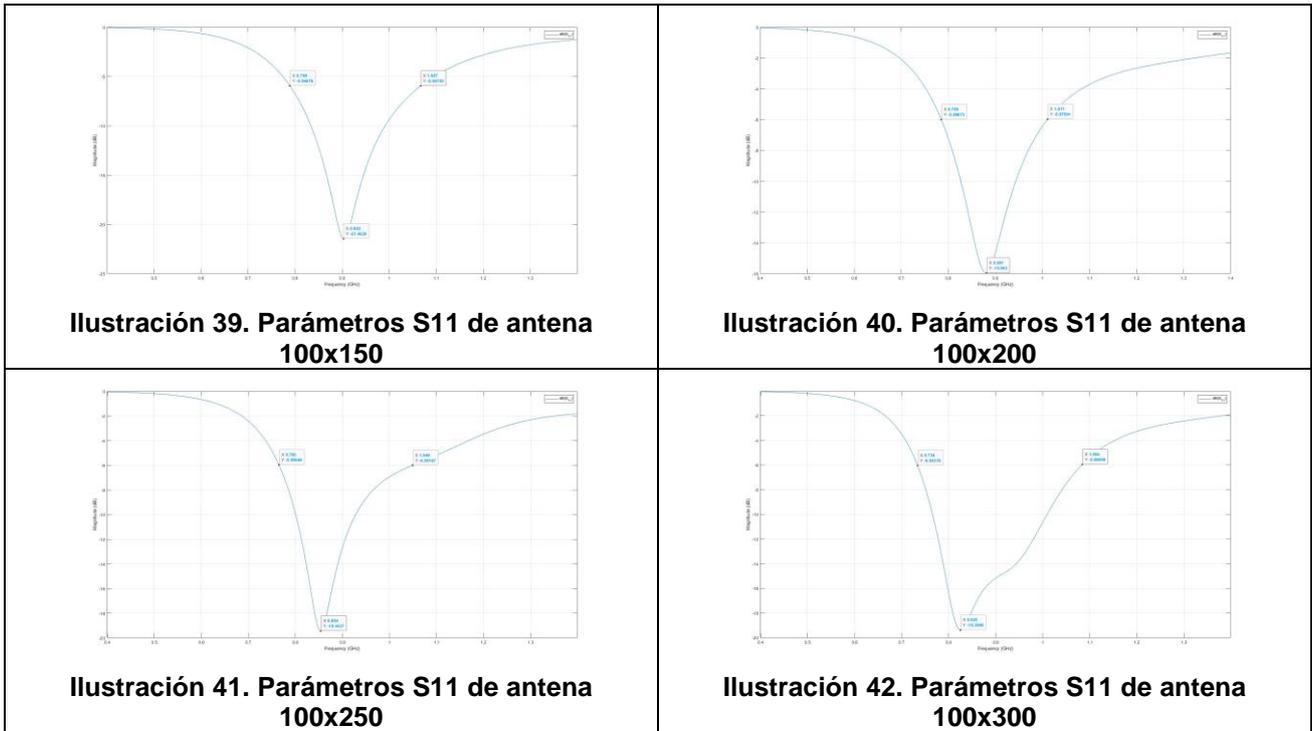
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas, ya que en la antena de 75x25 la frecuencia central se encuentra en 0,933 MHz y en la antena de 75x300 la frecuencia central se encuentra en 0,812 MHz. Ocurre exactamente lo mismo que en el apartado anterior, pero en este caso, la variación entre ambas es más pequeña.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena intenta tener un comportamiento multibanda. En este caso y en el rango de frecuencias representado, a partir de una longitud del plano de masa superior a 300 milímetros la antena intenta presentar este comportamiento sin llegar a conseguirlo. De esta forma, se obtiene un ancho de banda mucho más grande que en los anteriores casos.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda va aumentando hasta llegar a una longitud de 75 milímetros, que empieza a disminuir, excepto a partir de 300 mililitros que vuelve a aumentar.

4.4 Ancho de plano de masa fijo a 100 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestra una gráfica donde se incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas con un ancho fijo de 100 mm y una longitud variable:





A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más grandes, ya que en la antena de 100x25 la frecuencia central se encuentra en 0,834 MHz y en la antena de 100x100 la frecuencia central se encuentra en 0,911 MHz. A partir de 100 milímetros, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Este caso es diferente a los anteriores, ya que los anteriores iban de frecuencias más elevadas a más bajas, y en este caso es al contrario, empieza a aumentar y luego disminuye.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, en ningún momento la antena se comporta multibanda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda va aumentando hasta llegar a una longitud de 75 milímetros, que empieza a disminuir, excepto a partir de 300 mililitros que vuelve a aumentar.

4.5 Ancho de plano de masa fijo a 150 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestra una gráfica donde se incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas con un ancho fijo de 150 mm y una longitud variable:

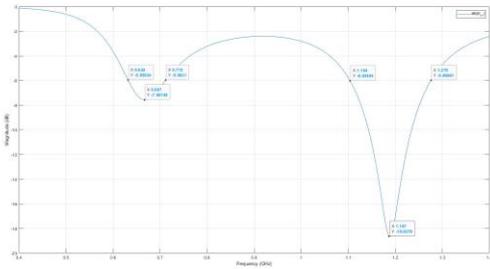


Ilustración 43. Parámetros S_{11} de antena 150x25

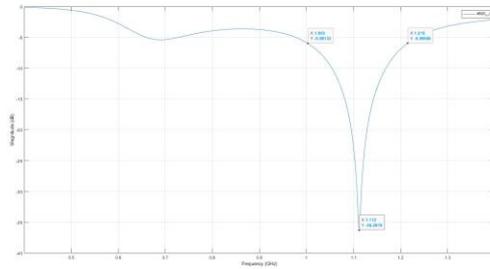


Ilustración 44. Parámetros S_{11} de antena 150x50

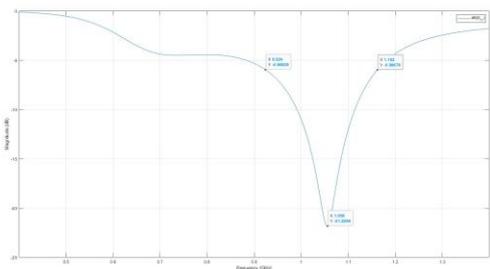


Ilustración 45. Parámetros S_{11} de antena 150x75

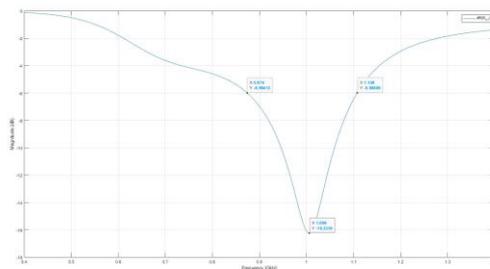


Ilustración 46. Parámetros S_{11} de antena 150x100

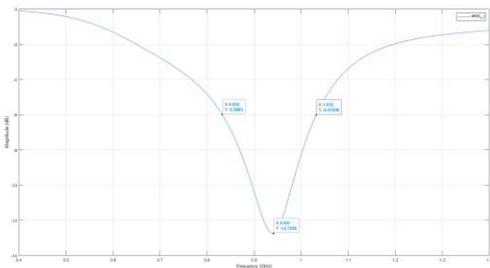


Ilustración 47. Parámetros S_{11} de antena 150x150

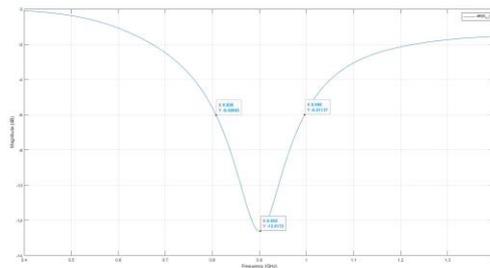


Ilustración 48. Parámetros S_{11} de antena 150x200

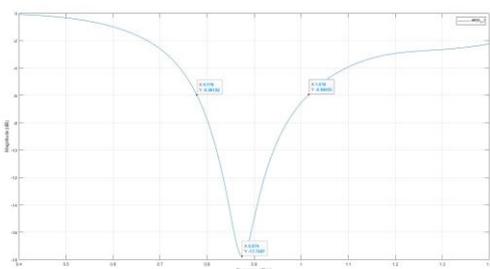


Ilustración 49. Parámetros S_{11} de antena 150x250

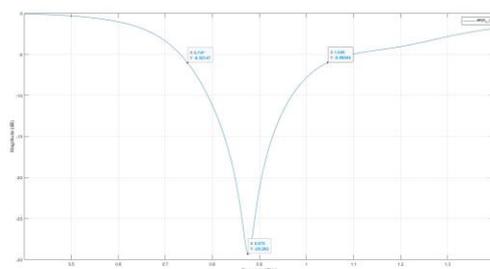


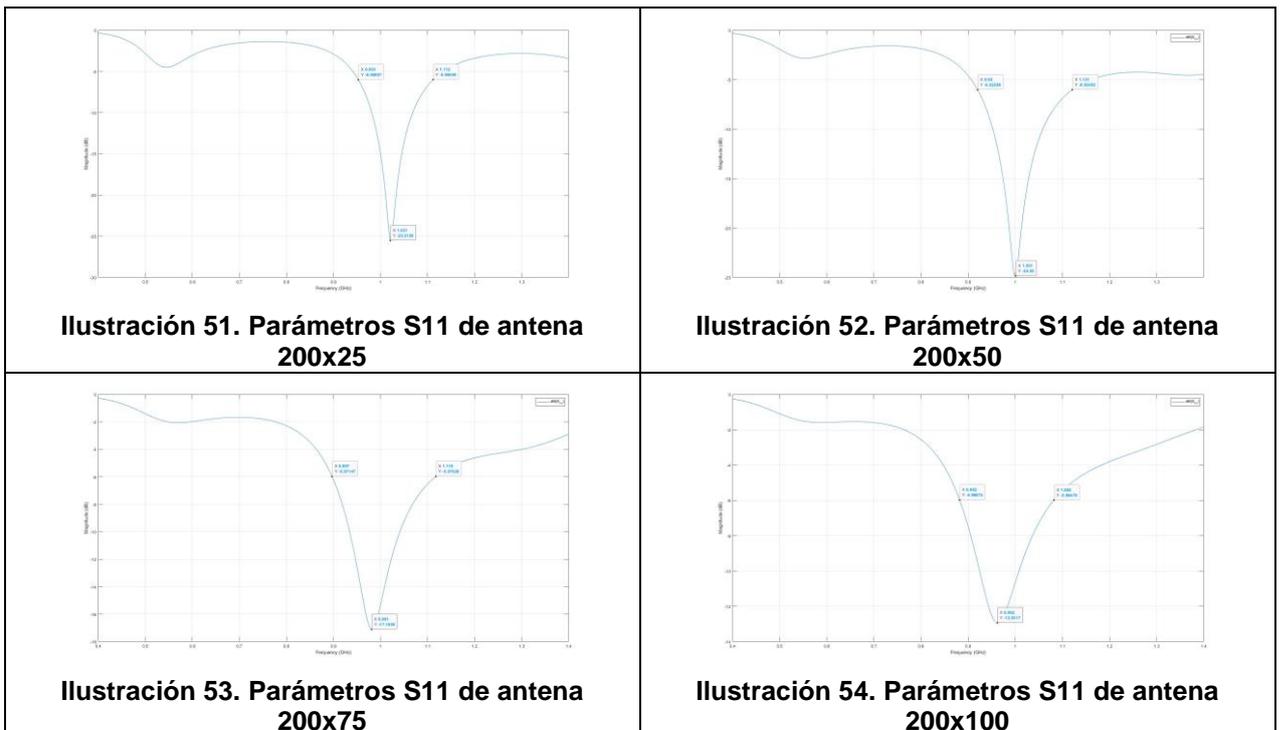
Ilustración 50. Parámetros S_{11} de antena 150x300

A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas, ya que en la antena de 150x25 la frecuencia central se encuentra en 1,187 MHz y en la antena de 100x100 la frecuencia central se encuentra en 0,875 Hz.
- Al incrementar la longitud del plano de masa la antena no tiende a presentar comportamiento multibanda en el rango de frecuencias establecido, a excepción de la antena 150x25 que presenta comportamiento multibanda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda va aumentando hasta llegar a una longitud de 75 milímetros, que empieza a disminuir. A partir de 250 milímetros, el ancho de banda vuelve a aumentar.

4.6 Ancho de plano de masa fijo a 200 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestra una gráfica donde se incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas con un ancho fijo de 200 mm y una longitud variable:



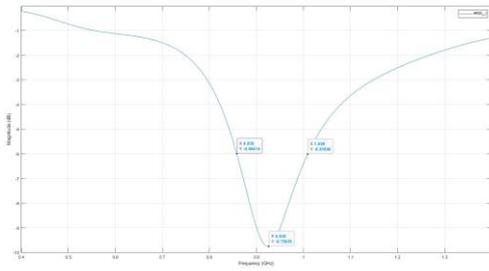


Ilustración 55. Parámetros S11 de antena 200x150

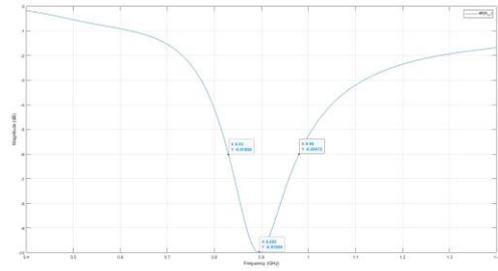


Ilustración 56. Parámetros S11 de antena 200x200

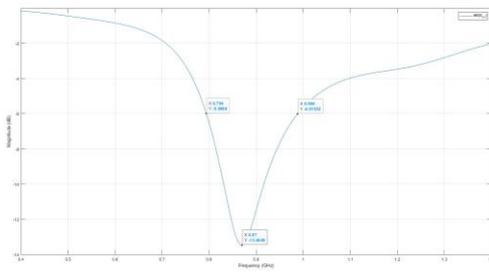


Ilustración 57. Parámetros S11 de antena 200x250

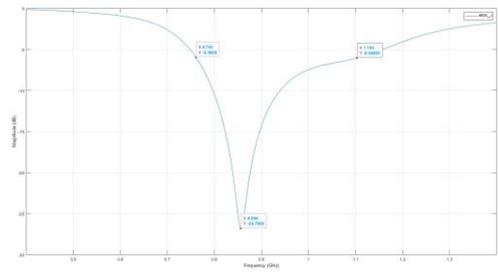


Ilustración 58. Parámetros S11 de antena 200x300

A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S₁₁ de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas, ya que en la antena de 200x25 la frecuencia central se encuentra en 1,021 MHz y en la antena de 200x300 la frecuencia central se encuentra en 0,856 MHz.
- Al incrementar la longitud del plano de masa la antena no tiende a presentar comportamiento multibanda en el rango de frecuencias establecido.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda va aumentando hasta llegar a una longitud de 50 milímetros, que empieza a disminuir. A partir de 300 milímetros, el ancho de banda vuelve a aumentar.

