



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Método optimizado de diseño de filtros paso banda en guía  
de onda con inclusión de ceros de transmisión

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Junczyk Valcárcel, Lorena Aitana

Tutor/a: Baquero Escudero, Mariano

Cotutor/a: Boria Esbert, Vicente Enrique

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## Resumen

En el presente trabajo se va a realizar un estudio sobre la inserción de ceros en un filtro paso banda con el propósito de reducir la señal transmitida en la banda eliminada. Más en concreto, este estudio se va a realizar empleando un filtro de orden 4 con cinco iris, al que se le van a sustituir dos ventanas para introducir un cero en cada tramo de la banda eliminada.

Se va a comenzar realizando el modelo del filtro ideal para observar el comportamiento de la respuesta en frecuencia. A partir de este, cambiando, en primer lugar, las líneas ideales por guías dispersivas, y, posteriormente, los inversores en T por iris, se va a estudiar la respuesta del filtro y cómo varían sus parámetros en función de los elementos que lo componen.

Finalmente, se estudiará la inserción de ceros a cada lado de la banda obteniendo la constante de inversión necesaria para, a continuación, realizar un estudio acerca de las estructuras que permitirán obtener los resultados buscados.

## Resum

En el present treball es va a realitzar un estudi sobre la inserció de zeros en un filtre pas banda amb el propòsit de reduir el senyal transmés en la banda eliminada. Més en concret, aquest estudi es realitzarà emprant un filtre d'ordre 4 amb cinc iris, al qual se li substituiran dues finestres per introduir un zero en cada tram de la banda eliminada. Es començarà realitzant el model del filtre ideal per observar el comportament de la resposta en freqüència. A partir d'aquest, canviant, en primer lloc, les línies ideals per guies dispersives, i, posteriorment, els inversors en T per iris, s' estudiarà la resposta del filtre i com varien els seus paràmetres en funció dels elements que el componen. Finalment, s' estudiarà la inserció de zeros a cada costat de la banda obtenint la constant d' inversió necessària per, a continuació, realitzar un estudi sobre les estructures que permetran obtenir els resultats buscats.

## Abstract

In the present work, a study will be carried out on the insertion of zeros in a bandpass filter in order to reduce the signal transmitted in the eliminated band. More specifically, this study will be carried out using an order 4 filter with five irises, which will be replaced by two windows to introduce a zero in each section of the eliminated band. It will be started by modelling the ideal filter to observe the behaviour of the frequency response. From this, changing, firstly, the ideal lines for dispersive guides, and, subsequently, the T-inverters for irises, the response of the filter and how its parameters vary depending on the elements that compose it will be studied. Finally, the insertion of zeros on each side of the belt will be studied, obtaining the necessary inversion constant to then carry out a study on the structures that will allow the desired results to be obtained.

## RESUMEN EJECUTIVO

La memoria del TFG del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación debe desarrollar en el texto los siguientes conceptos, debidamente justificados y discutidos, centrados en el ámbito de la ingeniería de telecomunicación

CONCEPT (ABET)	CONCEPTO (traducción)	¿Cumple? (S/N)	¿Dónde? (páginas)
1. IDENTIFY:	1. IDENTIFICAR:		
1.1. Problem statement and opportunity	1.1. Planteamiento del problema y oportunidad	S	1
1.2. Constraints (standards, codes, needs, requirements & specifications)	1.2. Toma en consideración de los condicionantes (normas técnicas y regulación, necesidades, requisitos y especificaciones)	S	2, 7-8
1.3. Setting of goals	1.3. Establecimiento de objetivos	S	1
2. FORMULATE:	2. FORMULAR:		
2.1. Creative solution generation (analysis)	2.1. Generación de soluciones creativas (análisis)	S	4-11
2.2. Evaluation of multiple solutions and decision-making (synthesis)	2.2. Evaluación de múltiples soluciones y toma de decisiones (síntesis)	S	12-38
3. SOLVE:	3. RESOLVER:		
3.1. Fulfilment of goals	3.1. Evaluación del cumplimiento de objetivos	S	39
3.2. Overall impact and significance (contributions and practical recommendations)	3.2. Evaluación del impacto global y alcance (contribuciones y recomendaciones prácticas)	S	39



## Índice

Capítulo 1.	Introducción .....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Software utilizado.....	2
1.4	Estructura del trabajo .....	3
Capítulo 2.	Planteamiento teórico.....	4
2.1	Teoría de inversores.....	4
2.2	Teoría de filtros.....	5
2.3	Filtro paso banda con inversores.....	6
2.4	Especificaciones del filtro a diseñar .....	7
2.5	Obtención funciones de $K_o$ y $m_{k_o}$ en función de $W$ .....	9
2.5.1	Obtención anchos de ventana en CST .....	9
2.5.2	Obtención funciones $K_o$ y $m_{k_o}$ en Matlab.....	10
Capítulo 3.	Diseño del filtro .....	12
3.1	Filtro ideal.....	12
3.2	Filtro con guías reales.....	14
3.3	Filtro con iris.....	17
3.3.1	Filtro diseñado con iris en AWR.....	17
3.3.2	Filtro diseñado con iris en CST .....	21
3.3.3	Filtro diseñado con iris en Fest 3D.....	23
Capítulo 4.	Inserción de ceros en la respuesta .....	26
4.1	Inserción del cero en la banda superior de la frecuencia central.....	26
4.2	Inserción del cero en la banda inferior de la frecuencia central.....	27
4.3	Inserción de dos ceros en el filtro de orden cuatro .....	28
4.4	Obtención de parámetros para la ventana .....	30
4.4.1	Parámetros para la segunda ventana.....	31
4.4.2	Parámetros para la tercera ventana.....	32
4.5	Filtro con dos ceros introducidos en CST.....	33
Capítulo 5.	Conclusiones y propuesta de trabajo futuro .....	39
5.1	Conclusiones.....	39



5.2 Propuesta de trabajo futuro .....	39
Bibliografía .....	40
Anexo I. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 .....	41



## Índice de figuras

Figura 1. Representación del inversor y las impedancias de entrada y salida.....	4
Figura 2. Inversor en forma de T.....	4
Figura 3. Ejemplo de inversor con bobinas y condensadores. ....	4
Figura 4. Circuito equivalente en T de un inversor. [2] .....	5
Figura 5. Ventana inductiva. [2].....	5
Figura 6. Ejemplo transmisión filtro paso banda. [7].....	6
Figura 7. Prototipo paso bajo con inversores. [8].....	6
Figura 8. Prototipo paso banda con inversores y resonadores en serie. [8].....	7
Figura 9. Filtro con inversores conectados mediante líneas de $\lambda/2$ .....	7
Figura 10. Filtro que se desea recrear. [2].....	7
Figura 11. Parámetros necesarios para obtener los coeficientes g. [9].....	8
Figura 12. Curvas del filtro de Chebychev de orden 4. [9].....	8
Figura 13. Inversor empleado para obtener ecuaciones de K y m en función de W .....	9
Figura 14. Ventana del inversor empleado.....	9
Figura 15. Valores de K en función de f obtenidos en CST.....	10
Figura 16. Función de K dependiente de W.....	10
Figura 17. Función de m dependiente de W.....	11
Figura 18. Aproximación lineal de K en función de W. ....	12
Figura 19. Equivalente en T de un inversor. ....	13
Figura 20. Esquemático ideal del filtro. ....	13
Figura 21. Imagen ampliada del filtro ideal. ....	13
Figura 22. Respuesta en frecuencia del filtro ideal .....	14
Figura 23. Esquemático completo filtro real .....	15
Figura 24. Esquemático filtro real ampliado .....	16
Figura 25. Ecuaciones de K para optimizar la respuesta del filtro.....	16
Figura 26. Ecuaciones de m para optimizar la respuesta del filtro.....	16
Figura 27. Respuesta en frecuencia del filtro real .....	17
Figura 28. Inversor en CST .....	18
Figura 29. Valor de phi en función del ancho de ventana.....	18
Figura 30. Muestras de phi en función de W. ....	19
Figura 31. Gráfica de phi dependiente de W.....	19
Figura 32. Esquemático del filtro real con iris .....	20
Figura 33. Esquemático del filtro real con iris ampliado .....	20
Figura 34. Respuesta del filtro con iris antes de ser optimizado. ....	20



Figura 35. Respuesta en frecuencia del filtro real con implementación de iris.....	21
Figura 36. Bloque del primer inversor del filtro en CST. ....	22
Figura 37. Parámetros de creación de la primera ventana.....	22
Figura 38. Filtro con 5 iris implementado en CST.....	22
Figura 39. Respuesta en frecuencia del filtro con iris en CST .....	23
Figura 40. Cuadro de propiedades de una línea en Fest 3D.....	23
Figura 41. Cuadro de propiedades de un iris en Fest 3D. ....	23
Figura 42. Bloque Step de unión de elementos.....	23
Figura 43. Diseño del filtro con iris en Fest 3D.....	23
Figura 44. Representación del filtro con iris implementado en Fest 3D.....	24
Figura 45. Respuesta en frecuencia del filtro en Fest 3D sin optimizar.....	24
Figura 46. Respuesta en frecuencia del filtro en Fest 3D después de la optimización.....	25
Figura 47. Ventana que se desea implementar para sustituir iris [2].....	26
Figura 48. Ecuaciones del filtro para introducir un cero en la tercera posición.....	26
Figura 49. Objetivos para introducir un cero en 11.3 GHz. ....	27
Figura 50. Respuesta en frecuencia con un cero introducido en la banda superior.....	27
Figura 51. Objetivos de la inserción de un cero en la banda inferior.....	28
Figura 52. Respuesta en frecuencia con un cero introducido en la banda inferior.....	28
Figura 53. Ecuaciones resultantes tras cambiar el segundo y el tercer inversor. ....	28
Figura 54. Esquemático del filtro introduciendo dos ceros.....	29
Figura 55. Respuesta en frecuencia del filtro con dos ceros introducidos. ....	29
Figura 56. Objetivos de optimización para la inserción de dos ceros. ....	29
Figura 57. Parámetros de la ventana a implementar [2].....	30
Figura 58. Variación de K en función de los distintos parámetros. [2].....	30
Figura 59. Gráfica de K para introducir el cero inferior. ....	31
Figura 60. Segunda ventada del filtro. ....	31
Figura 61. Gráfica de phi para la segunda ventana. ....	32
Figura 62. Gráfica de la K de la tercera ventana.....	32
Figura 63. Tercera ventana del filtro.....	33
Figura 64. Gráfica de phi para la tercera ventana.....	33
Figura 65. Gráfica de phi para la primera, cuarta y quinta ventana. ....	33
Figura 66. Cálculos para la obtención de las longitudes de las líneas del filtro.....	34
Figura 67. Filtro para introducir dos ceros en la respuesta. ....	35
Figura 68. Ventanas del filtro en CST.....	35
Figura 69. Simulación del filtro diseñado en CST.....	36
Figura 70. Esquemático en Fest para introducir dos ceros.....	36



Figura 71. Especificaciones para una óptima precisión. ....	36
Figura 72. Filtro sin optimizar en Fest 3D. ....	37
Figura 73. Filtro optimizado en Fest 3D. ....	37



## Índice de tablas

Tabla 1. Coeficientes g del filtro de Chebychev de orden 4. ....	9
Tabla 2. Comparación entre $K_0$ teórica y $K_0$ obtenida en función de W en el filtro ideal. ....	14
Tabla 3. Comparativa $K_0$ con y sin dispersión. ....	15
Tabla 4. Comparación resultados $K_0$ en el filtro con guías dispersivas.....	17
Tabla 5. Comparativa W antes y después de optimizar el diseño. ....	21
Tabla 6. Comparación de parámetros antes y después de la optimización.....	25
Tabla 7. Parámetros que se van a introducir en el filtro.....	34
Tabla 8. Comparación de parámetros tras la optimización en Fest 3D.....	38

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Introducción

Uno de los elementos más importantes en el campo de las telecomunicaciones es el filtro, debido a su capacidad de modificar las señales transmitidas y de enfocarse únicamente en las frecuencias deseadas, atenuando lo máximo posible el resto de las frecuencias [1].