4.7 Ancho de plano de masa fijo a 250 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestra una gráfica donde se incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas con un ancho fijo de 250 mm y una longitud variable:

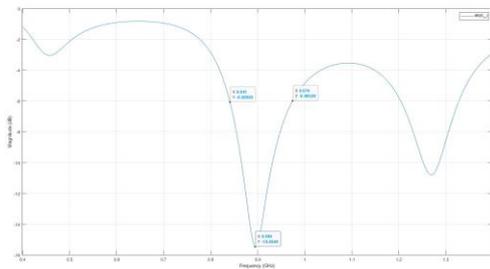


Ilustración 59. Parámetros S_{11} de antena 250x25

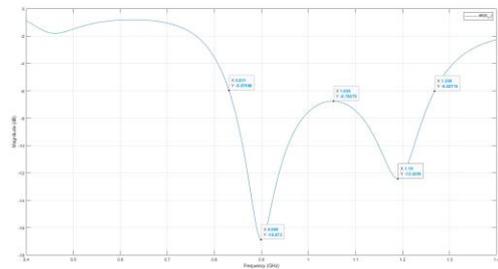


Ilustración 60. Parámetros S_{11} de antena 250x50

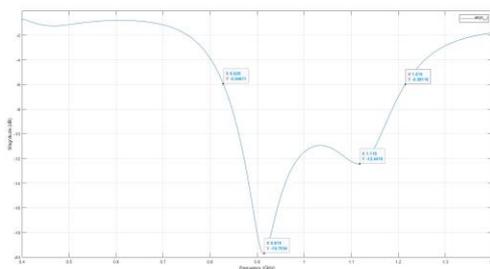


Ilustración 61. Parámetros S_{11} de antena 250x75

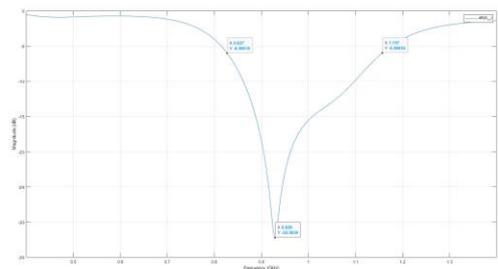


Ilustración 62. Parámetros S_{11} de antena 250x100

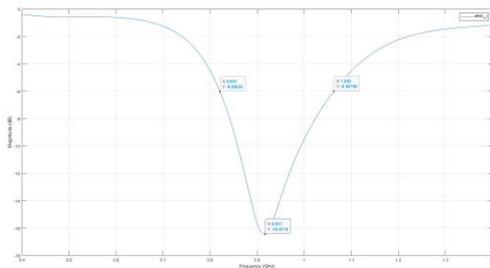


Ilustración 63. Parámetros S_{11} de antena 250x150

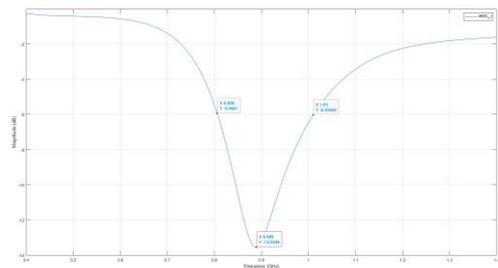


Ilustración 64. Parámetros S_{11} de antena 250x200

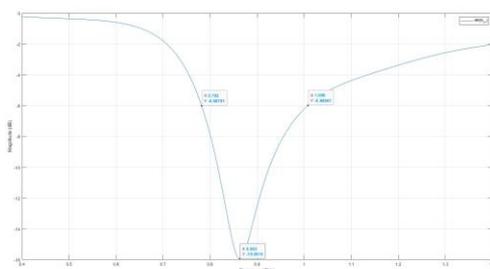


Ilustración 65. Parámetros S_{11} de antena 250x250

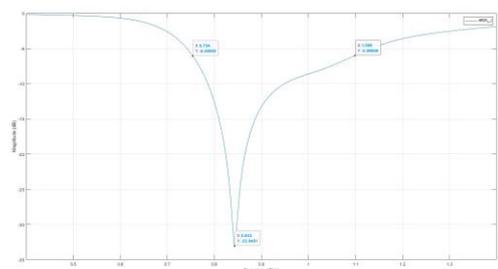


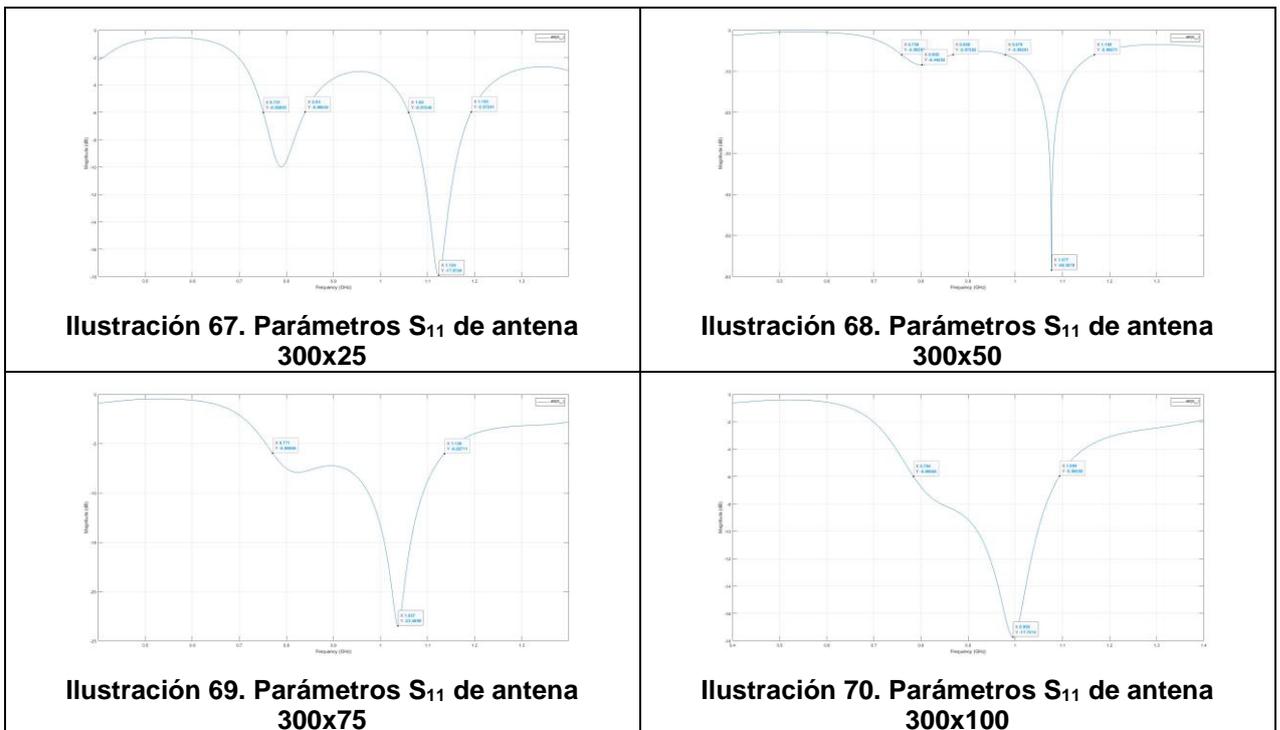
Ilustración 66. Parámetros S_{11} de antena 250x300

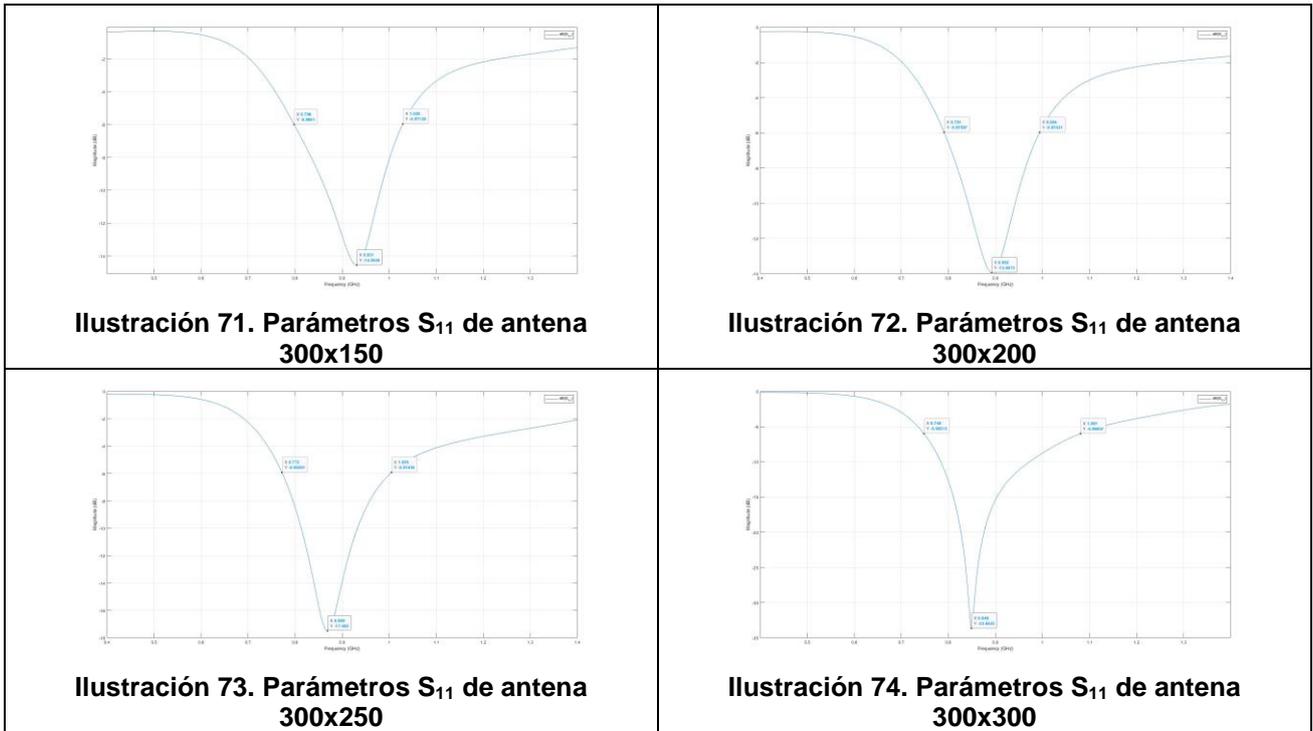
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas, ya que en la antena de 200x25 la frecuencia central se encuentra en 1,021 MHz y en la antena de 200x300 la frecuencia central se encuentra en 0,843 MHz.
- Cuando la longitud del plano de masa es menor a 100 milímetros la antena presenta un comportamiento multibanda en el rango de frecuencias establecido.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda va aumentando hasta llegar a una longitud de 50 milímetros, que empieza a disminuir. A partir de 200 milímetros, el ancho de banda vuelve a aumentar.

4.8 Ancho de plano de masa fijo a 300 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestra una gráfica donde se incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas con un ancho fijo de 300 mm y una longitud variable:





A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas, ya que en la antena de 200x25 la frecuencia central se encuentra en 1,021 MHz y en la antena de 200x300 la frecuencia central se encuentra en 0,843 MHz.
- Cuando la longitud del plano de masa es menor a 100 milímetros la antena presenta un comportamiento multibanda en el rango de frecuencias establecido.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda va aumentando hasta llegar a una longitud de 50 milímetros, que empieza a disminuir. A partir de 200 milímetros, el ancho de banda vuelve a aumentar.

4.9 Maximización del ancho de banda relativo

A partir de los apartados anteriores se ha elaborado la Tabla 2, la cual muestra el ancho de banda relativo calculado, teniendo en cuenta la frecuencia central, la frecuencia inferior y la frecuencia superior de cada una de las antenas simuladas en el rango de frecuencias comentado anteriormente.

W \ L	25	50	75	100	150	200	250	300
25	16,23	14,95	11,98	6,65	0	0	9,5	21,59
50	19,64	20,3	19,08	16,17	11,32	12,29	18,26	41,46
75	22,62	27,02	28,49	26,72	21,57	19,61	26,42	39,69
100	22,66	33,45	47,73	40,28	30,79	25,65	33,26	38,5
150	14,49	19,06	22,54	23,26	21,25	20,84	27,23	34,06
200	15,57	41,5	22,53	20,79	16,31	16,76	22,3	36,7
250	14,87	41,5	37,88	33,27	26,39	22,95	26,19	37,24
300	11,84	17,55	38,28	33,01	24,81	22,76	26,81	39,22

Tabla 2. Ancho de banda relativo en porcentaje en función de W y L

A partir de la Tabla 2, mediante Matlab, se ha realizado una distribución de los anchos de banda relativos calculados, en función del ancho y la longitud del plano de masa. Como se puede observar en la Ilustración 75, las zonas de color azul corresponden a las zonas el cual el ancho de banda es menor y las zonas de color amarillo corresponde a las zonas donde el ancho de banda es mayor.

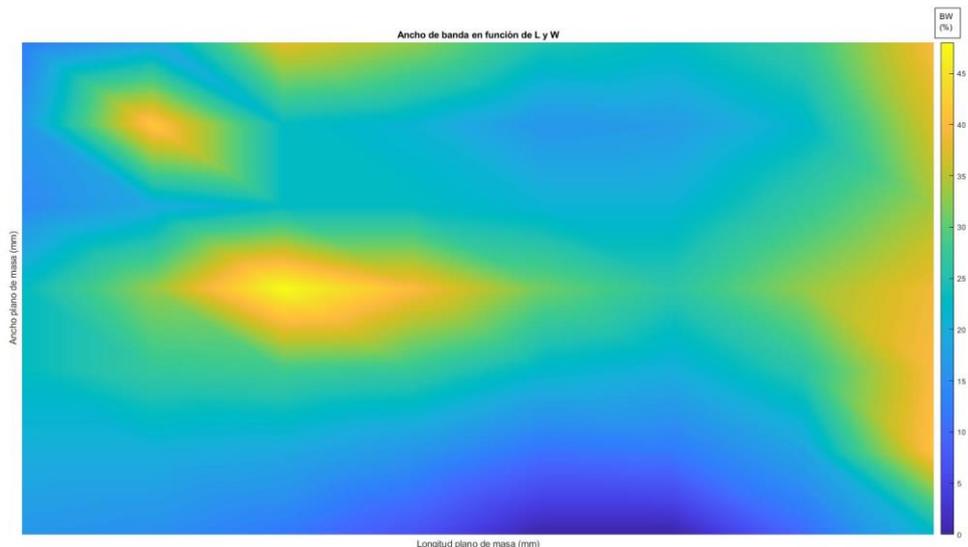


Ilustración 75. Distribución del ancho de banda relativo

A partir de la Tabla 2, también se elabora la Ilustración 75 donde se representa un gráfico para visualizar de manera más clara el ancho de banda.

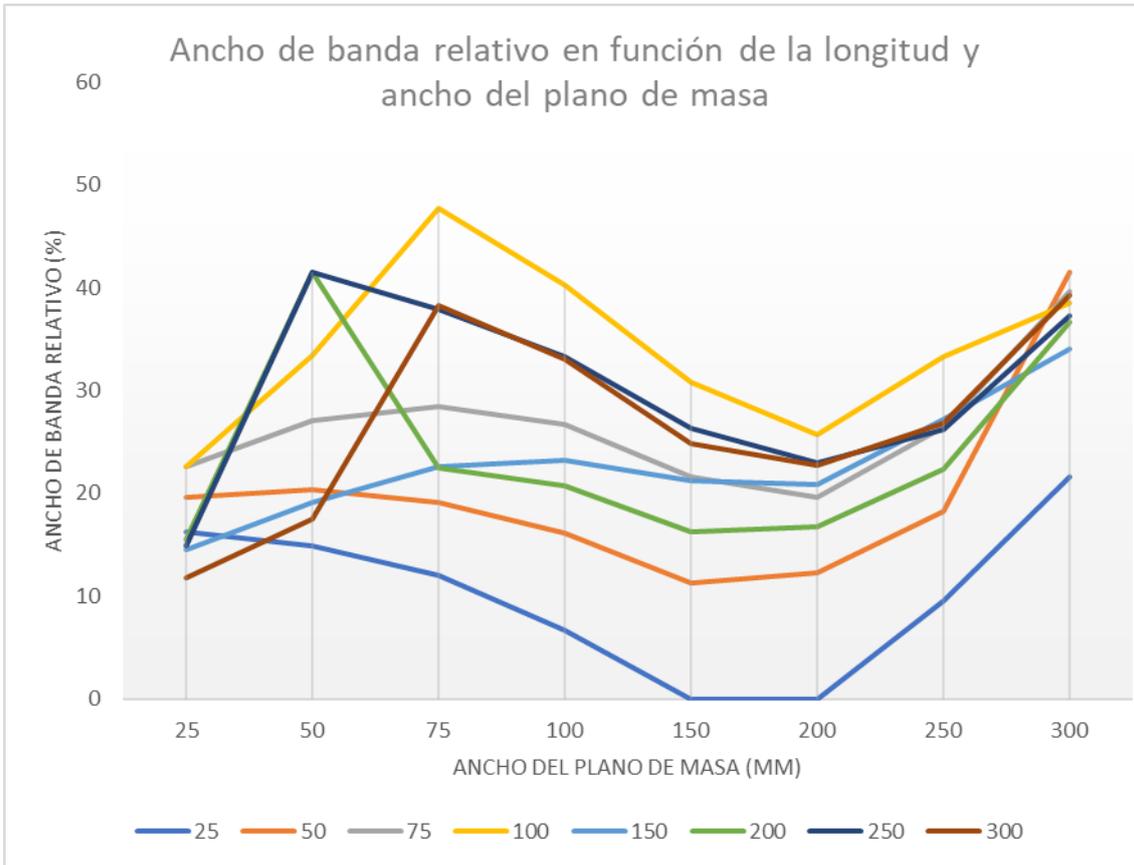


Ilustración 76. Ancho de banda relativo en función de la longitud y ancho del plano de masa

En la Ilustración 76 se ha representado en el eje horizontal el ancho del plano de masa, variando estos valores en un rango de 25 hasta 300 mm. En el eje vertical se indica el porcentaje de ancho de banda relativo de las líneas pintadas, las cuales corresponden a cada longitud del plano de masa.

Según las dos ilustraciones anteriores y la Tabla 2, los valores que muestran un mayor ancho de banda relativo son:

- Ancho del plano de masa: 75 milímetros.
- Longitud del plano de masa: 100 milímetros.

Cabe destacar que, a partir de 250 milímetros del ancho del plano de masa, se observa que el ancho de banda empieza a elevarse, pero se ha descartado esos valores o superiores ya que, como se ha comentado anteriormente, el objetivo es hacer antenas lo más pequeñas posibles.

Teniendo en cuenta estos valores obtenidos, se procede y se vuelve a simular la antena en un rango frecuencial cercanos a los valores obtenidos, con menos saltos intermedios entre cada valor para encontrar el valor que maximice el ancho de banda.

En el rango simulado, se encuentra que para maximizar el ancho de banda relativo las medidas tienen que ser:

- Ancho del plano de masa: 110 milímetros.
- Longitud del plano de masa: 55 milímetros.

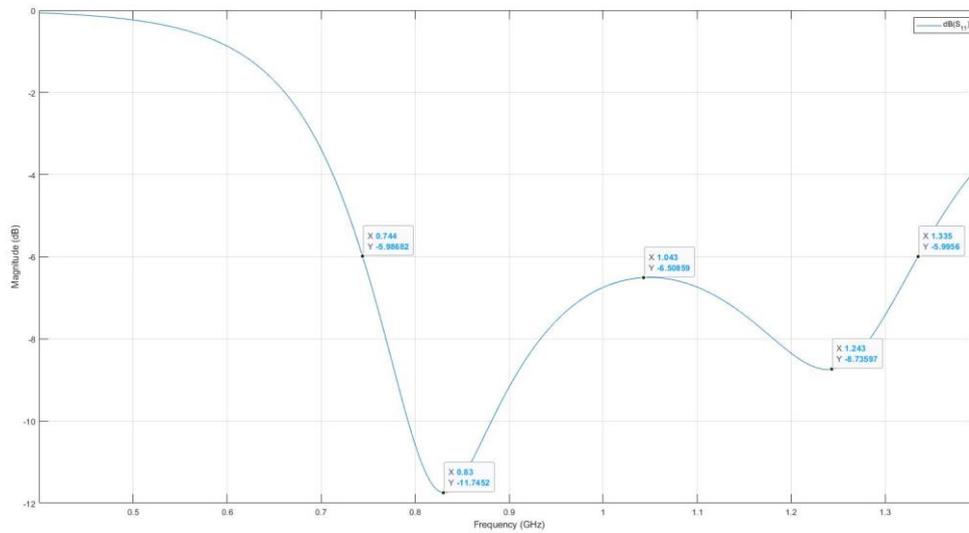


Ilustración 77. Parámetros S_{11} de antena 110x55

El ancho de banda relativo obtenido es de 56,85 %.

5. Diseño y simulación de antena del tipo InvertedFCoplanar a 900 MHz

Como bien se ha visto en los apartados anteriores, se ha seguido un sistema metódico para crear una antena tipo InvertedLcoplanar mediante la aplicación de Matlab “Antenna Toolbox”.

El objetivo de este apartado es simular un tipo de antena diferente. La antena InvertedFcoplanar es una antena F invertida coplanar con un plano de tierra rectangular. Es muy similar a la InvertedLcoplanar pero tiene un cortocircuito incorporado.

Este tipo de antenas se suelen utilizar en etiquetas RFID y en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT).

Para ello, se va a seguir el mismo sistema metódico utilizado en el capítulo 2.

Como se ha comentado, el valor que se va a usar para calcular el ancho de banda es -6 dB.

Como se puede observar, las simulaciones se realizan en un barrido de frecuencias comprendido entre 400 y 1200 MHz.

Una vez creado el diseño, se obtiene la Ilustración 78. A la derecha de la imagen se representa la antena diseñada para la frecuencia seleccionada, en este caso 900 MHz y, a la izquierda de la imagen, se indica todas las medidas de la antena diseñada.

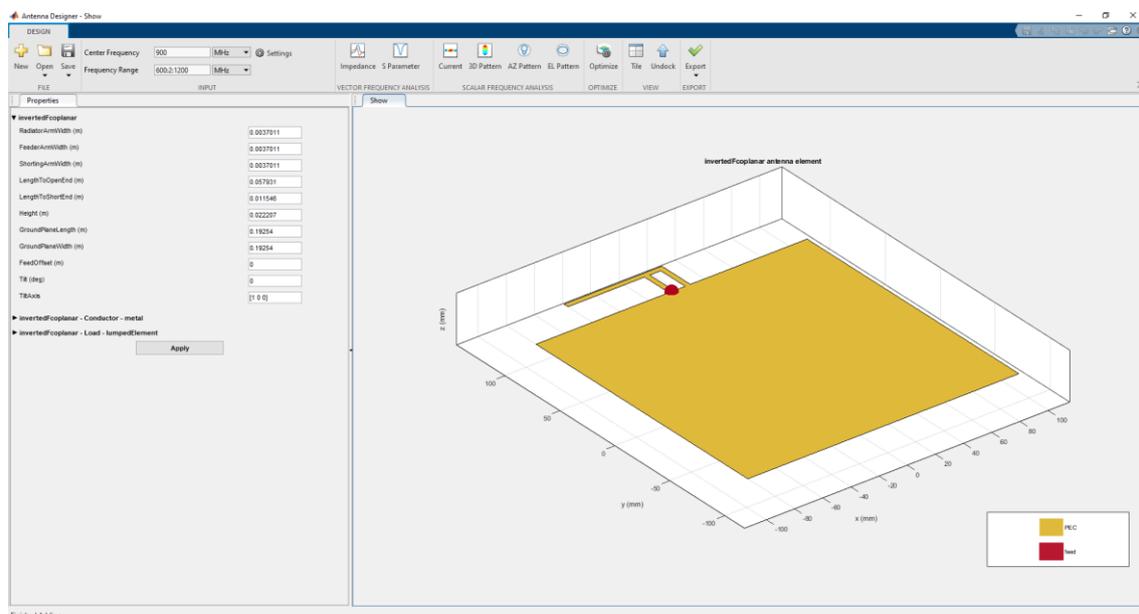


Ilustración 78. InvertedFCoplanar diseñada a 900 MHz en Antenna Designer

En la Ilustración 79, se muestra los parámetros S_{11} , que corresponden al coeficiente de reflexión de la antena, donde se puede observar que la frecuencia de resonancia se halla en 907 MHz.

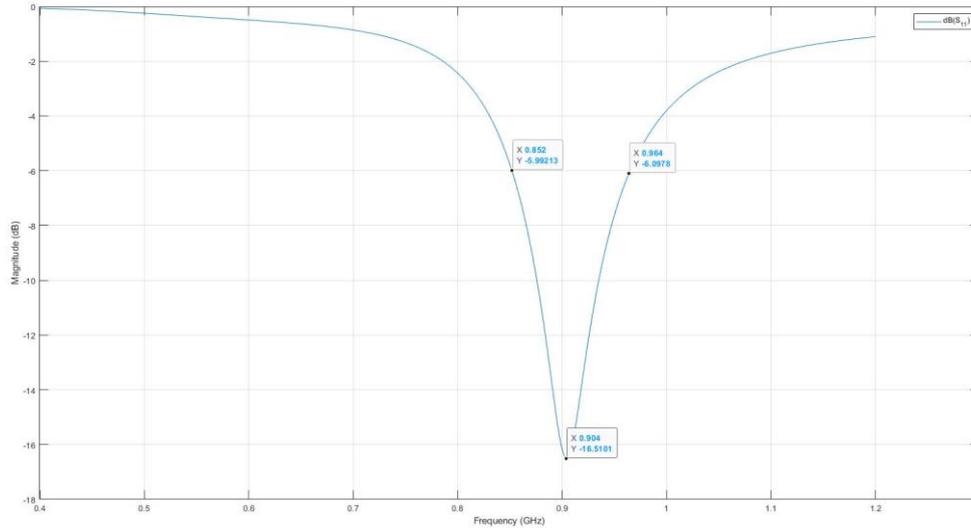


Ilustración 79. Parámetros S_{11} de la antena centrada a 900 MHz

En la Ilustración 80 se muestra la impedancia de entrada. Los valores indicados corresponden a la resistencia y a la reactancia en la frecuencia de resonancia. En concreto, se obtiene una resistencia de 25,43 Ω y una reactancia de 5,54 Ω .

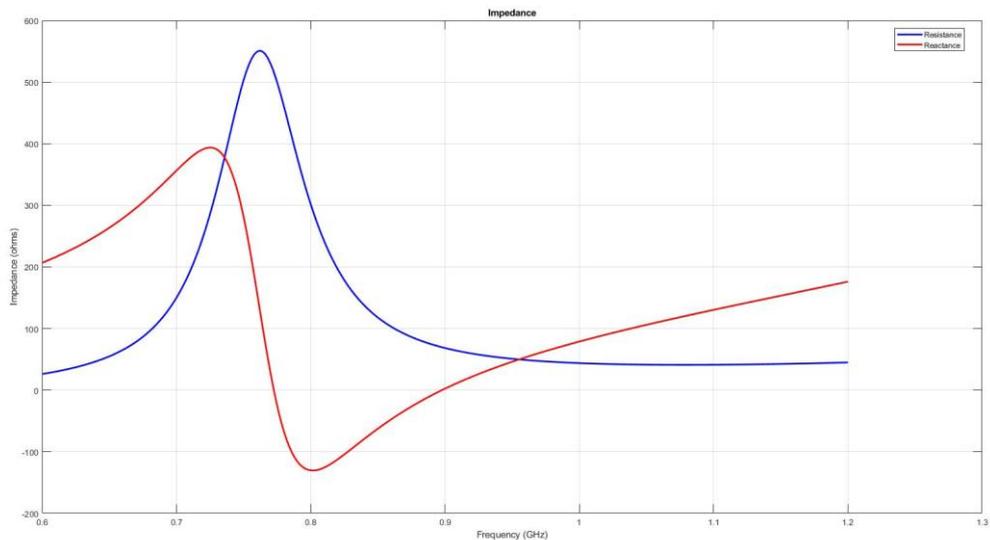


Ilustración 80. Impedancia de la antena simulada

En la Ilustración 81 se representa el diagrama de radiación de la antena simulada a la frecuencia de resonancia. Corresponde con un diagrama omnidireccional cuya directividad máxima es de 3,9 dBi.