Uno de los filtros más utilizados es el filtro paso banda. Este filtro permite escoger cualquier rango de frecuencias y transmitir únicamente la señal de ese rango, atenuando las señales fuera de este rango; esta sería la descripción de un filtro ideal paso banda, donde el rango de frecuencias transmitido es la banda de paso, mientras que el resto de las frecuencias conforman la banda eliminada. Sin embargo, el filtro real presenta una tercera banda, la banda de transición, la cual está formada por el rango de frecuencias entre la banda de paso y la eliminada; esta banda es la que produce más interferencias y problemas a la hora de transmitir una señal.

Debido a esta banda, muchas investigaciones acerca de la mejora de filtros consisten en reducir lo máximo posible la banda de transición, intentando asemejar el filtro real a uno ideal. Para ello, se han estudiado diferentes métodos, siendo uno de ellos la inserción de ceros en la transmisión de la señal. Esto permitiría que la caída de la señal fuese más abrupta, para cumplir los objetivos de los ceros introducidos, quedando el resto de la señal de la banda eliminada muy atenuada.

Actualmente, en la industria inalámbrica se emplean filtros de resonadores acoplados con ceros de transmisión con acoplamientos cruzados. Sin embargo, es complicado implementar este tipo de ceros en filtros de cavidad de guía sin añadirles una complejidad excesiva. Por ello, cada vez se realizan más estudios acerca de las ventajas que puede suponer emplear elementos con acoplos dispersivos en el diseño de los filtros para introducir ceros sin acoplos cruzados [2].

Por tanto, a lo largo de este trabajo se van a estudiar las respuestas en frecuencia de los filtros diseñados, comenzando por el filtro ideal, donde se observará la respuesta del filtro al imponerle un parámetro  $S_{11}$  por debajo de -23 dB en la banda de transmisión y un parámetro  $S_{12}$  muy bajo en la banda eliminada.

Una vez completado este diseño, se estudiarán sus diferencias con el filtro real al cambiar las líneas ideales por guías dispersivas, con los cambios que esto produce a la hora de realizar determinados cálculos. Posteriormente, también se sustituirán los inversores en T empleados en estos dos casos por 5 iris y se emplearán diversos programas con diferentes precisiones para lograr obtener el mejor estudio posible acerca de este diseño.

Este diseño será la base de la que se partirá para intentar introducir los dos ceros deseados puesto que se sustituirán dos de las ventanas de este diseño del filtro por unas estructuras distintas que permitan que a las frecuencias requeridas el valor del parámetro  $S_{12}$  sea cero, para generar una caída de la señal abrupta y reducir el resto de la señal transmitida en la banda eliminada.

Tras obtener estos parámetros, se realizará el diseño final del filtro empleando los nuevos parámetros obtenidos y se comprobará que los resultados obtenidos son los esperados, presentando dos ceros a las frecuencias esperadas, con una señal transmitida en la banda eliminada reducida, y con una menor banda de transición.

### 1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es reducir la banda de transición presente entre la banda de transmisión y la banda eliminada. Para ello, se opta por estudiar qué efectos produce la inserción de ceros y la caída de señal impuesta por ellos, con el objetivo de comprobar si se logra generar una caída más abrupta una vez se encuentra fuera de la banda de paso. En caso de lograrse los

resultados esperados, la calidad de la señal aumentará al estar más acotada y se reducirán las posibles interferencias que produzca la banda de transición.

Con el objetivo de aprovechar elementos dispersivos para insertar ceros sin acoplos cruzados, lo cual ocurre al emplear resonadores acoplados, se decide que se va a realizar el estudio sobre la inserción de ceros empleando guías dispersivas. Por tanto, se comenzará el trabajo diseñando el filtro ideal de orden cuatro correspondiente para, posteriormente, ir cambiando determinados elementos conforme se obtengan los resultados buscados; de esta manera, se analizará la respuesta en frecuencia resultante de cada diseño para comprobar si los resultados obtenidos son los esperados y las posibles variaciones ocurridas en los parámetros del filtro en función de los elementos empleados en dicho diseño, como los anchos de ventana y las longitudes de las líneas.

Más en concreto, la inserción de los dos ceros se va a realizar partiendo de un filtro de orden cuatro cuyas cinco ventanas son iris, dos de los cuales van a ser sustituidos para conseguir implementar los dos ceros a partir de unas estructuras nuevas cuyos parámetros se deberán calcular en función de las constantes de inversión teóricas obtenidas al introducir cada uno de los ceros en las frecuencias buscadas.

### 1.3 Software utilizado

A lo largo del trabajo se han empleado los siguientes programas con el objetivo de obtener funciones de diversos parámetros y simulaciones de los filtros creados. Además, para crear y simular los filtros se han empleado varios programas en función de la precisión y la velocidad de simulación requerida en cada caso.

Matlab es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. Además, combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente. [3]. Este programa se ha empleado, específicamente, su app Curve Fitter, para obtener funciones de determinados parámetros en función del ancho de ventana del inversor; estas funciones se han calculado a partir de un número determinado de muestras obtenidas de los valores de los parámetros para cada ancho implementado.

El resto de los programas utilizados han sido AWR Microwave Office, CST Studio Suite y Fest 3D, los cuales se han empleado con el objetivo de crear los diseños de los filtros correspondientes, obtener su respuesta en frecuencia y compararlas en los casos oportunos. Además, a partir de estos programas, se han obtenido los parámetros óptimos requeridos en cada caso gracias a su función de optimización.

AWR Microwave Office es un software de diseño de circuitos que proporciona simulaciones precisas para el desarrollo de productos de RF/microondas. Este programa permite conseguir resultados rápidos y precisos para las simulaciones realizadas. Se emplea principalmente para el diseño de amplificadores, filtros, antenas y mezcladores [4]. A lo largo de este trabajo se ha empleado este programa que, gracias a su velocidad de simulación, permitía realizar optimizaciones en poco tiempo para conseguir los mejores parámetros posibles. Sin embargo, para los casos en los que se requería una precisión mayor, se han empleado otros programas, puesto que éste no tiene en cuenta el acoplo entre los modos de orden superior de distintas discontinuidades.

CST Studio Suite es un software de análisis de EM 3D de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos (EM). El sistema permite realizar simulaciones híbridas, lo cual proporciona la flexibilidad necesaria para analizar sistemas completos compuestos de varios componentes de forma eficiente y directa. El rendimiento y la eficiencia de antenas y filtros se encuentran entre los objetos más comunes del análisis realizado [5]. A diferencia de AWR, CST presenta un optimizador muy lento, de varios minutos por cada iteración; por este motivo, este programa se ha utilizado principalmente para realizar simulaciones

más precisas donde los parámetros empleados estén muy cerca de sus valores óptimos, si no lo son ya, debido a que tiene en cuenta un mayor número de modos de transmisión que el anterior.

Fest 3D es un programa capaz de analizar complejos componentes pasivos de microondas basados en tecnología de guías de ondas y cavidades coaxiales. Es un programa rápido y con una gran precisión. Además, Fest 3D está basado en la técnica de ecuación integral solucionada con el Método de Momentos [6]. Este programa se ha utilizado para comprobar respuestas en frecuencia de los diseños realizados en los otros programas. Además, aunque también presenta un optimizador lento más lento que AWR, es más rápido que el de CST, por lo que se puede emplear en ciertos casos para obtener mejores resultados.

#### 1.4 Estructura del trabajo

A continuación, se muestra la estructura del trabajo realizado siguiendo el orden en el que se han realizado cada uno de los apartados.

En el **Capítulo 2** se explica la base teórica de la que parte el trabajo, así como los conceptos necesarios para realizar y comprender los diseños de los filtros. Además, se explica qué es un filtro y se comentan sus aspectos básicos en relación con los rangos de frecuencia. Por último, en este capítulo, se realizan los cálculos teóricos necesarios para obtener funciones de diversos parámetros dependientes del ancho de ventana empleado.

En el **Capítulo 3** se realiza la primera parte práctica del trabajo, donde se crean cada uno de los diseños a implementar de los filtros y se observan las respuestas en frecuencia proporcionadas. Estos diseños se implementan progresivamente comenzando por el filtro ideal y cambiando diferentes elementos del diseño original hasta completar el filtro con los iris implementados. Además, se hacen comparativas para observar qué cambios se producen en la respuesta en frecuencia de cada filtro en función de sus componentes.

En el **Capítulo 4**, tomando como filtro base el filtro con los cinco iris, se comienza la inserción de ceros a partir de la sustitución de dos de sus ventanas, siendo estas analizadas previamente de manera individual para obtener las constantes teóricas de inversión que proporcionarán la respuesta con los ceros introducidos en las frecuencias deseadas. Tras implementar el diseño con los dos ceros, se obtienen los parámetros que componen las nuevas ventanas y se estudia la respuesta en frecuencia del filtro final.

En el **Capítulo 5** se comentarán las conclusiones alcanzadas tras la realización de todo el trabajo y se comentarán los posibles caminos a seguir con los resultados obtenidos.

## Capítulo 2. Planteamiento teórico

A lo largo del presente capítulo se van a comentar y analizar los aspectos más teóricos del proyecto, centrándose en los inversores, los filtros y la obtención de las funciones que permitirán la optimización de la respuesta en frecuencia de los filtros diseñados.

### 2.1 Teoría de inversores

Un inversor es una red de dos accesos que es pasiva, recíproca, sin pérdidas y simétrica, cuyo parámetro  $S_{11}$  debe ser real. Cualquier estructura que cumpla estos cinco requisitos es considerada un inversor. En la Figura 1 se observa la representación de un inversor y sus tres parámetros, relacionados a partir de la siguiente ecuación:

$$Z_{in} = \frac{K^2}{Z_L} \quad (2.1)$$

De donde se puede despejar la constante de inversión, quedando:

$$K = \sqrt{Z_{in}Z_L} \quad (2.2)$$

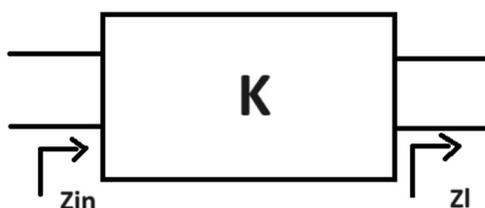


Figura 1. Representación del inversor y las impedancias de entrada y salida.

Un posible circuito equivalente con elementos concentrados de un inversor es el mostrado en la Figura 2, donde debe cumplirse que la reactancia serie sea la misma que la paralela, pero cambiada de signo. Un ejemplo de inversor con bobinas y condensadores sería el mostrado en la Figura 3, que se comportaría como inversor a la frecuencia que diese lugar a que la reactancia de la bobina fuese igual en módulo a la reactancia del condensador.