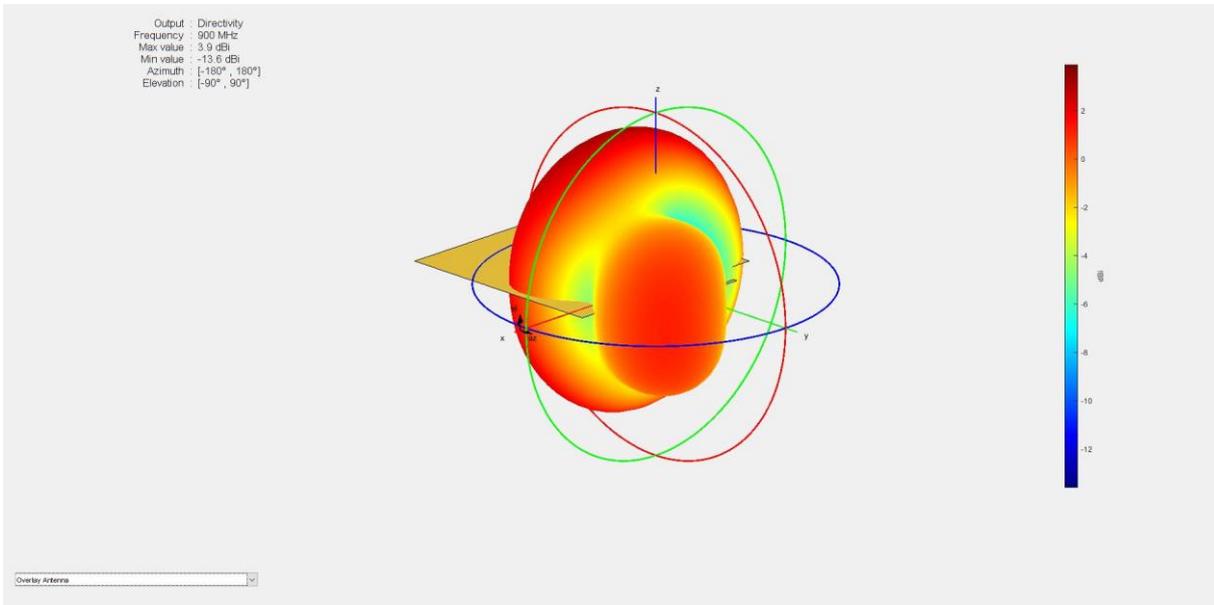


Ilustración 81. Diagrama de radiación de la antena simulada a 900 MHz

En la Ilustración 82 se representa el diagrama de elevación de la antena simulada a la frecuencia de resonancia.

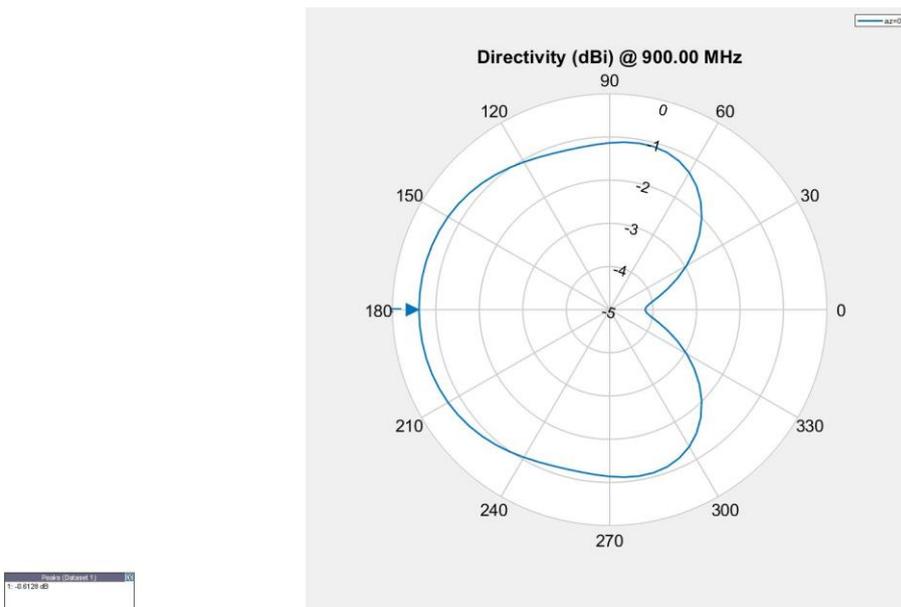


Ilustración 82. Diagrama de elevación de la antena simulada a 900 MHz

En la Ilustración 83 se representa el diagrama de azimut de la antena simulada a la frecuencia de resonancia.

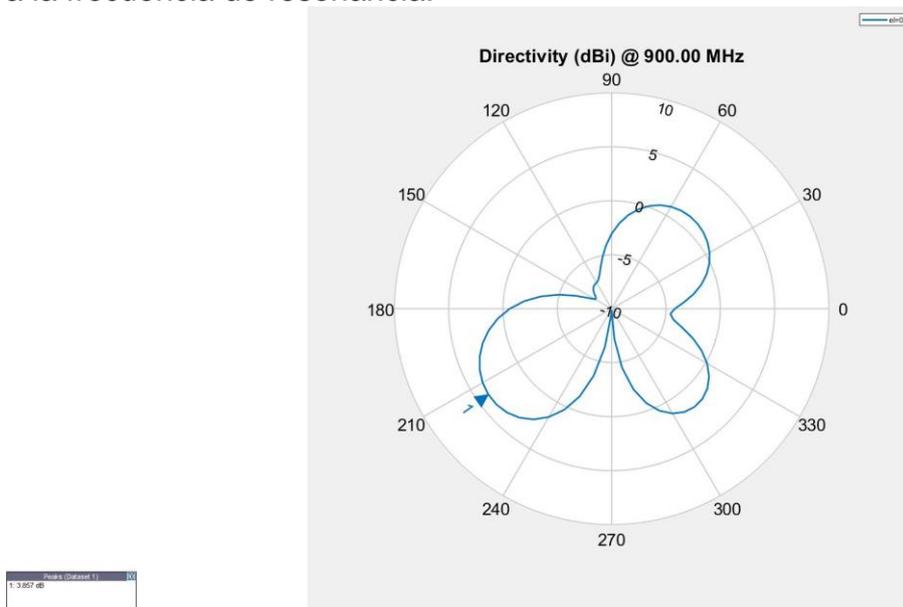


Ilustración 83. Diagrama de azimut de la antena simulada a 900 MHz

En la Ilustración 84 se representa la distribución de corriente en la antena simulada a la frecuencia de resonancia.

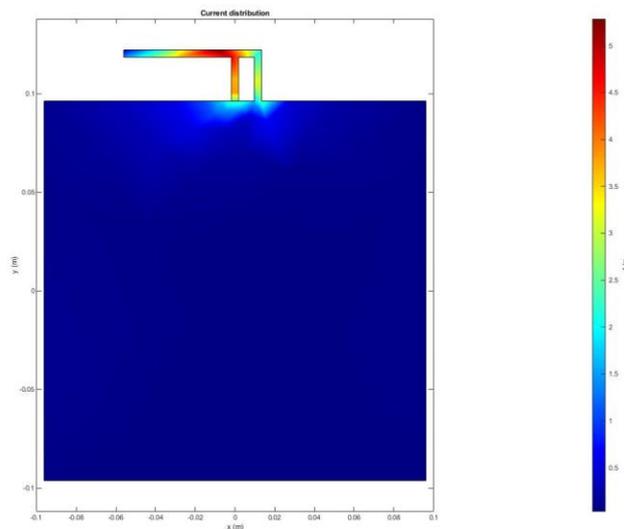


Ilustración 84. Distribución de corriente de la antena simulada a 900 MHz

Cabe destacar que la antena obtenida tiene las dimensiones óptimas para la frecuencia diseñada.

6. Mejora del ancho de banda mediante variación de dimensión de la antenna

En este capítulo se va a proceder de forma diferente al capítulo 4, ya que para que no quede tan extenso, con una sola gráfica se representa ocho antenas simuladas.

El objetivo de este apartado es variar tres parámetros de la antenna obtenida y simularla para ver cómo cambia el ancho de banda relativo y a que frecuencia está adaptada. Todo esto se observará en la gráfica de parámetros S_{11} .

Los parámetros que variarán son los siguientes:

- GroundPlaneWidth. Este parámetro corresponde al ancho del plano de masa. Se va a variar entre 50 y 300 milímetros.
- GroundPlaneLength. Este parámetro corresponde a la longitud del plano de masa. Se va a variar entre 50 y 300 milímetros.
- Height. Este parámetro corresponde a la altura de la antenna desde el plano de masa. Se va a variar entre 1 y 10 milímetros.

En la Ilustración 85 se representa un esquema de la antenna.

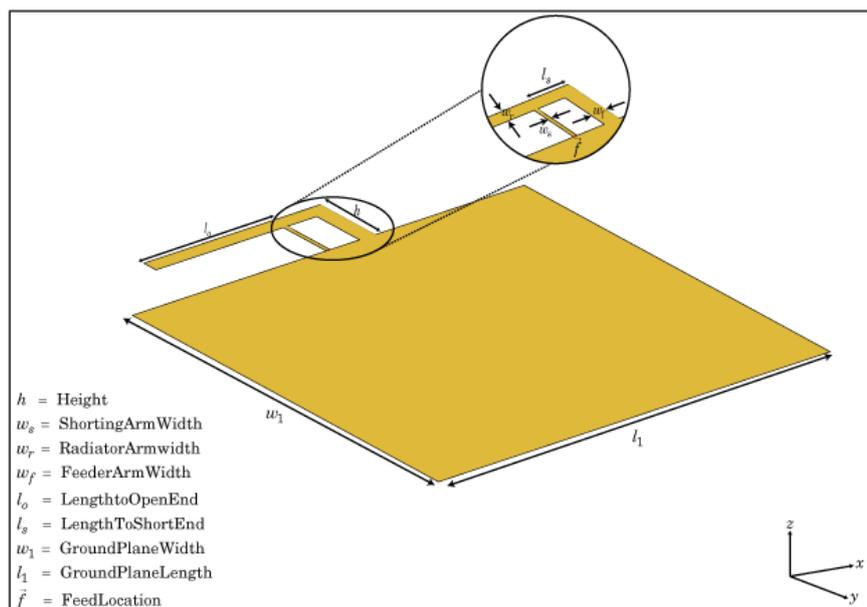
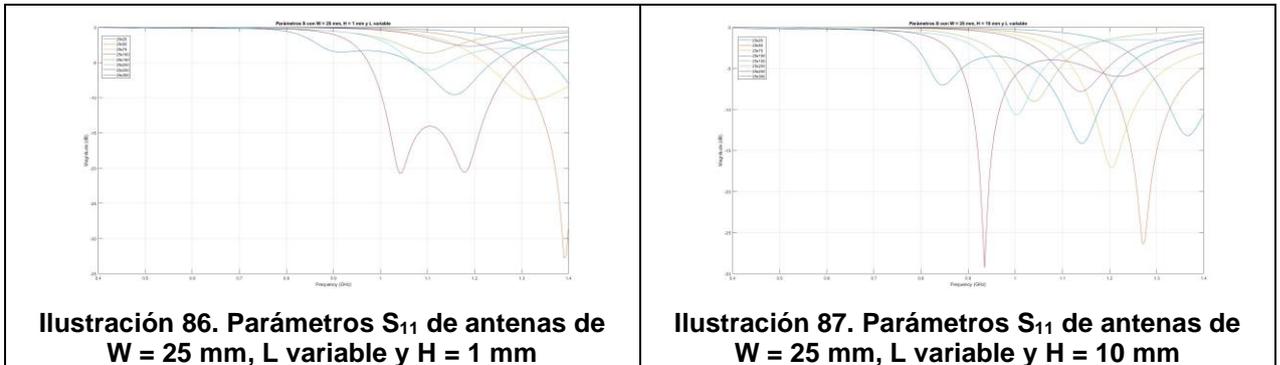


Ilustración 85. Esquema de InvertedFCoplanar

6.1 Ancho de plano de masa fijo a 25 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestran dos gráficas que incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas. En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 25 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 1 milímetro.

En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 25 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 10 milímetros.



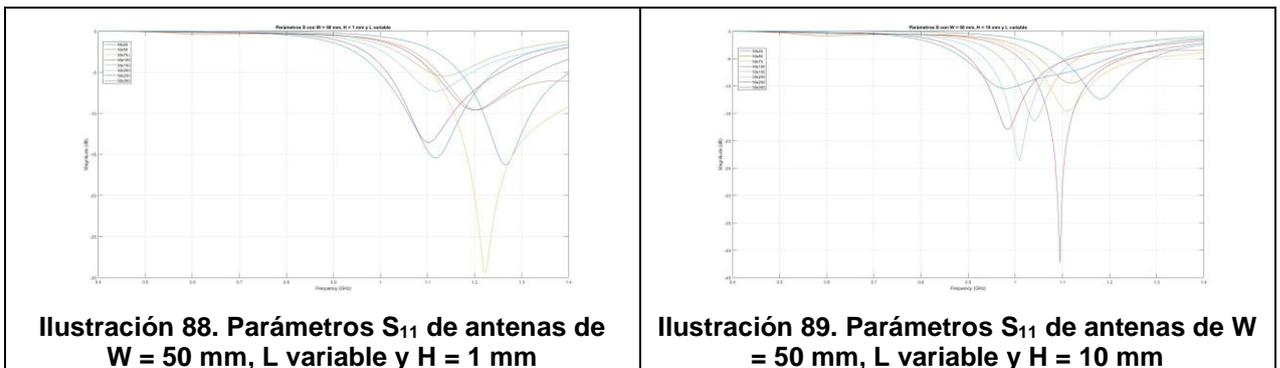
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Cabe destacar que las antenas con la altura fijada a 10 milímetros su frecuencia central está más cerca de 900 MHz que las antenas con la altura fijada a 1 milímetro.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena en ningún caso presenta un comportamiento multi banda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 50 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.
- Las antenas con la altura fijada a 10 milímetros tienen un mejor ancho de banda que las que tienen la altura fijada a 1 milímetro (aproximadamente tiene un 0,7 % de ancho de banda más).