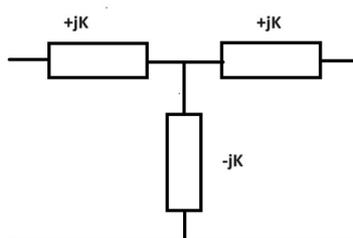


Figura 2. Inversor en forma de T.

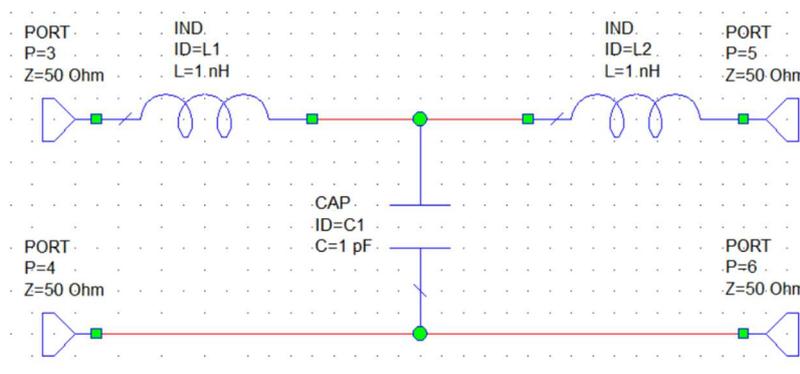


Figura 3. Ejemplo de inversor con bobinas y condensadores.

Teniendo presente las propiedades de un inversor, éste se podrá realizar con cualquier estructura pasiva y simétrica, y modificando los planos de referencia para conseguir que el parámetro  $S_{11}$  sea real. Basado en este concepto, en el artículo [2] se proponen unas fórmulas que a partir de los parámetros S de la estructura pasiva y simétrica permiten calcular la modificación  $\phi$  de los planos de referencia y el valor de la constante de inversión que se conseguiría, observándose los planos en la Figura 4 y en la Figura 5.

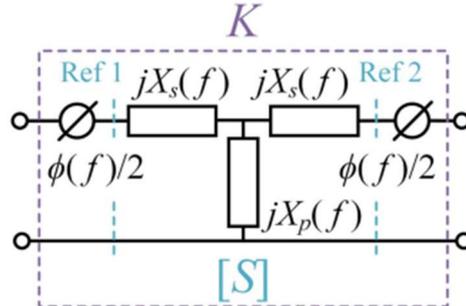


Figura 4. Circuito equivalente en T de un inversor. [2]

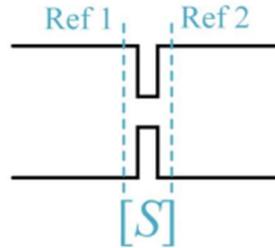


Figura 5. Ventana inductiva. [2]

$$K(f) = \tan\left(\frac{\phi(f)}{2} + \arctan(X_s(f))\right) \quad (2.3)$$

$$\phi(f) = -\arctan(2X_p(f) + X_s(f)) - \arctan(X_s(f)) \quad (2.4)$$

$$jX_s(f) = \frac{1 - S_{12}(f) + S_{11}(f)}{1 - S_{11}(f) + S_{12}(f)} \quad (2.5)$$

$$jX_p(f) = \frac{2S_{12}(f)}{1 - S_{11}(f) + S_{12}(f)} \quad (2.6)$$

Estas ecuaciones van a resultar claves para la consecución de este trabajo.

Si bien un inversor ideal presentaría una constante de inversión independiente de la frecuencia, las realizaciones reales de un inversor presentan una constante de inversión dependiente de la frecuencia. En muchos casos esta dependencia es bastante lineal, y este hecho se utilizará en este trabajo, de forma que la constante de inversión tendrá la siguiente función con la frecuencia:

$$K(f) = m_k(f - f_0) + K_0 \quad (2.7)$$

Siendo  $f_0$  la frecuencia central de trabajo del inversor,  $K_0$  la constante de inversión a la frecuencia central y  $m_k$  la pendiente con la frecuencia.

## 2.2 Teoría de filtros

Un filtro es una red de dos accesos que permite la transmisión de un rango específico de frecuencias, siendo este rango la banda de paso, cuya señal puede ser modificada tanto en amplitud como en fase [1]. El rango de frecuencias restante se trata de la banda eliminada, la cual presenta una atenuación en transmisión muy elevada para impedirles el paso. Un tipo de filtro es el paso banda, empleado en el filtro que se va a realizar en este caso, cuyo parámetro de transmisión se puede observar en la Figura 6. En ella, se distinguen varios parámetros clave; en primer lugar,  $wc1$  y  $wc2$ , los cuales indican los límites de la banda de paso; por otra parte,  $ws1$  y

$\omega_{s2}$  indican los límites de la banda eliminada; por tanto, el rango de frecuencias restante entre ambos parámetros corresponde a la banda de transición.

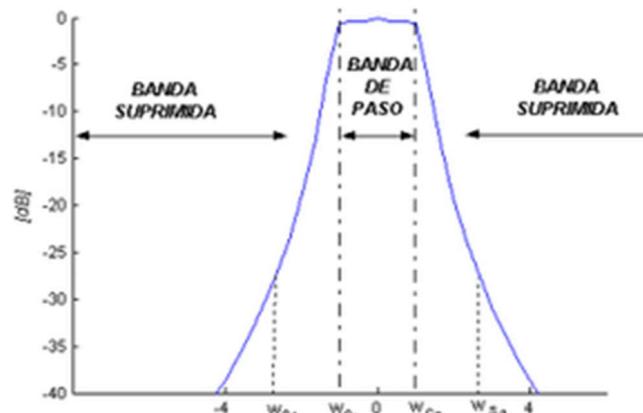


Figura 6. Ejemplo transmisión filtro paso banda. [7]

### 2.3 Filtro paso banda con inversores

Una posibilidad a la hora de implementar un filtro paso banda es mediante el uso de inversores, como se decide realizar a lo largo de este trabajo.

Por otra parte, para diseñar un filtro paso banda, en primer lugar, es necesario definir su prototipo paso bajo, lo cual se hace empleando bobinas y condensadores, siendo posible asumir que todos los elementos son bobinas en serie o condensadores en paralelo, y haciendo uso de inversores.

En esta ocasión, se opta por utilizar el diseño de las bobinas en serie, las cuales se ubican entre los inversores del filtro, tal y como se observa en la Figura 7, siendo  $N$  el orden del filtro, así como el número de bobinas; mientras que  $N+1$  es el número de inversores presentes.

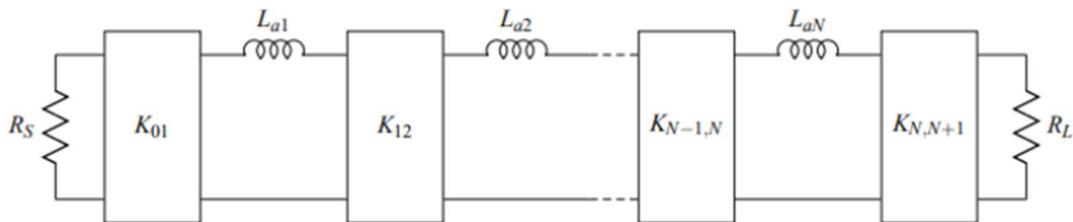


Figura 7. Prototipo paso bajo con inversores. [8]

Las constantes de inversión de dichos inversores quedan definidas de la siguiente forma:

$$K_{01} = \sqrt{\frac{R_S L_{a1}}{g_0 g_1}} \quad (2.8)$$

$$K_{i,i+1} = \sqrt{\frac{L_{ai} L_{a(i+1)}}{g_i g_{i+1}}} \quad (2.9)$$

$$K_{N,N+1} = \sqrt{\frac{L_{aN} R_L}{g_N g_{N+1}}} \quad (2.10)$$

En este caso, se supone que el valor de las bobinas es el mismo, y que los inversores son ideales. Posteriormente, se realiza una transformación en frecuencia para volver a la banda deseada, convirtiendo el prototipo paso bajo en paso banda. Estructuralmente, esta transformación implica que las bobinas se sustituyan por resonadores en serie, quedando como se observa en la Figura 8.

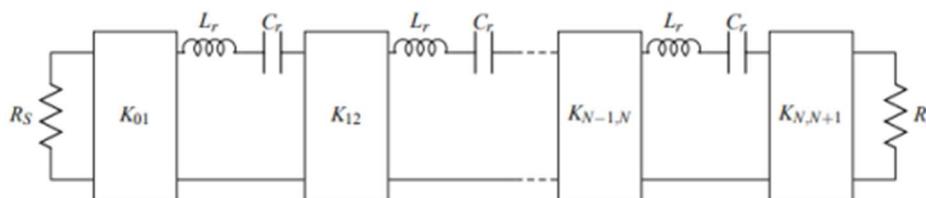


Figura 8. Prototipo paso banda con inversores y resonadores en serie. [8]

Una vez obtenido el prototipo paso banda, otra forma de implementar este tipo de circuitos es empleando líneas de longitud  $\lambda/2$ , resultando en la Figura 9, donde se observan  $N+1$  inversores y  $N$  líneas de transmisión cuya longitud es de  $\lambda/2$ , las cuales conectan los inversores.

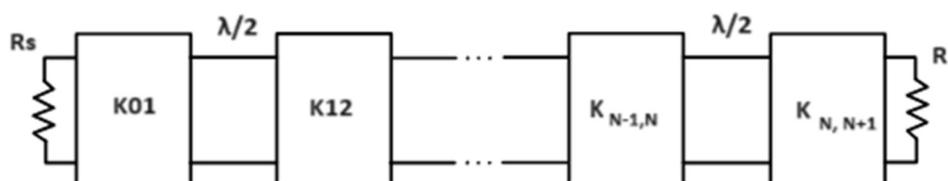


Figura 9. Filtro con inversores conectados mediante líneas de  $\lambda/2$ .

## 2.4 Especificaciones del filtro a diseñar

El filtro que se desea recrear es el observado en la Figura 10, obtenido del artículo “Direct synthesis and design of dispersive waveguide bandpass filters”, publicado por Yan Zhang, Huan Meng y Ke-Li Wu [2]. Se trata de un filtro de tipo Chebychev, empleado en los filtros paso banda; además, es de orden 4, lo que implica que se emplearán 5 inversores para su diseño, cuyos coeficientes de  $g$  se van a obtener a continuación.

Este filtro, tal y como se observa en la figura, pretende insertar dos ceros mediante la sustitución del tercer y cuarto iris por unas ventanas de parámetros diferentes.

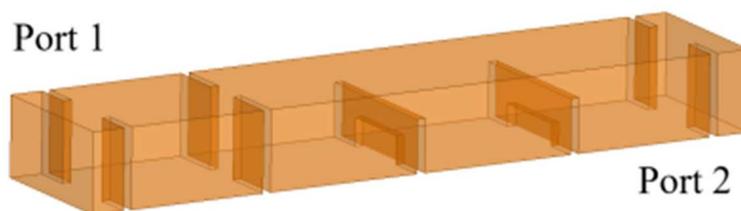


Figura 10. Filtro que se desea recrear. [2]

La frecuencia central ( $f_0$ ) de este filtro paso banda se ubica en 11 GHz. Además, el ancho de banda de banda (BW) es de 200 MHz. La realización será en guía rectangular y la guía estándar escogida será la WR90 ( $a=22,86$  mm y  $b=10,16$  mm). En esta ocasión, las pérdidas de retorno (RL), van a tener como objetivo -23 dB, por lo que se van a realizar los cálculos pertinentes a partir de este valor. Este parámetro se define como:

$$R_L = -20 \log |S_{11}| \quad (2.11)$$

Por tanto, de aquí se puede despejar  $S_{11}$  como:

$$|S_{11}| = 10^{-R_L/20} = 0.0708 \quad (2.12)$$

Y, a partir de la propiedad de unitariedad, existirá una relación entre  $S_{11}$  y  $S_{12}$ , que viene dada por:

$$|S_{11}|^2 + |S_{12}|^2 = 1 \quad (2.13)$$

Se obtiene que el valor de  $|S_{12}|$  es 0.997. A continuación, se calcula el valor del rizado ( $r$ ) para este filtro mediante la siguiente fórmula:

$$r = -20 \log g(|S_{12}|) = 0.0218 \text{ dB} \quad (2.14)$$

Una vez obtenido el rizado del filtro se desea obtener el valor de los coeficientes  $g$ . Para ello se hace uso del Laboratorio Virtual de la UPV, en el cual se encuentra una herramienta que permite obtener los coeficientes  $g$  [9]; para conseguir estos coeficientes, se debe introducir el tipo de filtro, en este caso, Chebychev, el orden y los coeficientes  $g$  a mostrar, 4, y el rizado del filtro, 0.0218 como se observa en la Figura 11. Con estos parámetros se obtiene la Figura 12, a partir de la cual se obtienen los valores de  $g$ , recogidos en la Tabla 1.

Tipo filtro

Orden

Rizado

Coefficientes  $g$

Figura 11. Parámetros necesarios para obtener los coeficientes  $g$ . [9]

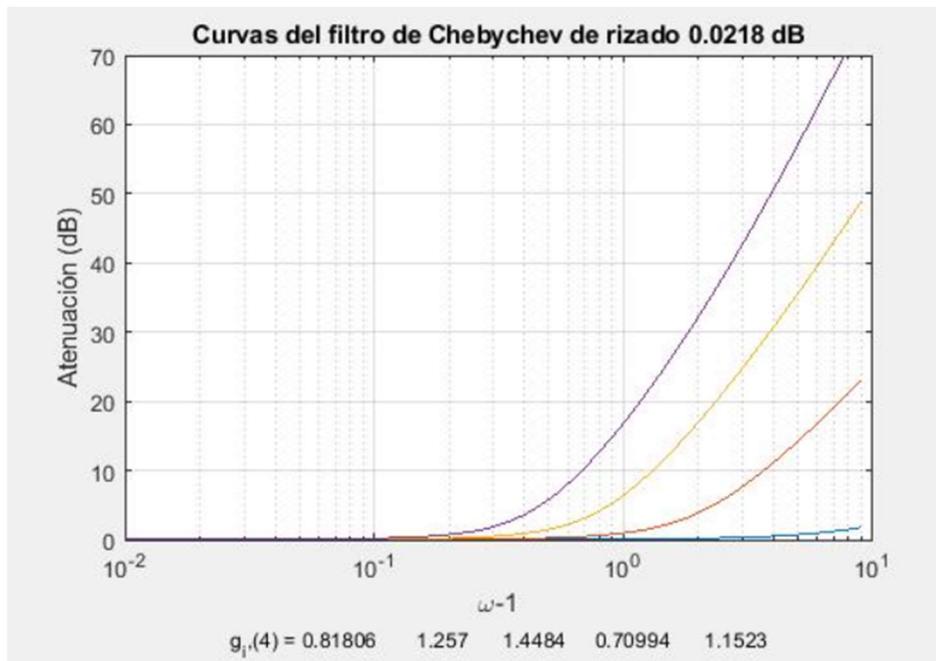


Figura 12. Curvas del filtro de Chebychev de orden 4. [9]

Coeficientes g	valores
g0	0.81806
g1	1.257
g2	1.4484
g3	0.70994
g4	1.1523

Tabla 1. Coeficientes g del filtro de Chebychev de orden 4.

## 2.5 Obtención funciones de $K_0$ y $m_{k0}$ en función de $W$

### 2.5.1 Obtención anchos de ventana en CST

Una posible forma de realizar un inversor en guía rectangular es mediante el uso de una ventana inductiva, caracterizada por su ancho  $W$ . Para la optimización del filtro de orden 4 a diseñar en un entorno de simulación circuital como AWR, es necesario conocer la función de la constante de inversión  $K$  en función del ancho de ventana  $W$  correspondiente; y otra donde la pendiente dependa del ancho de la ventana. Para ello, en primer lugar, se van a obtener, a partir del diseño del inversor en CST de la Figura 13, cuya ventana se puede observar claramente en la Figura 14, muestras de valores de  $K$  para una serie de anchos de ventana introducidos, obteniendo las gráficas de  $K$  de la Figura 15, siendo  $K$  prácticamente lineal con la frecuencia; además, también es posible obtener muestras de las pendientes correspondientes a cada ancho de ventana introducido, siendo estas las derivadas de los valores de  $K$  correspondientes.

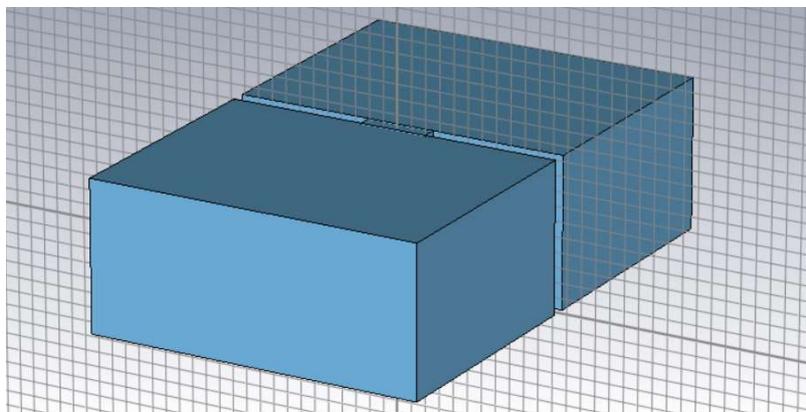


Figura 13. Inversor empleado para obtener ecuaciones de  $K$  y  $m$  en función de  $W$

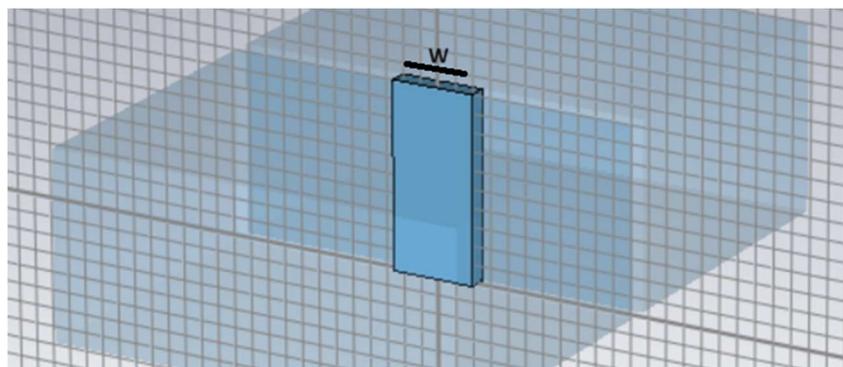


Figura 14. Ventana del inversor empleado.

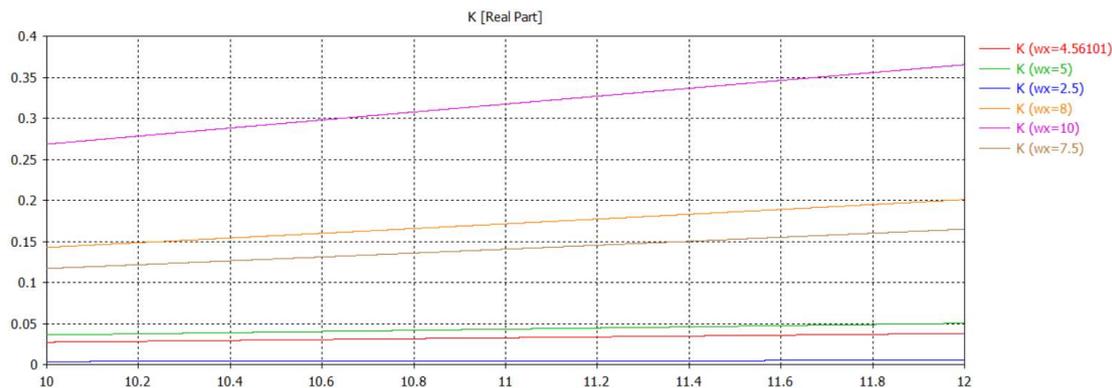


Figura 15. Valores de K en función de f obtenidos en CST.

### 2.5.2 Obtención funciones $K_0$ y $m_k$ en Matlab

Una vez obtenido un número adecuado de muestras, se genera en Matlab, a partir de la aplicación Curve Fitter, una función de Fourier de K en función de los anchos de ventana, la cual se empleará como aproximación lineal en los filtros que se van a crear para obtener cada uno de los valores más adecuados de W con los cuales se obtengan los valores de K más cercanos a su valor teórico. Introduciendo dichas muestras, se obtiene la función de la Figura 16, siendo su función:

$$K_0 = 0.4814 - 0.4148\cos(0.175W) - 0.2311\sin(0.175W) \quad (2.15)$$

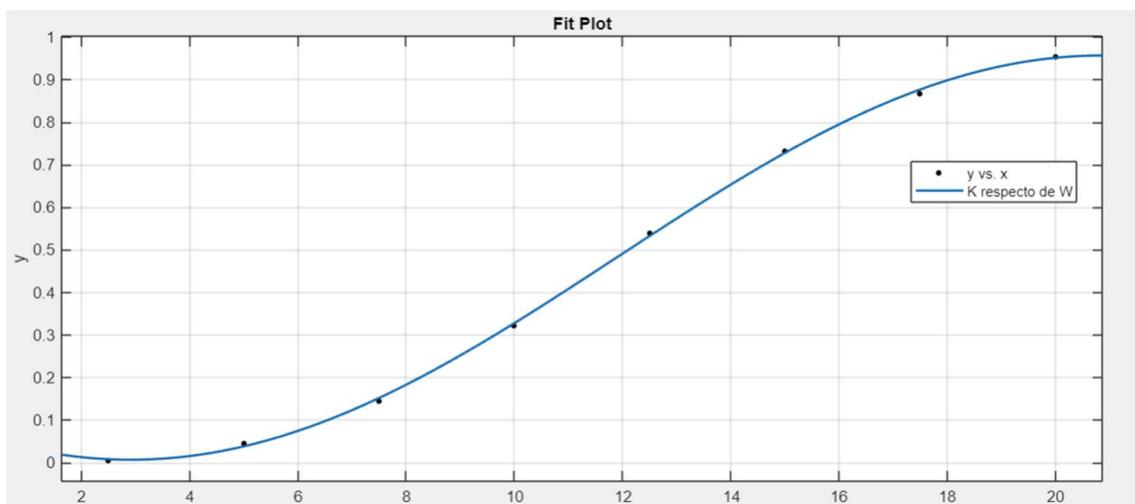


Figura 16. Función de K dependiente de W.