6.2 Ancho de plano de masa fijo a 50 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestran dos gráficas que incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas. En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 50 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 1 milímetro.

En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 50 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 10 milímetros.



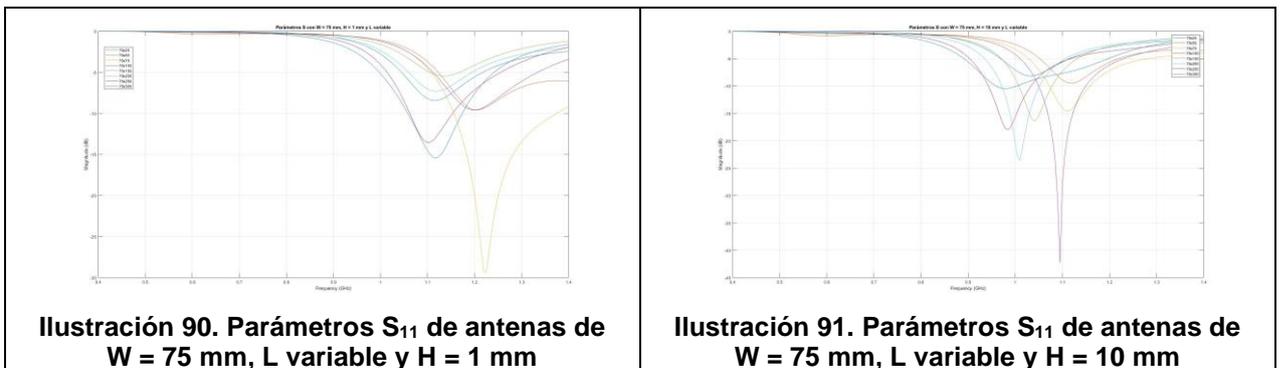
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Cabe destacar que las antenas con la altura fijada a 10 milímetros su frecuencia central está más cerca de 900 MHz que las antenas con la altura fijada a 1 milímetro.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena en ningún caso presenta un comportamiento multi banda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 50 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.
- Las antenas con la altura fijada a 10 milímetros tienen un mejor ancho de banda que las que tienen la altura fijada a 1 milímetro (aproximadamente tiene un 2,8 % de ancho de banda más).

6.3 Ancho de plano de masa fijo a 75 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestran dos gráficas que incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas. En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 75 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 1 milímetro.

En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 75 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 10 milímetros.



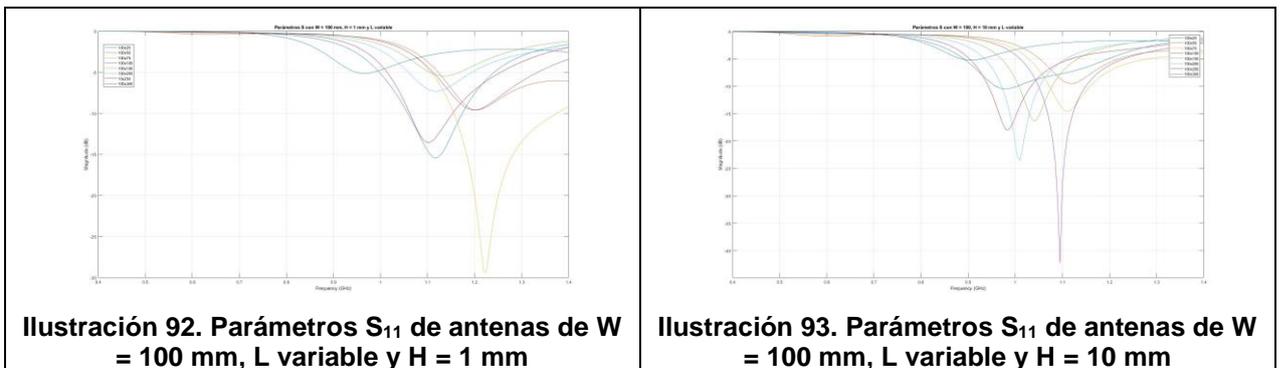
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Cabe destacar que las antenas con la altura fijada a 10 milímetros su frecuencia central está más cerca de 900 MHz que las antenas con la altura fijada a 1 milímetro.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena en ningún caso presenta un comportamiento multi banda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 75 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.
- Las antenas con la altura fijada a 10 milímetros tienen un mejor ancho de banda que las que tienen la altura fijada a 1 milímetro (aproximadamente tiene un 1,4 % de ancho de banda más).

6.4 Ancho de plano de masa fijo a 100 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestran dos gráficas que incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas. En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 100 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 1 milímetro.

En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 100 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 10 milímetros.



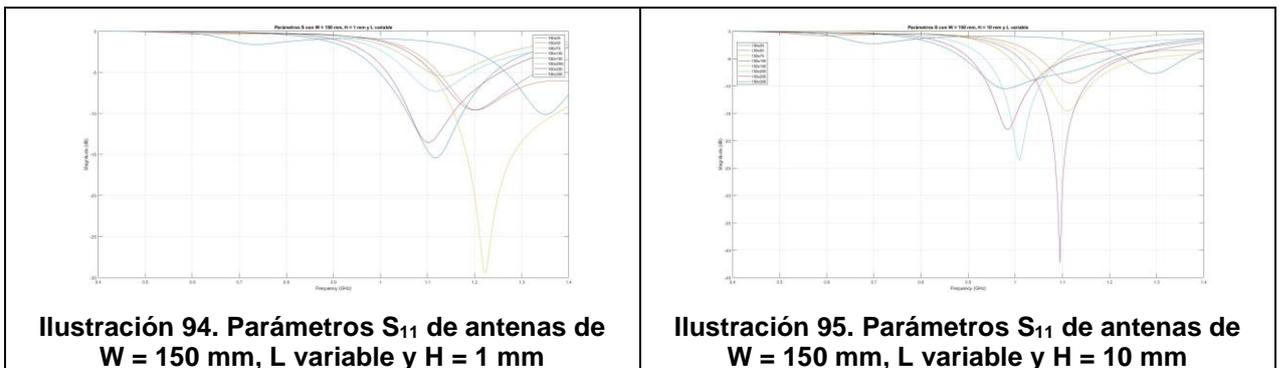
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Cabe destacar que las antenas con la altura fijada a 10 milímetros su frecuencia central está más cerca de 900 MHz que las antenas con la altura fijada a 1 milímetro.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena en ningún caso presenta un comportamiento multi banda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 75 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.
- Las antenas con la altura fijada a 10 milímetros tienen un mejor ancho de banda que las que tienen la altura fijada a 1 milímetro (aproximadamente tiene un 1,5 % de ancho de banda más).

6.5 Ancho de plano de masa fijo a 150 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestran dos gráficas que incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas. En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 150 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 1 milímetro.

En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 150 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 10 milímetros.



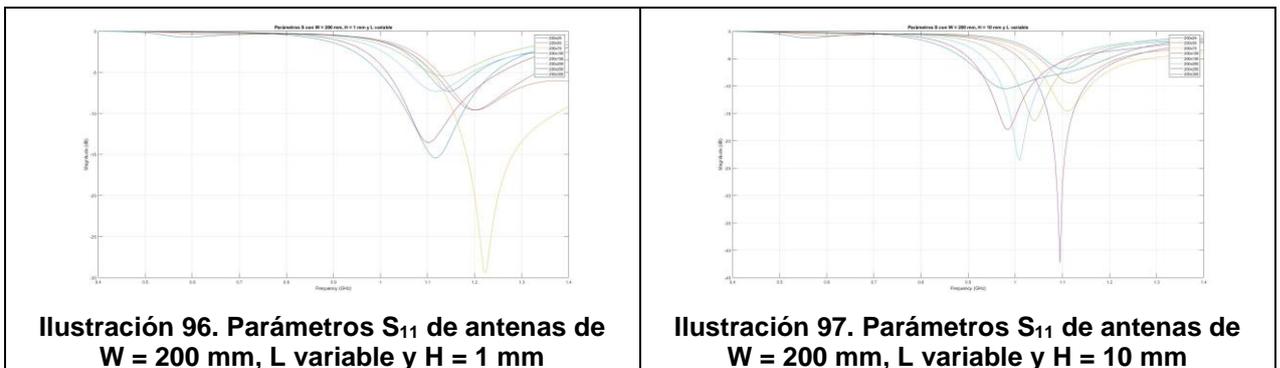
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Cabe destacar que las antenas con la altura fijada a 10 milímetros su frecuencia central está más cerca de 900 MHz que las antenas con la altura fijada a 1 milímetro.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena en ningún caso presenta un comportamiento multi banda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 75 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.
- Las antenas con la altura fijada a 10 milímetros tienen un mejor ancho de banda que las que tienen la altura fijada a 1 milímetro (aproximadamente tiene un 3 % de ancho de banda más).

6.6 Ancho de plano de masa fijo a 200 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestran dos gráficas que incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas. En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 200 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 1 milímetro.

En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 200 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 10 milímetros.



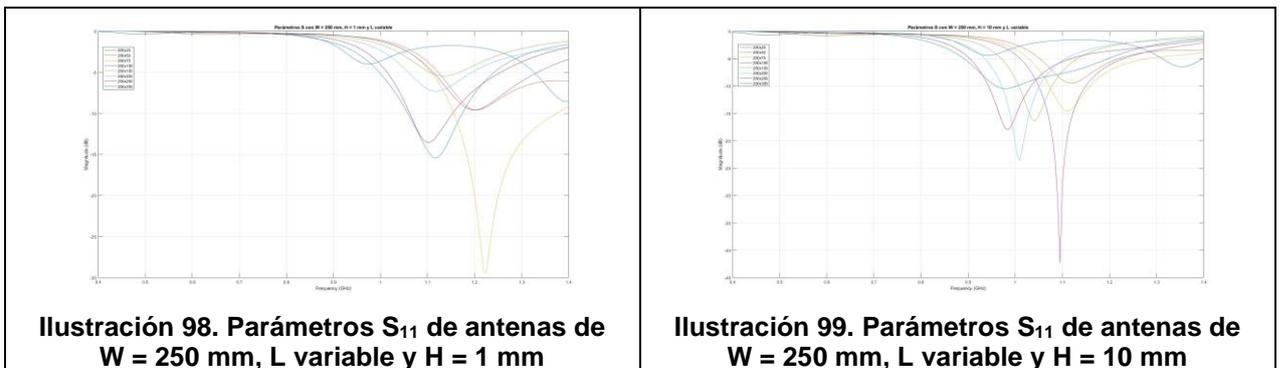
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Cabe destacar que las antenas con la altura fijada a 10 milímetros su frecuencia central está más cerca de 900 MHz que las antenas con la altura fijada a 1 milímetro.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena en ningún caso presenta un comportamiento multi banda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 75 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.
- Las antenas con la altura fijada a 10 milímetros tienen un mejor ancho de banda que las que tienen la altura fijada a 1 milímetro (aproximadamente tiene un 1,5 % de ancho de banda más).

6.7 Ancho de plano de masa fijo a 250 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestran dos gráficas que incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas. En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 250 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 1 milímetro.

En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 250 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 10 milímetros.



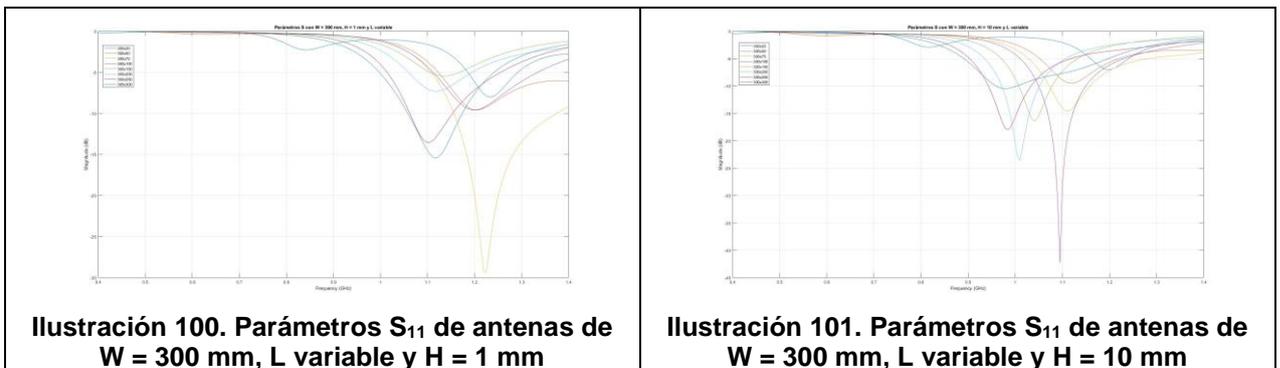
A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Cabe destacar que las antenas con la altura fijada a 10 milímetros su frecuencia central está más cerca de 900 MHz que las antenas con la altura fijada a 1 milímetro.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena en ningún caso presenta un comportamiento multi banda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 75 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.
- Las antenas con la altura fijada a 10 milímetros tienen un mejor ancho de banda que las que tienen la altura fijada a 1 milímetro (aproximadamente tiene un 2,5 % de ancho de banda más).

6.8 Ancho de plano de masa fijo a 300 milímetros y longitud de plano de masa variable

En este apartado se muestran dos gráficas que incluyen los parámetros S_{11} de todas las antenas simuladas. En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 200 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 1 milímetro.

En la gráfica de la izquierda, se ha fijado el ancho de plano de masa a 200 milímetros y la altura de la antena desde el plano de masa a 10 milímetros.