Una vez obtenida la función óptima para la constante de inversión, se sigue el mismo procedimiento en Matlab para conseguir una función donde la pendiente depende de la variable W, obteniendo como resultado la Figura 17, cuya función es la siguiente:

$$m_k = 0.02516 - 0.02286\cos(0.3053W) - 0.01535\sin(0.3053W) + 0.002493\cos(2W0.3053) + 0.002822\sin(2W0.3053) \quad (2.16)$$

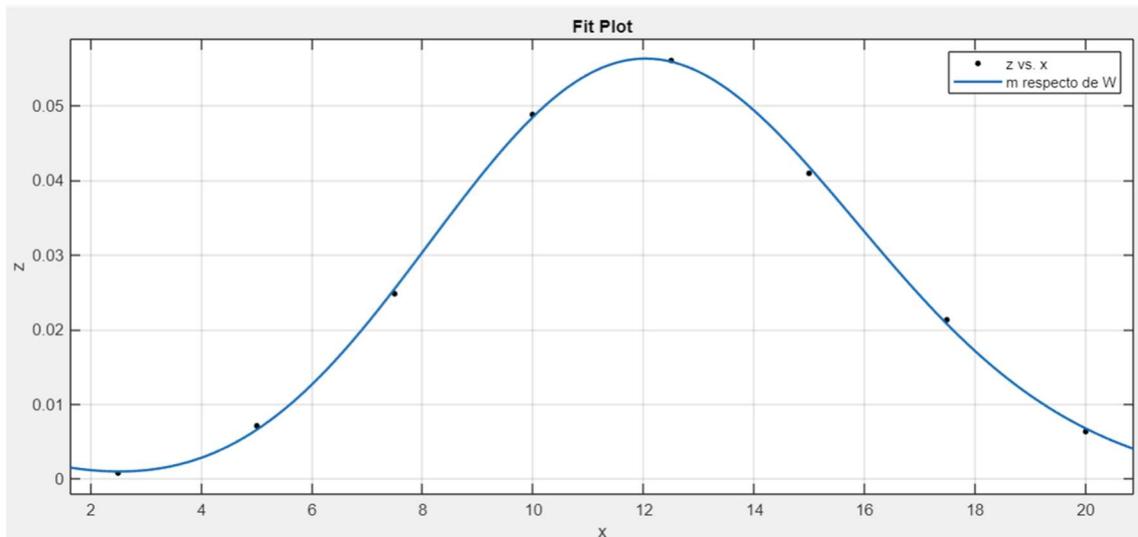


Figura 17. Función de m dependiente de W.

El conocimiento de estas funciones  $K_0$  y  $m_k$  del inversor en función del parámetro geométrico  $W$ , permitirán la simulación del inversor realizado con un iris inductivo en un simulador circuital como AWR, de forma muy óptima.

### Capítulo 3. Diseño del filtro

En este apartado se diseñará el filtro ideal, del que se partirá para comprobar que los resultados obtenidos son adecuados, el filtro real, donde se cambiarán las líneas ideales por guías dispersivas, para ver cómo afecta eso a la respuesta del filtro y a sus anchos de ventana; y, por último, se diseñará el filtro real cambiando los inversores en forma de T por iris, lo cual también introducirá cambios en la respuesta del sistema.

#### 3.1 Filtro ideal

El primer paso para crear el filtro deseado es realizar una versión primitiva con todos sus componentes siendo ideales, con el objetivo de comprobar que los resultados sean lógicos y emplearlos como punto de partida de los siguientes filtros diseñados.

Para obtener los valores necesarios para realizar el filtro ideal, en primer lugar, se calculan las constantes de inversión teóricas ideales, es decir, sin tener en cuenta la dispersión de la guía. Estas constantes presentan las siguientes ecuaciones, calculando previamente el FBW, ancho de banda relativo.

$$FBW = \frac{BW}{f_0} = 0.01818 \quad (3.1)$$

$$K01o = \sqrt{\frac{\pi FBW}{2g1}} = 0.1868 \quad (3.2)$$

$$K12o = \frac{\pi}{2FBW\sqrt{g1g2}} = 0.02816 \quad (3.3)$$

$$K23o = \frac{\pi}{2FBW\sqrt{g2g3}} = 0.02117 \quad (3.4)$$

$$K34o = K12o \quad (3.5)$$

$$K45o = K01o \quad (3.6)$$

Con estos resultados, se obtienen los valores de W correspondientes a cada constante de inversión teórica a partir de la Figura 18, obtenida en los cálculos teóricos del proyecto.

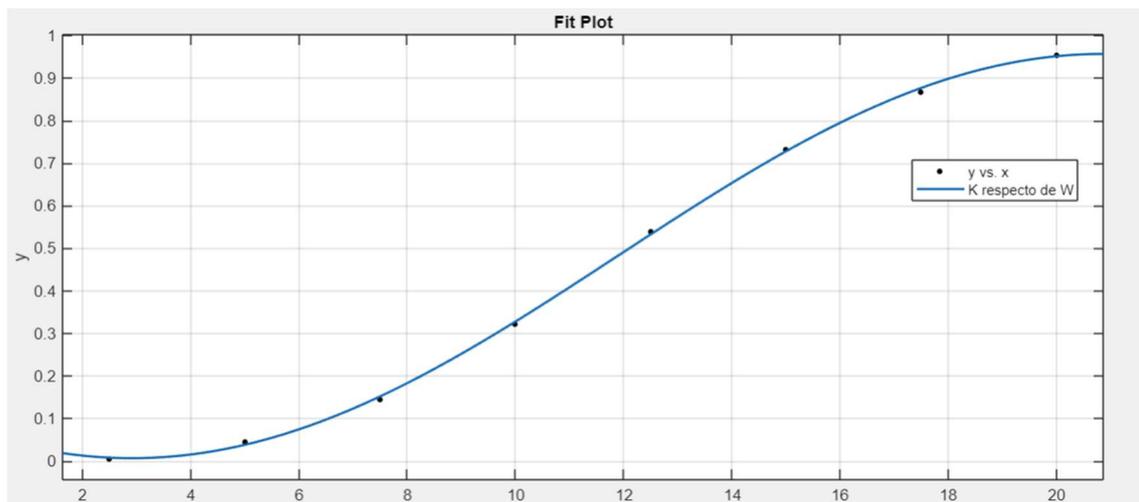


Figura 18. Aproximación lineal de K en función de W.

Estos valores servirán como punto de partida para obtener los valores óptimos empleando las ecuaciones de Ko y mko en función de W, siendo estas ecuaciones las siguientes:

$$K01_{i,t+1} = 0.4814 - 0.4148\cos(0.175W_{i,t+1}) - 0.2311\sin(0.175W_{i,t+1}) \quad (3.7)$$

$$mk_{i,t+1} = 0.02516 - 0.02286\cos(0.3053W_{i,t+1}) - 0.01535\sin(0.3053W_{i,t+1}) + 0.002493\cos(2W_{i,t+1}0.3053) + 0.002822\sin(2W_{i,t+1}0.3053) \quad (3.8)$$

Con todos los datos necesarios obtenidos, se pasa a la creación de un esquemático ideal del filtro de orden 4, lo que implica que se implementan líneas de transmisión ideales, es decir, que presentan una longitud eléctrica de  $180^\circ$ . Además, para implementar cada inversor se opta por emplear su equivalente en T, que consiste en tres impedancias conectadas entre sí; el otro extremo de dos de ellas va conectado a un tramo del filtro y la tercera impedancia presenta una toma a tierra, como se observa en la Figura 19.

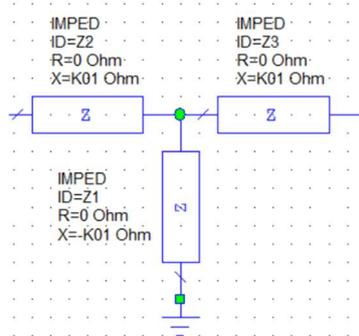


Figura 19. Equivalente en T de un inversor.

Con todo esto, el esquemático resultante se puede observar en la Figura 20.

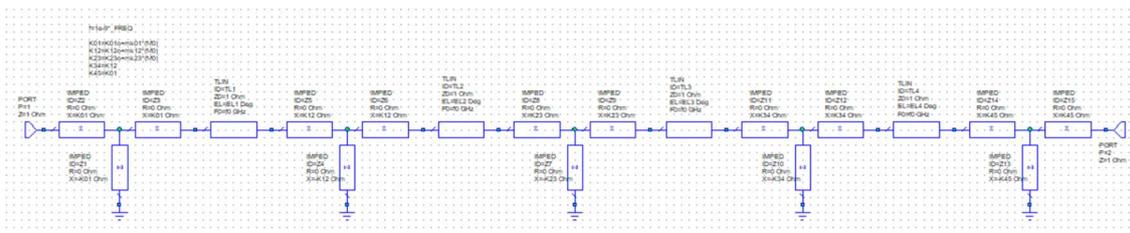


Figura 20. Esquemático ideal del filtro.

Para observar con más detalle el esquemático realizado, se observa la Figura 21, donde se observan cómo el primer y segundo inversor del sistema se conectan a través de una línea ideal de longitud  $180^\circ$  (EL1). En esta figura, además, se observan las ecuaciones con las que se configuran cada uno de los inversores del filtro, siendo este simétrico.

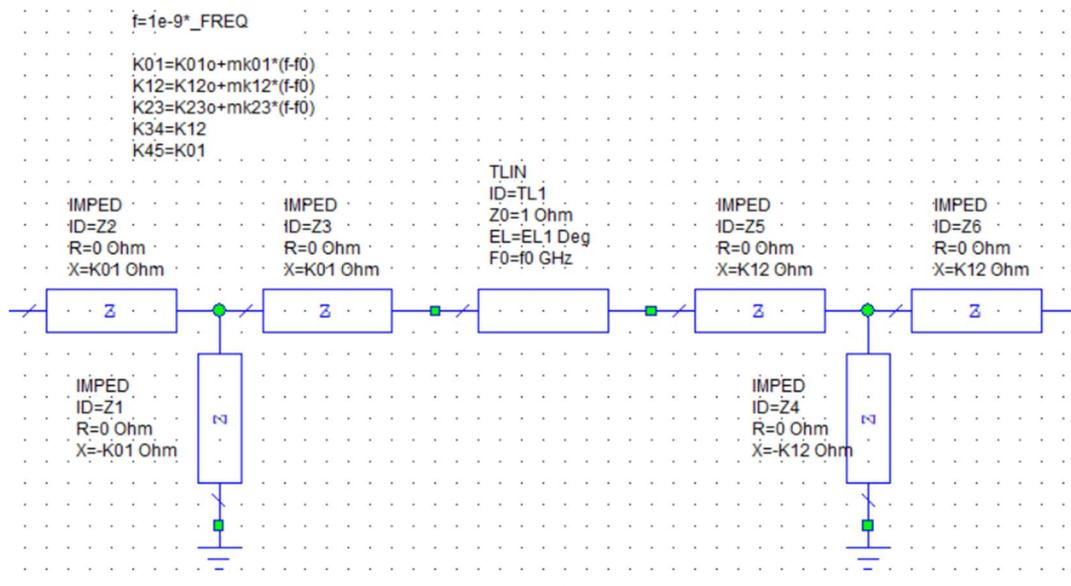


Figura 21. Imagen ampliada del filtro ideal.

A continuación, a partir de este diseño, se genera la respuesta en frecuencia correspondiente al filtro ideal diseñado, optimizado en la Figura 22, de manera que el parámetro  $S_{11}$  en la banda sea menor que -23 dB y el parámetro  $S_{21}$  presente una caída en la banda eliminada, transmitiéndose la menor señal posible.