A partir de la tabla anterior donde se representan los parámetros S_{11} de cada una de las antenas simuladas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Al incrementar la longitud del plano de masa, la frecuencia central se desplaza hacia frecuencias más pequeñas. Cabe destacar que las antenas con la altura fijada a 10 milímetros su frecuencia central está más cerca de 900 MHz que las antenas con la altura fijada a 1 milímetro.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, la antena en ningún caso presenta un comportamiento multi banda.
- Al incrementar la longitud del plano de masa, el ancho de banda aumenta hasta los 75 milímetros, a partir de ahí empieza a disminuir y, de nuevo a partir de 250 milímetros que empieza a aumentar.
- Las antenas con la altura fijada a 10 milímetros tienen un mejor ancho de banda que las que tienen la altura fijada a 1 milímetro (aproximadamente tiene un 2,5 % de ancho de banda más).

6.9 Maximización del ancho de banda relativo

En primer lugar y a partir de los apartados anteriores, se ha elaborado la Tabla 3, la cual muestra el ancho de banda relativo calculado, teniendo en cuenta la frecuencia central, la frecuencia inferior y la frecuencia superior de cada una de las antenas simuladas en el rango de frecuencias comentado anteriormente. Esta tabla corresponde a las primeras simulaciones donde se ha fijado el parámetro H a 1 milímetro.

W \ L	25	50	75	100	150	200	250	300
25	8,40	18,12	22,05	0	0	0	26,65	9,21
50	16,03	20,66	18,75	0	0	8,03	22,52	10,53
75	12,12	21,96	32,06	15,31	5,72	11,06	20,13	12,48
100	0	13,13	27,98	19,6	9,44	12,45	17,8	14,14
150	9,62	17,18	17,90	3,45	0	7,81	15,41	18,26
200	6,29	28,35	26,35	16,87	0	9,79	17,67	18,41
250	11,26	16,53	19,47	10,98	0	8,28	17,05	16,38
300	10,53	14,78	17,65	9,61	0	7,27	17,21	16,68

Tabla 3. Ancho de banda relativo en porcentaje en función de W y L con H = 1 mm

A partir de la Tabla 5, mediante Matlab, se ha realizado una distribución de los anchos de banda relativos calculados, en función del ancho y la longitud del plano de masa. En este caso en concreto, el parámetro H vale 1 milímetro. Como se puede observar en la Ilustración 102, las zonas de color azul corresponden a las zonas el cual el ancho de banda es menor y las zonas de color amarillo corresponde a las zonas donde el ancho de banda es mayor.

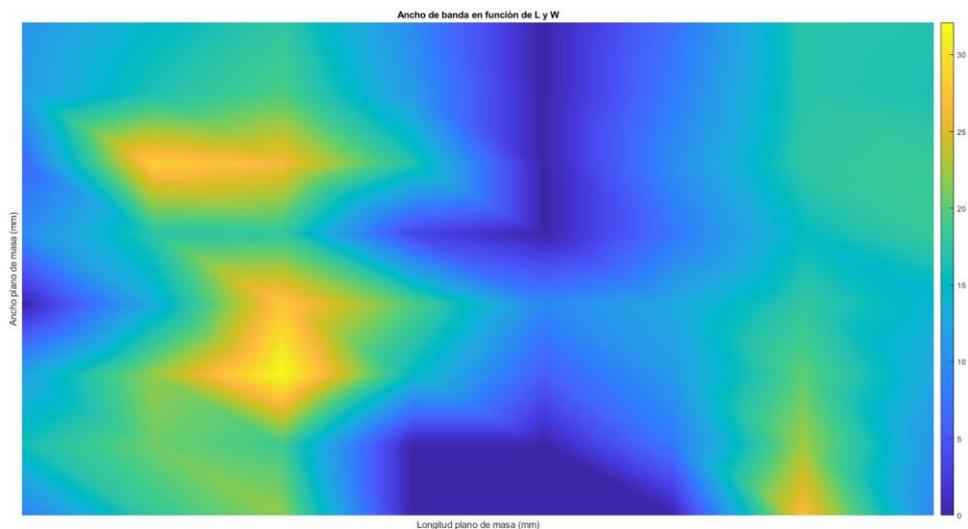


Ilustración 102. Distribución del ancho de banda relativo

A partir de la Tabla 3 también se elabora la Ilustración 103 donde se representa un gráfico para visualizar de manera más clara el ancho de banda.

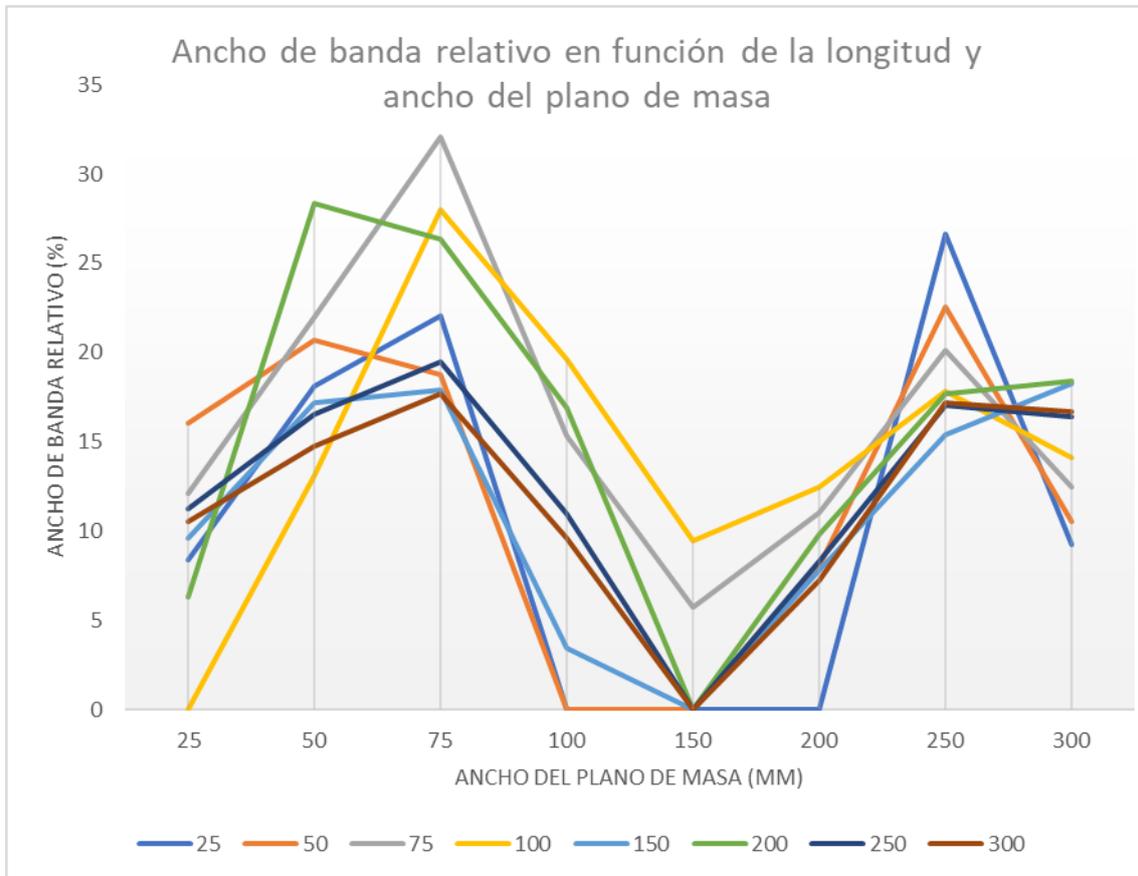


Ilustración 103. Ancho de banda relativo en función de la longitud y ancho del plano de masa

La Ilustración 103 se ha representado en el eje horizontal el ancho del plano de masa, variando estos valores en un rango de 25 hasta 300 mm. En el eje vertical se indica el porcentaje de ancho de banda relativo de las líneas pintadas, las cuales corresponden a cada longitud del plano de masa.

Según las dos figuras anteriores y la Tabla 3, los valores que muestran un mayor ancho de banda relativo son:

- Ancho del plano de masa: aproximadamente 75 milímetros.
- Longitud del plano de masa: aproximadamente 75 milímetros.

Cabe destacar que, a partir de 200 milímetros del ancho del plano de masa, se observa que el ancho de banda empieza a elevarse, pero se ha descartado esos valores o superiores ya que, como se ha comentado anteriormente, el objetivo es hacer antenas lo más pequeñas posibles.

Teniendo en cuenta estos valores obtenidos, se procede y se vuelve a simular la antena en un rango frecuencial cercanos a los valores obtenidos, con menos saltos intermedios entre cada valor para encontrar el valor que maximice el ancho de banda.

En el rango simulado, se encuentra que para maximizar el ancho de banda relativo las medidas tienen que ser

- Ancho del plano de masa: 100 milímetros.
- Longitud del plano de masa: 80 milímetros.

En segundo lugar y a partir de los apartados anteriores, se ha elaborado la Tabla 4, la cual muestra el ancho de banda relativo calculado, teniendo en cuenta la frecuencia central, la frecuencia inferior y la frecuencia superior de cada una de las antenas simuladas en el rango de frecuencias comentado anteriormente. Esta tabla corresponde a las primeras simulaciones donde se ha fijado el parámetro H a 10 milímetro.

W \ L	25	50	75	100	150	200	250	300
25	12,12	14,25	13,90	6,4	7,29	8,98	11,36	13,68
50	13,57	15,77	16,18	12,72	11,35	12,12	19,96	17,35
75	10,49	14,49	20,69	19,44	15,80	15,08	22,24	19,35
100	0	0	21,25	24,94	19,09	17,42	24,15	19,85
150	6,97	12,52	14,64	13,90	12,20	13,94	18,69	20,28
200	5,01	10,71	20,16	18,49	13,91	14,87	23,53	25,56
250	3,18	9,34	19,67	21,33	17,88	16,62	16,53	16,31
300	5,85	24,8	25,56	9,54	0	7,19	17,33	16,59

Tabla 4. Ancho de banda relativo en porcentaje en función de W y L con H = 10 mm

A partir de la Tabla 4, mediante Matlab, se ha realizado una distribución de los anchos de banda relativos calculados, en función del ancho y la longitud del plano de masa. En este caso en concreto, el parámetro H vale 10 milímetros. Como se puede observar en la Ilustración 104, las zonas de color azul corresponden a las zonas el cual el ancho de banda es menor y las zonas de color amarillo corresponde a las zonas donde el ancho de banda es mayor.

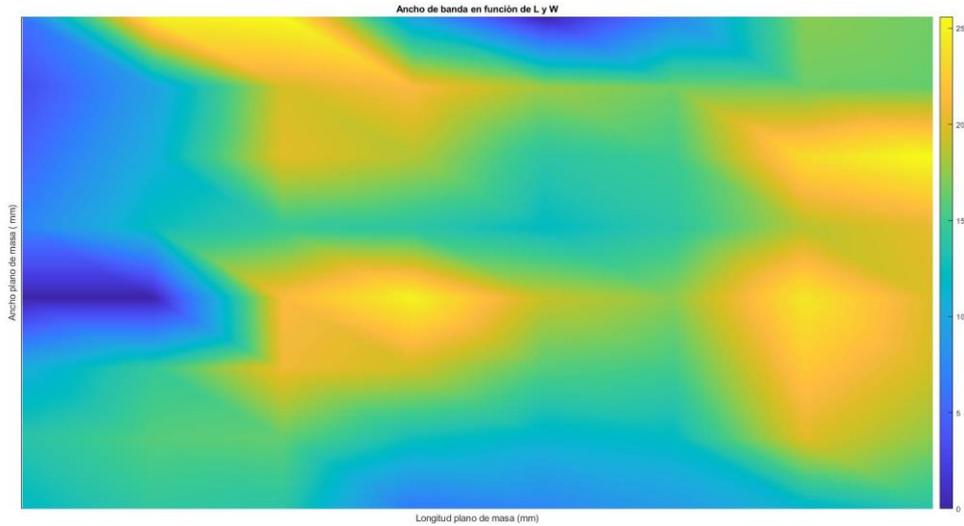


Ilustración 104. Distribución del ancho de banda relativo

A partir de la Tabla 4 se elabora la Ilustración 105 donde se representa un gráfico para visualizar de manera más clara el ancho de banda.

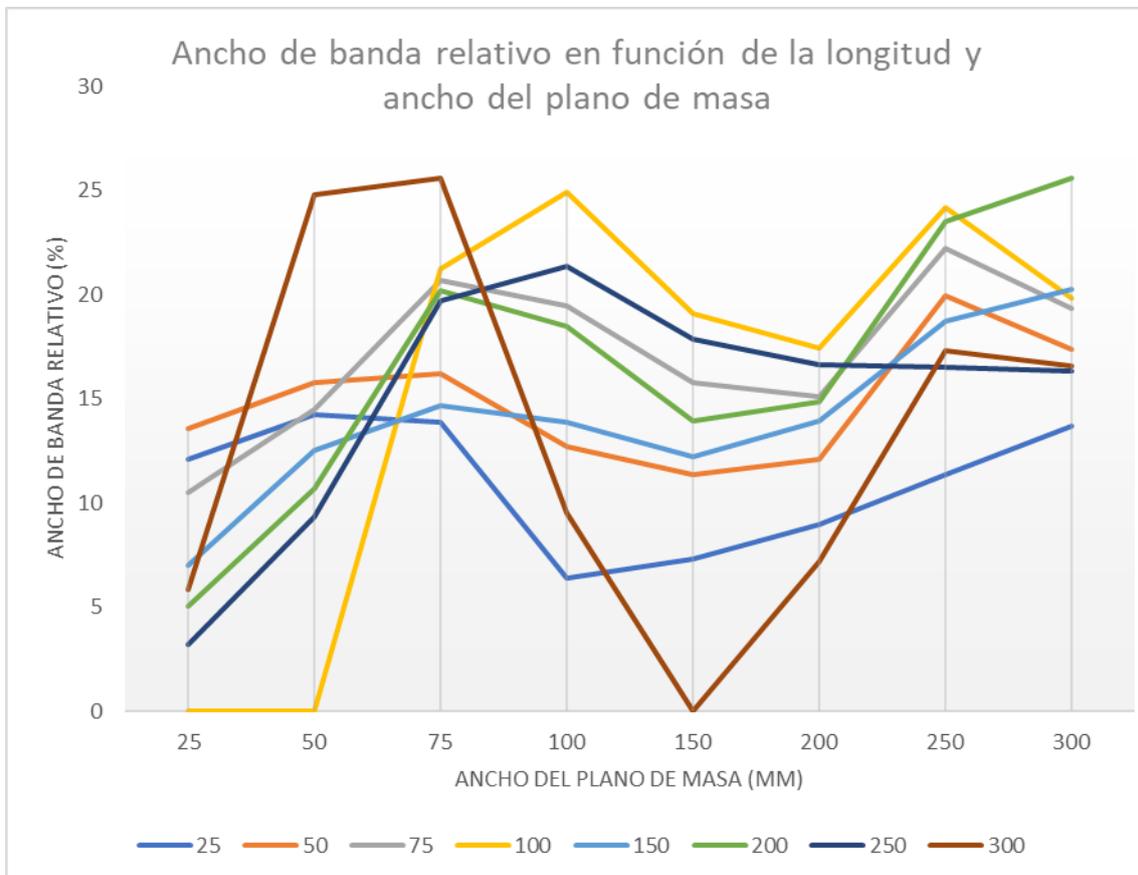


Ilustración 105. Ancho de banda relativo en función de la longitud y ancho del plano de masa

La Ilustración 105 se ha representado en el eje horizontal el ancho del plano de masa, variando estos valores en un rango de 25 hasta 300 mm. En el eje vertical se indica el porcentaje de ancho de banda relativo de las líneas pintadas, las cuales corresponden a cada longitud del plano de masa.

Según las dos figuras anteriores y la Tabla 4, los valores que muestran un mayor ancho de banda relativo son:

- Ancho del plano de masa: aproximadamente 75 milímetros.
- Longitud del plano de masa: aproximadamente 75 milímetros.

Cabe destacar que, a partir de 200 milímetros del ancho del plano de masa, se observa que el ancho de banda empieza a elevarse, pero se ha descartado esos valores o superiores ya que, como se ha comentado anteriormente, el objetivo es hacer antenas lo más pequeñas posibles.

Teniendo en cuenta estos valores obtenidos, se procede y se vuelve a simular la antena en un rango frecuencial cercanos a los valores obtenidos, con menos saltos intermedios entre cada valor para encontrar el valor que maximice el ancho de banda.

En el rango simulado, se encuentra que para maximizar el ancho de banda relativo las medidas tienen que ser:

- Ancho del plano de masa: 105 milímetros.
- Longitud del plano de masa: 100 milímetros.

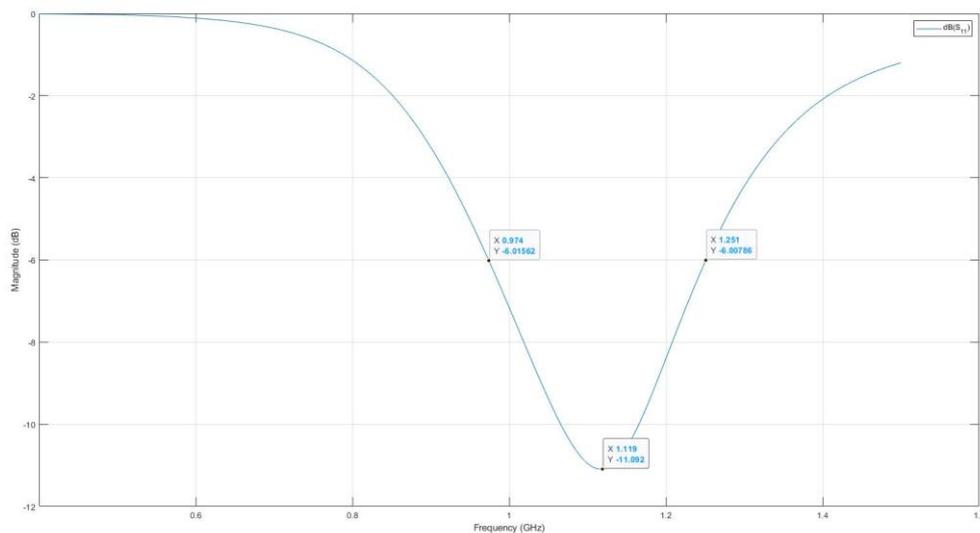


Ilustración 106. Parámetros S11 de antena 110x55

El ancho de banda relativo obtenido es de 24,75 %.

7. Redes de adaptación

Como ya se ha comentado, las redes de adaptación son circuitos que se utilizan para adaptar antenas. En algunas situaciones, la red de adaptación ayuda a la antena a ajustar finamente las bandas de operación que previamente se han determinado con el diseño de la geometría de antena [ja. En otras con los “antenna boosters”, juega un papel determinante pues ofrece la flexibilidad de diseñar las bandas de operación mediante el diseño de la red de adaptación mediante herramientas de síntesis de redes. [8]-[14].

El objetivo de este apartado es utilizar la aplicación Matching Network Designer y la propia función que trae Matlab para generar redes de adaptación a diferentes frecuencias para ver como varia el ancho de banda de la antena generada en el apartado anterior.

7.1 Sistema metódico para utilizar Matching Network Designer

En este capítulo, en primer lugar, se va a seguir un proceso metódico para utilizar la aplicación “Matching Network Designer”, el cual nos permitirá crear redes de adaptación para una frecuencia específica.

En primer lugar, nada más ejecutar la aplicación de “Matching Network Designer”, lo primero que se tiene que hacer es seleccionar cual es la impedancia de la fuente. Habitualmente, esta impedancia suele ser de 50Ω .

En segundo lugar, la aplicación te permite seleccionar un fichero creado con la aplicación Antenna ToolBox. En este caso, se va a utilizar la antena creada con el “Antenna Designer”, una antena del tipo InvertedLcoplanar diseñada a 900 MHz. Además, también se tiene que especificar la frecuencia central y el ancho de banda.

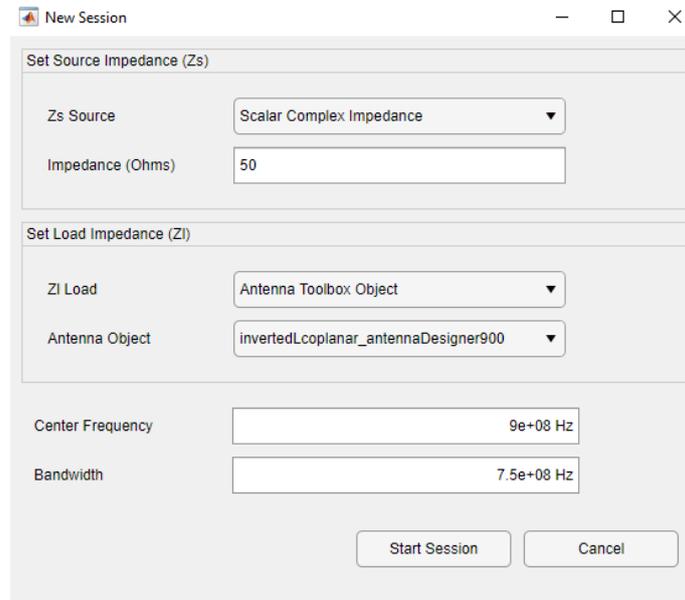


Ilustración 107. Inicio de proyecto en Matching Network Designer

Una vez introducido todos los datos anteriores, la aplicación te permite diseñar redes de adaptación de diferentes topologías, como son:

- Topología Pi.
- Topología T.
- Topología L.
- 3 componentes.

Además de escoger que topología se quiere diseñar, también permite modificar dos parámetros adicionales, que son:

- Frecuencia central. Esta frecuencia se ha especificado en la primera pantalla al inicializar la aplicación.
- Factor de calidad (Q). Como se ha comentado en la parte teórica, el factor de calidad influye en el ancho de banda. Por este motivo, en los dos ejemplos que se realizan a continuación, se puede apreciar que, cogiendo un factor de calidad grande, el ancho de banda se reduce y, cogiendo un factor de calidad pequeño, el ancho de banda es mayor.

En este caso, se ha escogido una topología Pi y un factor de calidad de 50. La Ilustración 108 muestra el resultado obtenido:

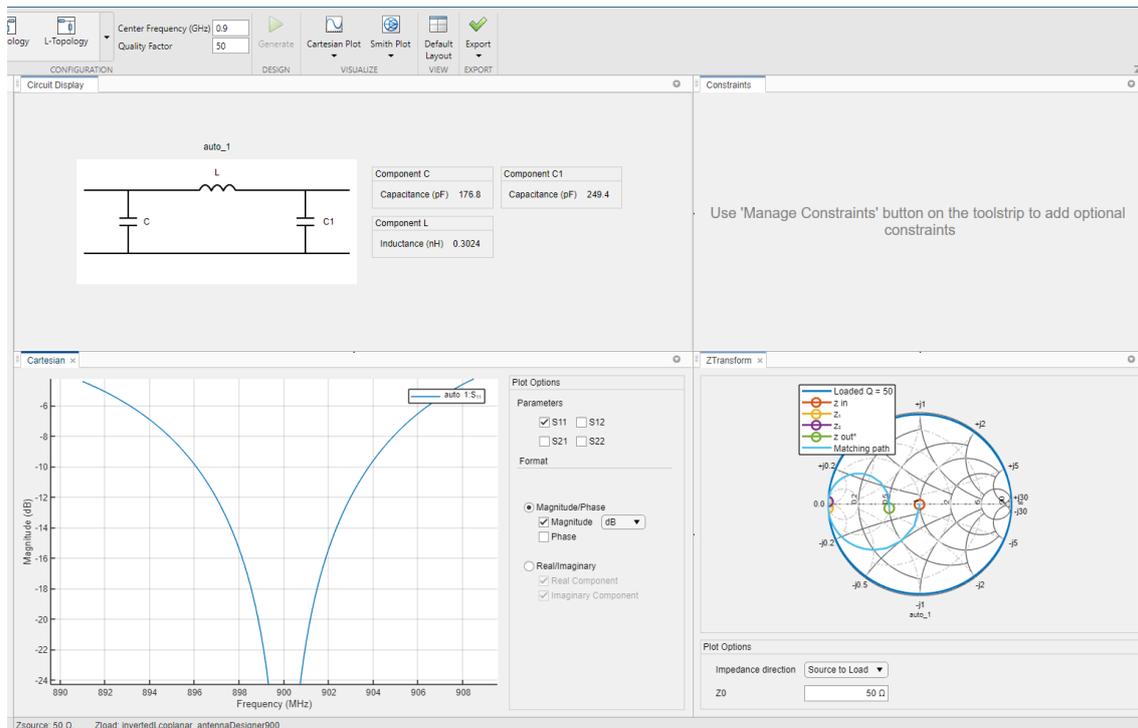


Ilustración 108. Red de adaptación de tipo Pi con Q = 50

Como se puede observar, arriba a la izquierda se especifica que componentes forman la red de adaptación y que valor tienen. Abajo a la izquierda, se muestra el parámetro S11 después de aplicar la red de adaptación. Abajo a la derecha se muestra la Carta de Smith, donde se indica que la Z_{in} que presentaba la antena y la Z_{out} que se obtiene tras introducir la red de adaptación diseñada.

En este caso, se ha escogido una topología Pi y un factor de calidad de 1. La Ilustración 109 muestra el resultado obtenido:

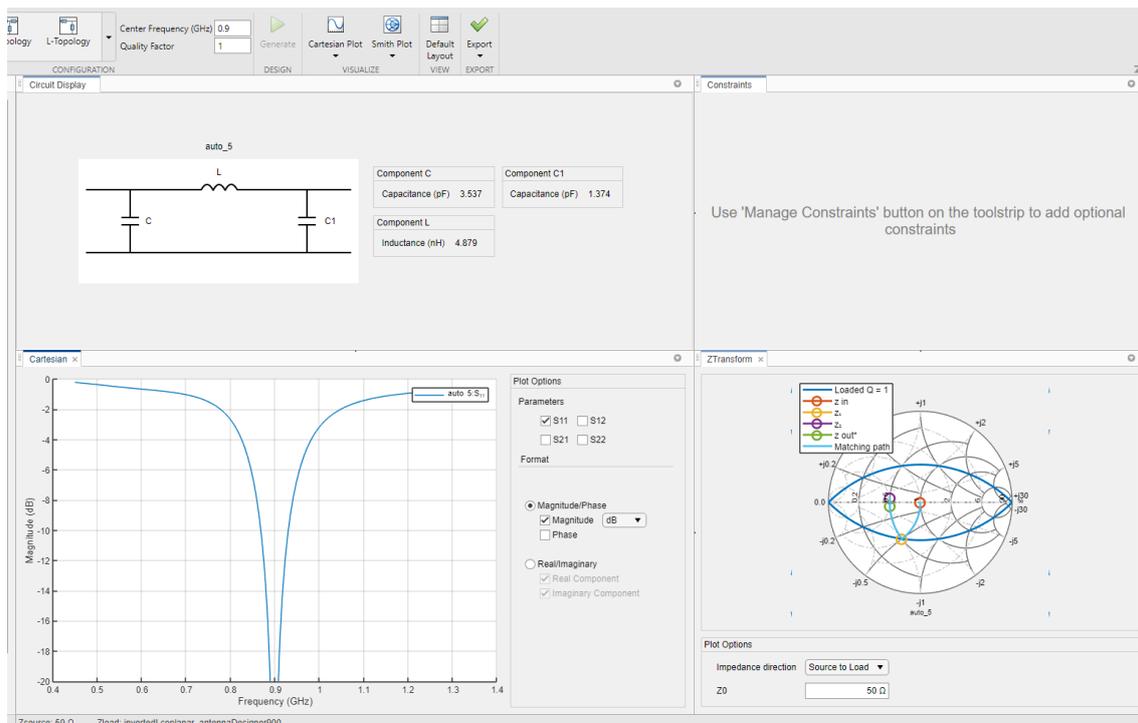


Ilustración 109. Red de adaptación de tipo Pi con Q = 1

Como se ha comentado, el ancho de banda obtenido es mayor, ya que el factor de calidad en este caso es pequeño.