Tras optimizar el esquemático los valores de  $W$  son  $W_{01} = 8.24$  mm,  $W_{12} = 4.74$  mm y  $W_{23} = 4.41$  mm y cuyos valores de  $m$  son:  $m_{01} = 0.13$ ,  $m_{12} = 0.0097$  y  $m_{23} = 0.029$ .

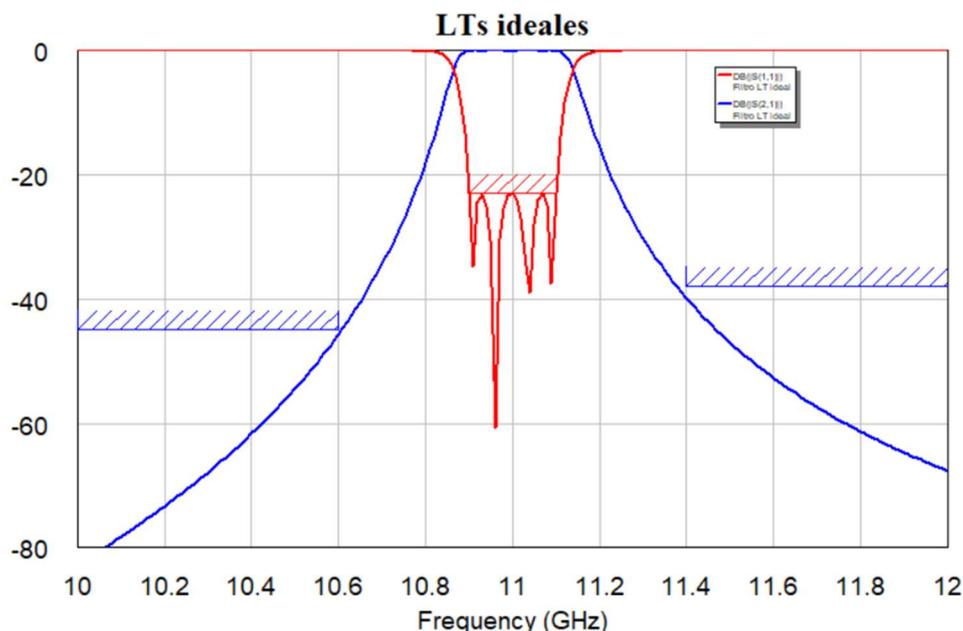


Figura 22. Respuesta en frecuencia del filtro ideal

Además, en la Tabla 2, se observa una comparativa entre los valores de  $K_o$  obtenidos de forma teórica y entre los obtenidos a partir de la ecuación generada en Matlab y cuyos valores dependen del ancho de ventana correspondiente. Como se puede observar, los valores obtenidos no presentan una gran diferencia, por lo que, se confirma que con las ecuaciones empleadas se pueden obtener buenos valores de  $W$ .

$K_o$	$K_o$ teóricos	$K_o$ en función de $W$
$K_{01o}$	0.1868	0.1992
$K_{12o}$	0.02816	0.03086
$K_{23o}$	0.02117	0.02303

Tabla 2. Comparación entre  $K_o$  teórica y  $K_o$  obtenida en función de  $W$  en el filtro ideal.

En resumen, en este primer diseño se puede observar cómo se cumplen correctamente los objetivos de optimización deseados, los cuales se van a intentar implementar en los siguientes diseños realizados. Por tanto, tras ser comprobado su correcto funcionamiento en el filtro ideal, se va a realizar un diseño con líneas reales de transmisión,  $\lambda/2$ , para intentar obtener la misma respuesta en frecuencia.

### 3.2 Filtro con guías reales

A continuación, se va a implementar el mismo filtro, pero empleando líneas reales, lo que implica que es necesario tener en cuenta el carácter dispersivo de las guías empleadas. Esto supone que las constantes de inversión teóricas van a sufrir cambios al ser calculadas, puesto que en este caso se calculan a partir de la longitud de onda del filtro, en lugar de su frecuencia.

En primer lugar, a partir del ancho de banda del filtro ideal, 200 MHz, se calculan los valores de la frecuencia inicial y final de la banda; obteniendo  $f_{\text{inicial}} = 10.9 \text{ GHz}$ ,  $f_0 = 11 \text{ GHz}$  y  $f_{\text{final}} = 11.1 \text{ GHz}$ .

Con estos resultados, se obtienen los valores de  $\lambda$  con los que se va a realizar el filtro,  $\lambda_{\text{inicial}} = 27.5 \text{ mm}$ ,  $\lambda_0 = 27.25 \text{ mm}$  y  $\lambda_{\text{final}} = 27 \text{ mm}$ .

Y, a continuación, se calculan los valores de  $\lambda$  de grupo, con el objetivo de calcular el nuevo FBW.

$$\lambda_{gi} = \frac{\lambda_i}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_i}{f_0}\right)^2}} \quad (3.9)$$

Con lo que se obtiene  $\lambda_{g\text{inicial}} = 34.41 \text{ mm}$ ,  $\lambda_{g0} = 33.93 \text{ mm}$  y  $\lambda_{g\text{final}} = 33.46 \text{ mm}$ . Por último, para poder calcular las constantes de inversión teóricas, es necesario calcular el FBW a partir de la relación entre las longitudes de onda de grupo.

$$FBW = \frac{\lambda_{g\text{inicial}} - \lambda_{g\text{final}}}{\lambda_{g0}} = 0.0282 \quad (3.10)$$

Finalmente, con los resultados de los cálculos realizados, se obtienen los valores de K teóricos óptimos para la implementación del diseño, teniendo en cuenta la simetría que este presenta.

$$K01o = \sqrt{\frac{\pi FBW}{2g_1}} = 0.2327 \quad (3.11)$$

$$K12o = \frac{\pi FBW}{2\sqrt{g_1g_2}} = 0.04369 \quad (3.12)$$

$$K23o = \frac{\pi FBW}{2\sqrt{g_2g_3}} = 0.03283 \quad (3.13)$$

$$K34o = K12o = 0.04369 \quad (3.14)$$

$$K45o = K01o = 0.2327 \quad (3.15)$$

Tal y como se puede observar en la Tabla 3, los valores de la constante de inversión teórica han aumentado debido a la dispersión que presenta la guía.

Ko	Ko sin dispersión	Ko con dispersión
K01o	0.1868	0.2327
K12o	0.02816	0.04369
K23o	0.02117	0.03283

Tabla 3. Comparativa Ko con y sin dispersión.

Con estos resultados y con los valores óptimos de los anchos de ventana obtenidos para el filtro ideal, se pasa a implementar el diseño inicial del filtro real de orden 4 teniendo en cuenta que el valor de las líneas de transmisión es  $\lambda_g/2$ .

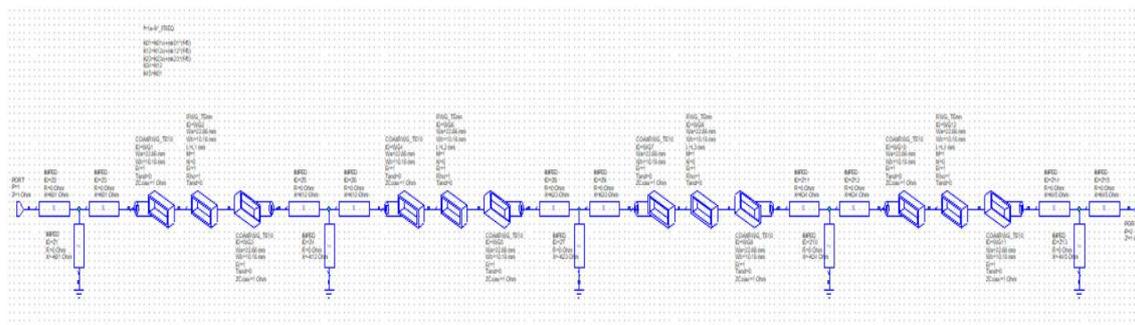


Figura 23. Esquemático completo filtro real

En la Figura 23, se puede observar el diseño completo del filtro, aunque para una observación óptima de sus componentes, se añade la ampliación de la Figura 24. En ella se puede observar que los inversores continúan siendo inversores en forma de T pero que las líneas han pasado a ser guías rectangulares dispersivas conectadas a los inversores mediante un elemento de transición, COAXRWG\_TE10.

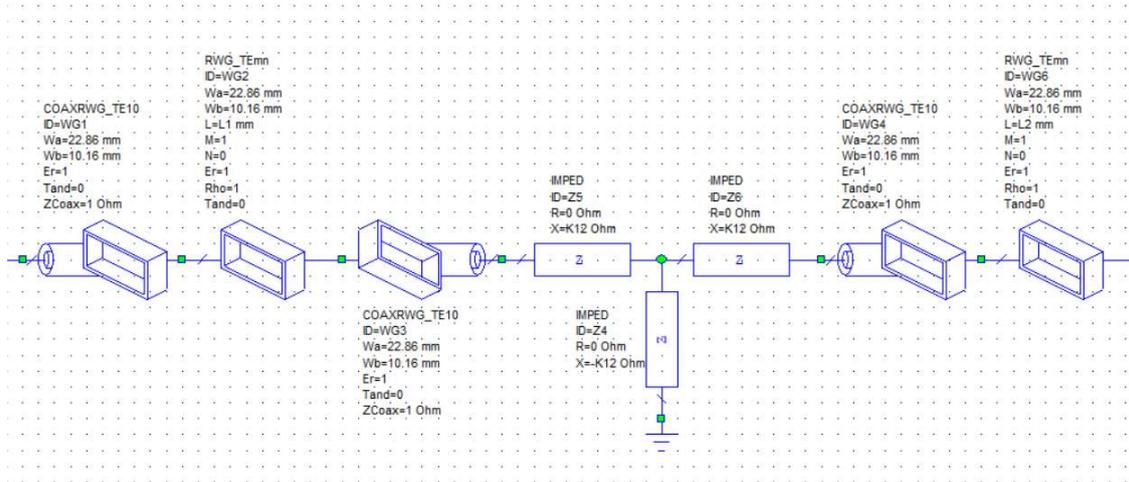


Figura 24. Esquemático filtro real ampliado

Los valores de este esquemático que se van a optimizar son los anchos de ventana, partiendo de los valores optimizados del filtro ideal, y las pendientes de la respuesta del filtro. Estos valores se optimizan a partir de las ecuaciones de K y m en función del ancho de ventana correspondiente, siendo estas las mismas ecuaciones que en el caso anterior, las cuales se presentan en la Figura 25 y en la Figura 26.

$$\begin{aligned} K_{01o} &= 0.4814 - 0.4148 \cdot \cos(W_{01} \cdot 0.175) - 0.2311 \cdot \sin(W_{01} \cdot 0.175) \\ K_{12o} &= 0.4814 - 0.4148 \cdot \cos(W_{12} \cdot 0.175) - 0.2311 \cdot \sin(W_{12} \cdot 0.175) \\ K_{23o} &= 0.4814 - 0.4148 \cdot \cos(W_{23} \cdot 0.175) - 0.2311 \cdot \sin(W_{23} \cdot 0.175) \end{aligned}$$

Figura 25. Ecuaciones de K para optimizar la respuesta del filtro.

$$\begin{aligned} mk_{01o} &= 0.02516 - 0.02288 \cdot \cos(W_{01} \cdot 0.3053) - 0.01535 \cdot \sin(W_{01} \cdot 0.3053) + 0.002493 \cdot \cos(2 \cdot W_{01} \cdot 0.3053) + 0.002822 \cdot \sin(2 \cdot W_{01} \cdot 0.3053) \\ mk_{12o} &= 0.02516 - 0.02288 \cdot \cos(W_{12} \cdot 0.3053) - 0.01535 \cdot \sin(W_{12} \cdot 0.3053) + 0.002493 \cdot \cos(2 \cdot W_{12} \cdot 0.3053) + 0.002822 \cdot \sin(2 \cdot W_{12} \cdot 0.3053) \\ mk_{23o} &= 0.02516 - 0.02288 \cdot \cos(W_{23} \cdot 0.3053) - 0.01535 \cdot \sin(W_{23} \cdot 0.3053) + 0.002493 \cdot \cos(2 \cdot W_{23} \cdot 0.3053) + 0.002822 \cdot \sin(2 \cdot W_{23} \cdot 0.3053) \end{aligned}$$

Figura 26. Ecuaciones de m para optimizar la respuesta del filtro.