7.2 Diseño de red de adaptación para las antenas optimizadas

Como se ha comprobado, en algunos casos, las redes de adaptación permiten mejorar el ancho de banda de las antenas diseñadas, a la vez que adaptan la antena a la frecuencia específica.

Por este motivo, aprovechando todas las antenas que se han simulado en los apartados anteriores, se han vuelto a simular introduciéndoles una red de adaptación.

Como resultado de estas simulaciones, se ha encontrado que en algunos casos sí que se mejora el ancho de banda y, en otros casos no.

Para no hacer demasiado extenso este apartado con las gráficas de todas las simulaciones, se escoge las dos antenas optimizadas, es decir, las que presentaban el mejor ancho de banda y, a cada una de ellas, se va a buscar la mejor red de adaptación para maximizar el ancho de banda.

En el caso de la antena *InvertedLcoplanar*, con la optimización de las dimensiones se había obtenido un ancho de banda relativo de 56,85 %.

En la Ilustración 110 se observa los parámetros S_{11} que se han obtenido tras buscar la mejor red de adaptación para la antena *InvertedLcoplanar* diseñada y optimizada.

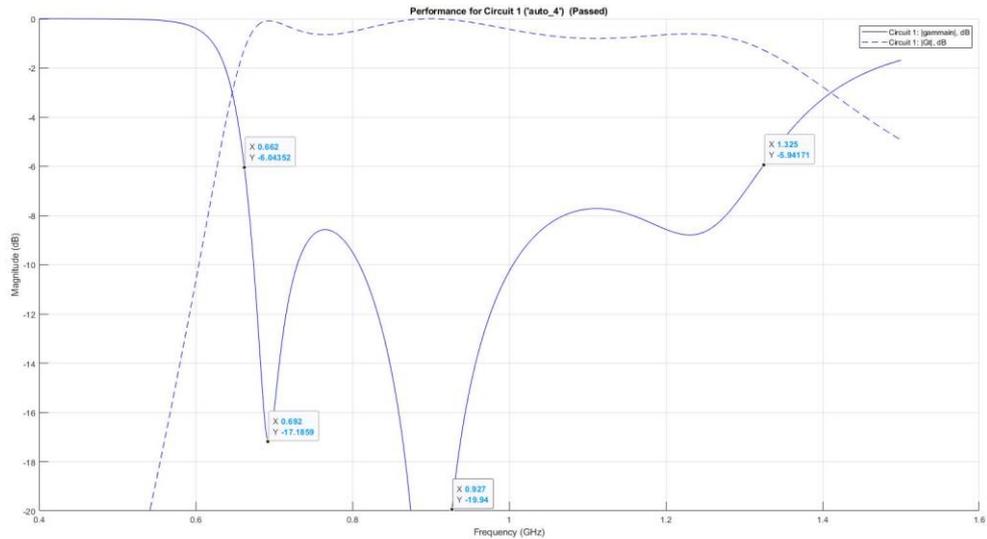


Ilustración 110. Parámetros S11 de antena optimizada y con red de adaptación

En este caso, se ha obtenido un ancho de banda de 73,6 %. Esto quiere decir que, al usar la red de adaptación, además de adaptar la antena a la frecuencia central de 900 MHz, como se puede apreciar en la Ilustración 110, también se ha podido incrementar el ancho de banda en un 17% adicional en comparación a la antena sin ancho de banda.

En la Ilustración 111 se puede observar la Carta de Smith, donde se indica que la Z_{in} que presentaba la antena y la Z_{out} que se obtiene tras introducir la red de adaptación diseñada. En este caso, la antena queda bien adaptada a la frecuencia de 900 MHz.

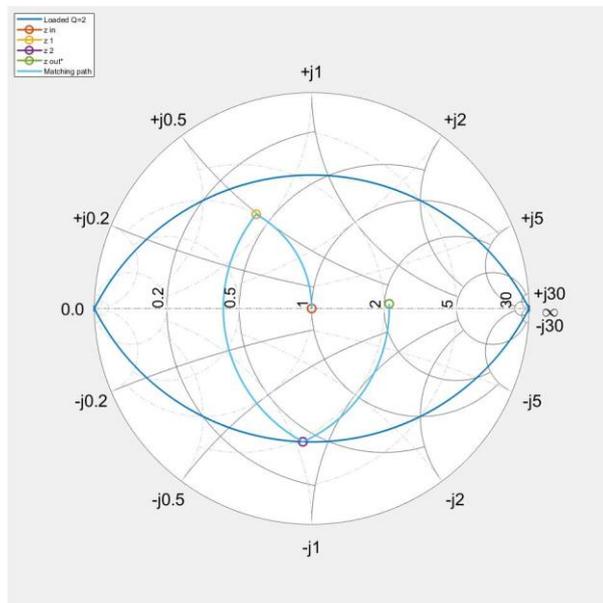


Ilustración 111. Carta de Smith con antena optimizada y con red de adaptación

La Ilustración 112 indica que componentes y que valor tienen los componentes que forman la red de adaptación.

circuitName	component1Type	component1Value	component2Type	component2Value	component3Type	component3Value	
Circuit 1	"auto_4"	"Shunt L"	7.5511e-09	"Series C"	2.6447e-12	"Shunt L"	9.0975e-09

Ilustración 112. Detalles de los componentes de la red de adaptación

En este caso, se trata de una red de adaptación formada por una bobina en paralelo, un condensador en serie y otra bobina en paralelo.

En el caso de la antena InvertedFcoplanar, con la optimización de las dimensiones y se había obtenido un ancho de banda relativo de 24,75 %, en el caso

En la Ilustración 113 se observa los parámetros S_{11} que se han obtenido tras buscar la mejor red de adaptación para la antena InvertedLcoplanar diseñada y optimizada

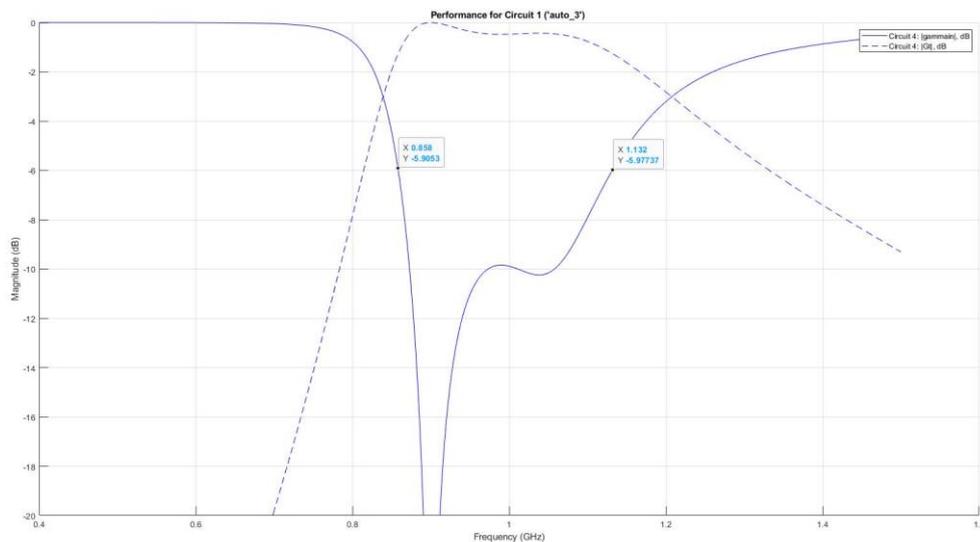


Ilustración 113. Parámetros S_{11} de antena optimizada y con red de adaptación

En este caso, se ha obtenido un ancho de banda de 27,54 %. Esto quiere decir que, al usar la red de adaptación, además de adaptar la antena a la frecuencia central de 900 MHz, como se puede apreciar en la Ilustración 113 también se ha podido incrementar el ancho de banda en un 2,8% adicional en comparación a la antena sin ancho de banda.

En la Ilustración 114 se puede observar la Carta de Smith, donde se indica que la Z_{in} que presentaba la antena y la Z_{out} que se obtiene tras introducir la red de adaptación diseñada. En este caso, la antena queda bien adaptada a la frecuencia de 900 MHz.

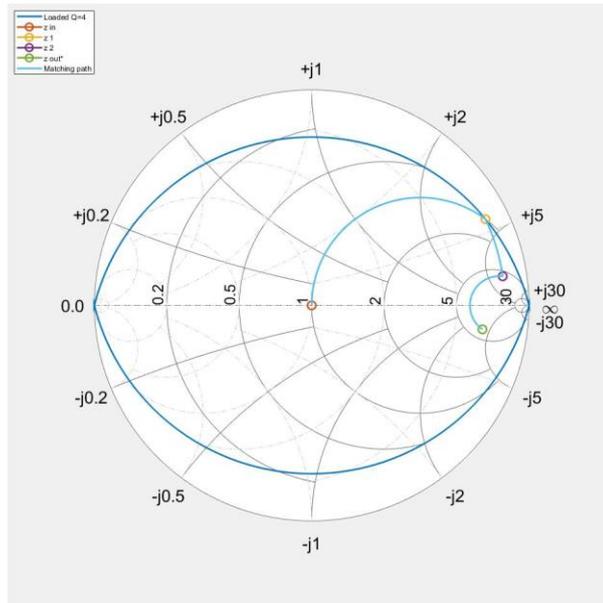


Ilustración 114. Carta de Smith con antena optimizada y con red de adaptación

La Ilustración 115 indica que componentes y que valor tienen los componentes que forman la red de adaptación.

circuitName	component1Type	component1Value	component2Type	component2Value	component3Type	component3Value	
Circuit 1	"auto_2"	"Series L"	3.5368e-08	"Shunt C"	5.6315e-13	"Series C"	2.9362e-13

Ilustración 115. Detalles de los componentes de la red de adaptación

En este caso, se trata de una red de adaptación formada por una bobina en serie, un condensador en paralelo y un condensador en serie.

8. Conclusiones

Para finalizar este trabajo Final de Máster, en este último capítulo se exponen las conclusiones obtenidas.

En primer lugar, se ha demostrado que Matlab ofrece una serie de aplicaciones muy útiles. En este caso, se ha demostrado que tanto “Antenna Designer” como “Matching Network Designer” son aplicaciones simples pero que ofrecen un gran potencial a la hora de simular y diseñar antenas incluidas en su extensa librería.

Además, se ha establecido un proceso metódico, tanto para la aplicación “Antenna Designer” como para la aplicación “Matching Network Designer” para que cualquier usuario poco familiarizado con estas aplicaciones sea capaz de utilizarlo de manera simple, ya sea diseñando antenas y simulándolas y crear nuevas redes de adaptación.

La otra conclusión que se ha obtenido es que al simular las antenas InvertedLcoplanar y la antena InvertedFcoplanar, se ha visto que variando los parámetros de las dimensiones del plano de masa se puede mejorar el ancho de banda. En estos casos, se ha conseguido maximizar los anchos de banda para cada tipo de antena y, además, se ha comprobado que usando las redes de adaptación se han podido mejorar los anchos de banda que presentaban esas antenas. Cabe destacar que se ha conseguido un ancho de banda muy superior con la InvertedLcoplanar.

Este trabajo servirá en un futuro de cara a nuevos usuarios de Matlab y nuevas investigaciones a avanzar con diseños y simulaciones de antenas y redes de adaptación sin tener que hacer uso de software especializado.

9. Bibliografía

- [1] J. Anguera and A. Pérez, “Teoría de Antenas”, Ingeniería La Salle, 2008.
- [2] Pozar, D.M., “Microwave engineering”, Fourth Edition, John Wiley and Sons, 2015.
- [3] “Antenna Designer”.
https://es.mathworks.com/help/antenna/ref/antennadesigner-app.html?searchHighlight=antenna%20designer&s_tid=srchtitle_antenna%20designer_1
- [4] “Design and Analysis Using Antenna Designer App”.
<https://es.mathworks.com/help/antenna/gs/antenna-design-and-analysis-using-antenna-designer-app.html>
- [5] “Create matching network for 1-port network and generate circuit object”.
https://es.mathworks.com/help/rf/ref/matchingnetwork.html?searchHighlight=matchingnetwork&s_tid=srchtitle
- [6] “InvertedLcoplanar. Create inverted-L antenna over rectangular ground plane”.
https://es.mathworks.com/help/antenna/ref/invertedl.html?s_tid=doc_ta
- [7] “InvertedFcoplanar. Create inverted-F antenna in same plane as rectangular ground plane”.
https://es.mathworks.com/help/antenna/ref/invertedfcoplanar.html?s_tid=doc_ta
- [8] Jaume Anguera, Cristina Picher, Adrián Bujalance, and Aurora Andújar, “Ground Plane Booster Antenna Technology for Smartphones and Tablets”, Microwave and Optical Technology Letters, vol.58, no. 6, pp.1289-1294, June 2016.
- [9] Jaume Anguera, Aurora Andújar, Guzmán Mestre, Jussi Rahola, and Jaakko Juntunen, “Design of Multiband Antenna Systems for Wireless Devices Using Antenna Boosters”, IEEE Microwave Magazine, Dec. pp.102-114, 2019.
- [10] Jaume Anguera, Aurora Andujar, José L. Leiva, Oriol Massó, Joakim Tonnesen, Endre Rindalsholt, Rune Brandsegg, Roberto Gaddi, “Reconfigurable Multiband Operation for Wireless Devices Embedding Antenna Boosters”. Electronics 2021, 10, 808.

[11] Jaume Anguera, Aurora Andújar, and Carlos García, “Multiband and Small Coplanar Antenna System for Wireless Handheld Devices”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.61, no. 7, pp. 3782-3789, July 2013.

[12] Jaume Anguera, Aurora Andújar, Minh-Chau Huynh, Charlie Orlenius, Cristina Picher, and Carles Puente, “Advances in Antenna Technology for Wireless Handheld Devices”, International Journal on Antennas and Propagation, Volume 2013, Article ID 838364.

[13] Jaume Anguera, Alejandro Fernández, Carles Puente, Aurora Andújar, Jaap Groot, “Antenna Boosters versus Flexible Printed Circuit Antennas for IoT Devices”. Signals 2022, 3, 326-340.

[14] Cristina Picher, Jaume Anguera, Adrián Bujalance, and Aurora Andújar, “Ground Plane Booster Antenna Technology using a Self-Diplexed Matching Network for Multiband Operation”, Microwave and Optical Technology Letters, vol.58, no. 2, pp.453-461, February 2016.