Los objetivos de la respuesta en frecuencia del filtro son los mismos que en el filtro ideal y, como se puede observar en la Figura 27, los resultados son los esperados tras la optimización realizada, siendo los anchos resultantes  $W_{01} = 8.73$  mm,  $W_{12} = 5.2$  mm y  $W_{23} = 4.84$  mm; cuyas pendientes son  $mk_{01} = 0.02316$ ,  $mk_{12} = 0.00313$  y  $mk_{23} = 0.0024$ .

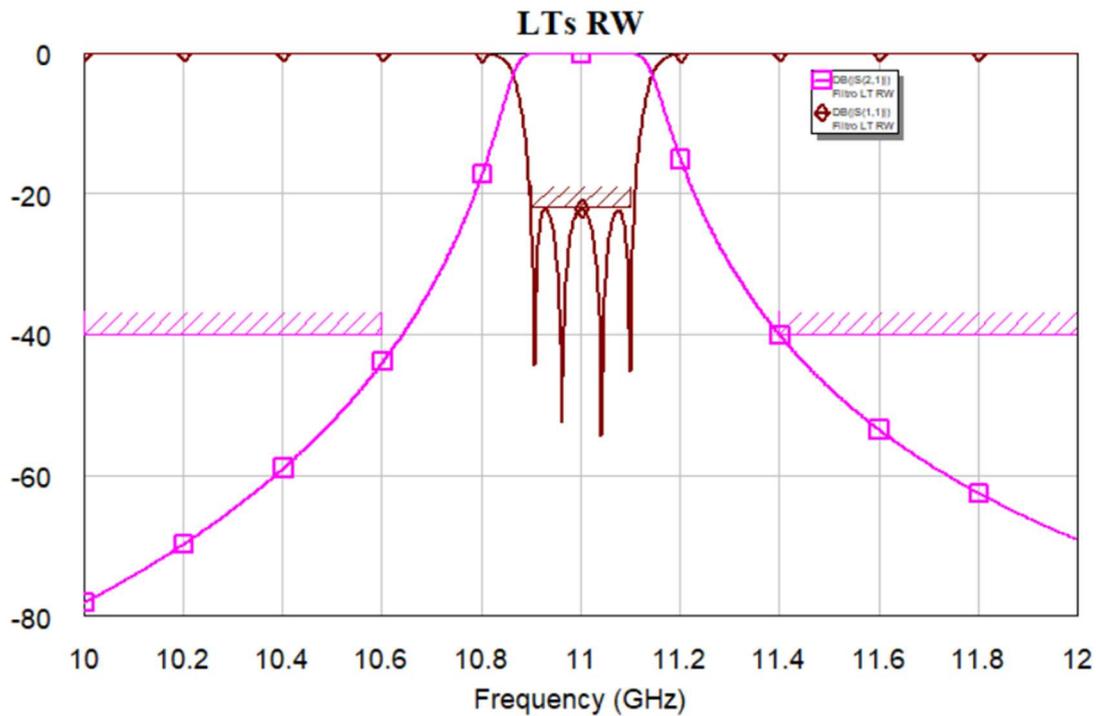


Figura 27. Respuesta en frecuencia del filtro real

En la Tabla 4 se puede observar que la optimización ha sido muy buena puesto que K01o no presenta cambios y K12o y K23o presentan una variación muy pequeña, lo que implica que los anchos de ventana alcanzados son óptimos.

Ko	Ko teóricos	Ko en función de W
K01o	0.2327	0.2327
K12o	0.04369	0.04436
K23o	0.03283	0.03357

Tabla 4. Comparación resultados Ko en el filtro con guías dispersivas.

### 3.3 Filtro con iris

#### 3.3.1 Filtro diseñado con iris en AWR

Una vez obtenida la respuesta en frecuencia del filtro anterior, se desea implementar el mismo esquemático, pero sustituyendo los inversores en forma de T por iris y conectándolos mediante las guías rectangulares empleadas en el caso anterior.

Para la realización de este esquemático, es necesario realizar una serie de cálculos previos para obtener la longitud de las guías, ya que va a ser diferente de la anterior debido a la inserción de los iris, los cuales también tienen una determinada longitud a tener en cuenta.

Por tanto, el primer paso para calcular las longitudes de las guías es introducir las siguientes ecuaciones [2], comentadas previamente, en el inversor de la Figura 28 creado en CST.

$$K(f) = \tan\left(\frac{\vartheta(f)}{2} + \arctan(X_s(f))\right) \quad (3.16)$$

$$\vartheta(f) = -\arctan\left(2X_p(f) + X_s(f)\right) - \arctan(X_s(f)) \quad (3.17)$$

$$jX_s(f) = \frac{1-S_{12}(f)+S_{11}(f)}{1-S_{11}(f)+S_{12}(f)} \quad (3.18)$$

$$jX_p(f) = \frac{2S_{12}(f)}{1-S_{11}(f)+S_{12}(f)} \quad (3.19)$$

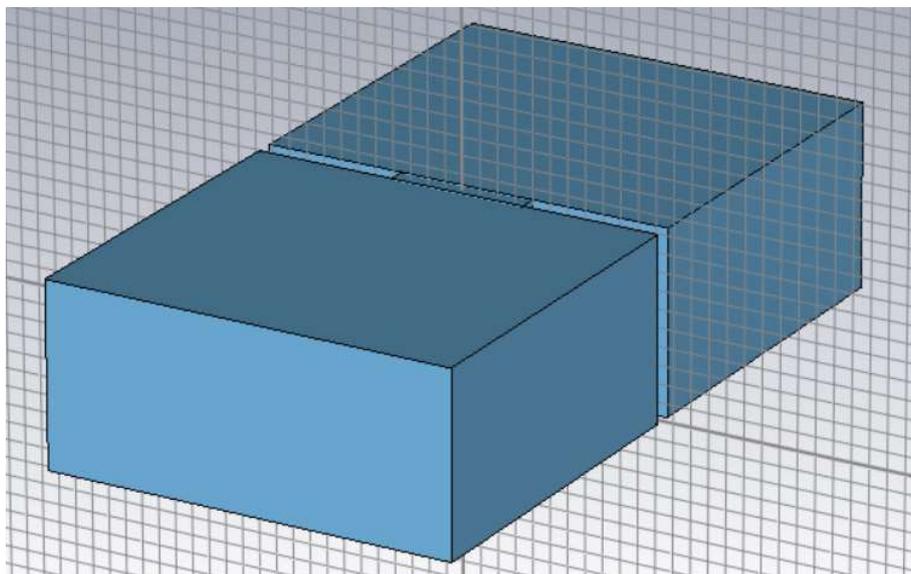


Figura 28. Inversor en CST

Tras introducir estas ecuaciones, es posible obtener gráficas en CST que van a proporcionar información sobre las cuatro variables. De una de estas gráficas se obtiene el valor de  $\phi$  correspondiente a cada uno de los anchos de ventana empleados, obtenidos de la optimización del filtro anterior, a la frecuencia de 11GHz, tal y como se observa en la Figura 29, siendo  $\phi_{01} = 0.5432$  rad,  $\phi_{12} = 0.14$  rad y  $\phi_{23} = 0.115$  pasando los valores observados en la gráfica a valores positivos.

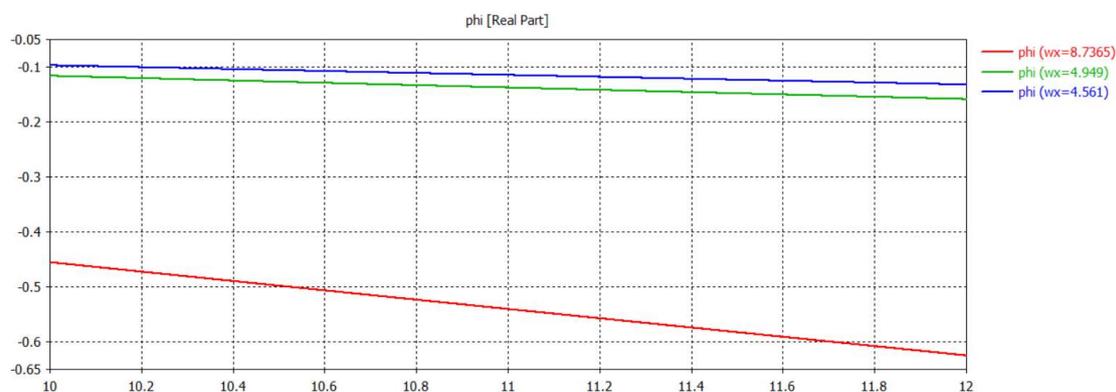


Figura 29. Valor de phi en función del ancho de ventana

Por otra parte, es posible generar una función donde phi dependa de W, lo cual facilitaría la obtención de valores de phi en caso de ser necesitados posteriormente. Para ello, en primer lugar, se obtiene un mayor número de muestras en el inversor de CST, como se observa en la Figura 30.

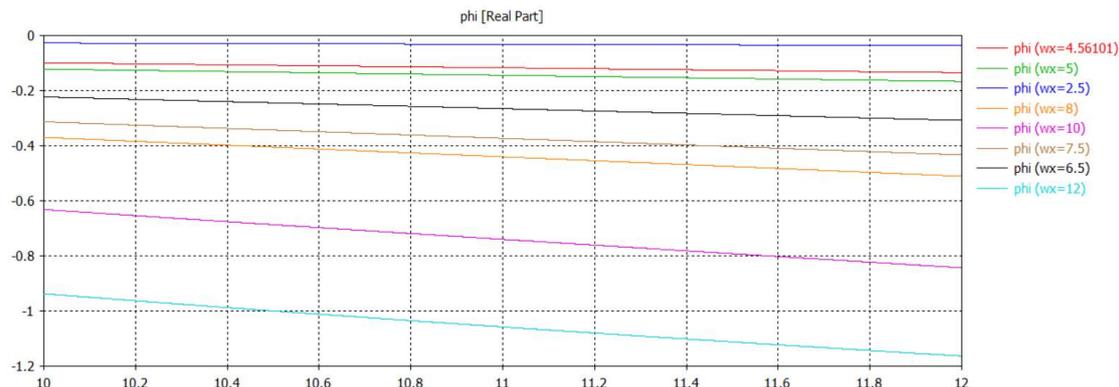


Figura 30. Muestras de phi en función de W.

A continuación, como se ha realizado en el apartado 2.5.2, se genera una función de Fourier mediante la App Curve Fitter de Matlab donde se obtiene la curva de phi en función del ancho de ventana presentada en la Figura 31, cuya función es la siguiente:

$$\phi = 0.4971 - 0.4508 \cos(0.2761W) - 0.3114 \sin(0.2761W^2) + 0.08184 \sin(0.2761W^2) \quad (3.20)$$

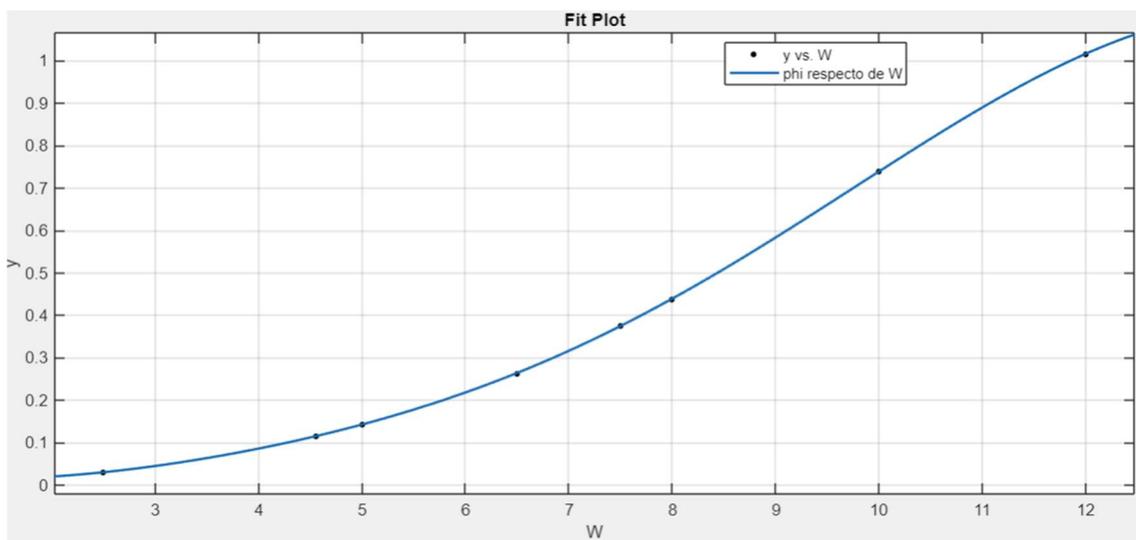


Figura 31. Gráfica de phi dependiente de W.

Con estos resultados, y a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\phi}{2} = \beta l \quad (3.21)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_{g0}} \quad (3.22)$$

Se obtienen las longitudes de los tramos que habrá que restar a la guía original de  $\lambda/2$ ,  $l_{01} = 1.467$  mm,  $l_{12} = 0.378$  mm y  $l_{23} = 0.3105$  mm, sabiendo que el valor de  $\beta$  es  $0.1852$  mm<sup>-1</sup>, siendo  $\lambda_{g0}$  el valor calculado en el apartado anterior, 33,93 mm. Tras estos cálculos, es posible obtener el valor de las longitudes de la guía a partir de:

$$L_i = \frac{\lambda_{g0}}{2} - l_{i-1,i} - l_{i,i+1} \quad (3.23)$$

Con lo que los valores de las longitudes de las guías serán  $L_1 = 15.12$  mm y  $L_2 = 16.28$  mm. Por tanto, con los resultados obtenidos y los anchos de ventana óptimos del caso anterior, seleccionados como valores iniciales para su posterior optimización, se realiza el diseño esquemático del filtro real empleando cinco iris de la Figura 32.

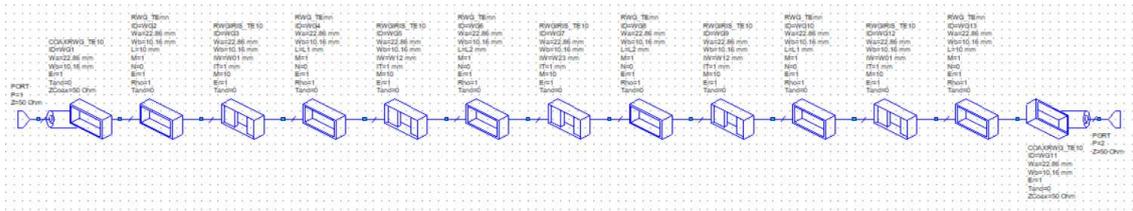


Figura 32. Esquemático del filtro real con iris

En el esquemático ampliado de la Figura 33, se observa el cambio comentado previamente, donde se han situado los iris en lugar de los inversores en forma de T; y estos se conectan entre ellos mediante guías rectangulares como las empleadas en el caso anterior.

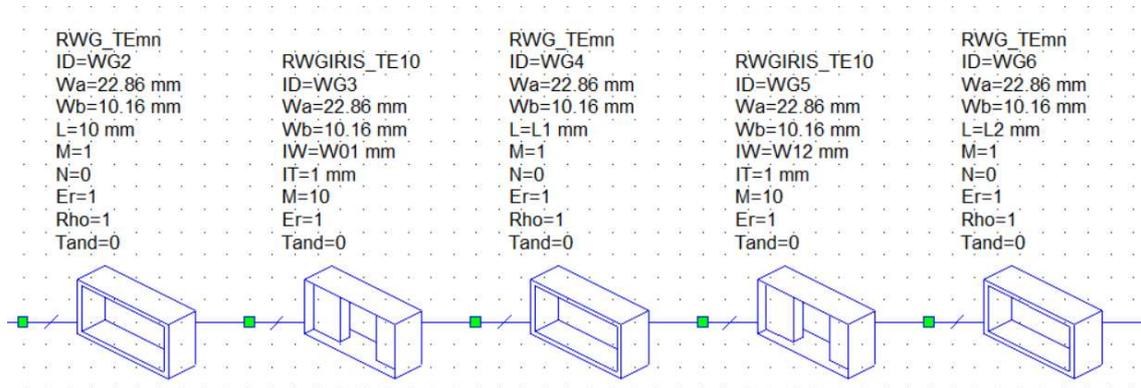


Figura 33. Esquemático del filtro real con iris ampliado

Una vez creado el diseño, se simula y se observa su respuesta en frecuencia en la Figura 34; este filtro presenta una buena respuesta antes de ser optimizado, ya que se encuentran los cuatro mínimos del filtro, aunque no están todos dentro de la banda de paso. Esto se debe a que los anchos de ventana implementados son los obtenidos tras la optimización usando el modelo del inversor.

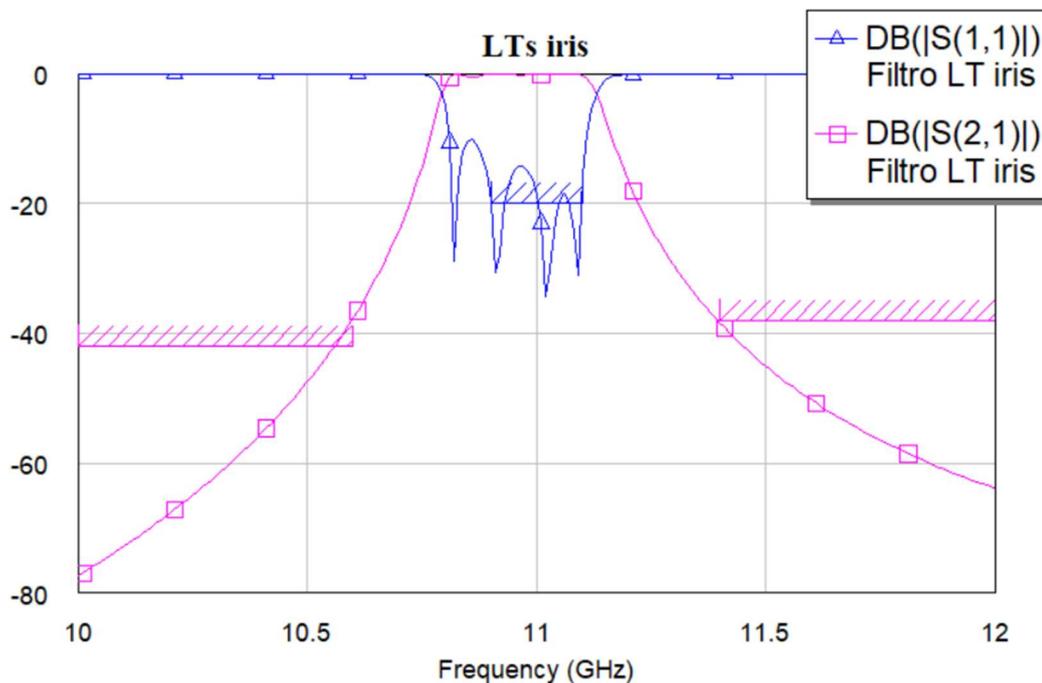


Figura 34. Respuesta del filtro con iris antes de ser optimizado.

A continuación, se realiza la optimización del filtro, para obtener los parámetros que proporcionen la mejor respuesta en frecuencia posible. Una vez completada, se puede observar que el valor de  $S_{11}$  en la Figura 35 es de -20 dB en el ancho de banda deseado, a diferencia de los casos anteriores, donde se lograba alcanzar un valor de -23 dB ya que se ha decidido relajar la especificación dentro de la banda de paso y así, minimizar el valor de  $S_{21}$  en los tramos deseados.

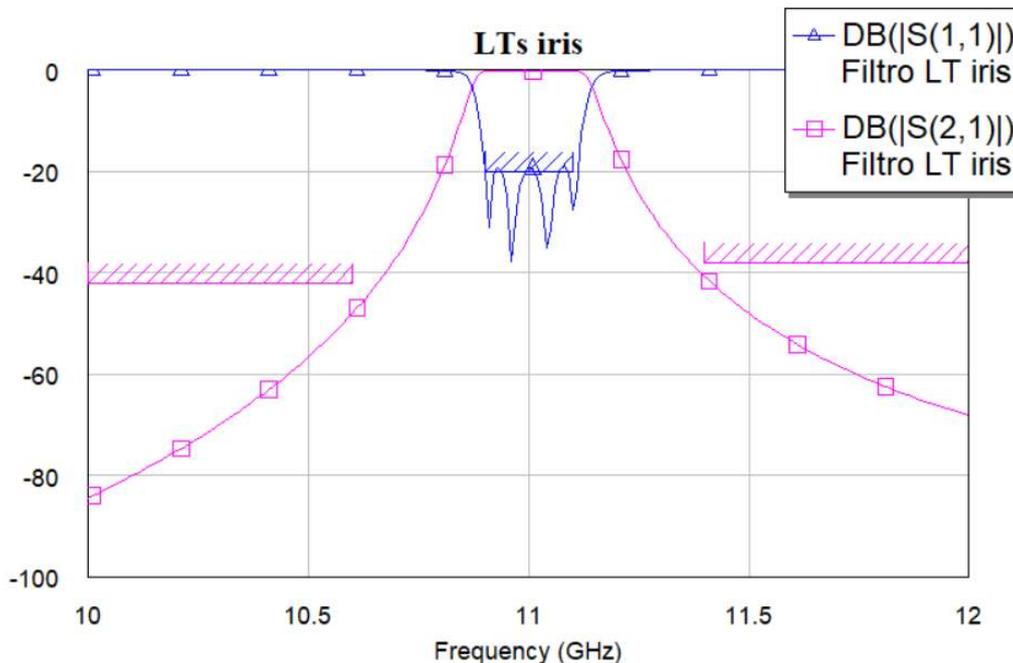


Figura 35. Respuesta en frecuencia del filtro real con implementación de iris

Introducir un objetivo menos exigente permite que el filtro mantenga muy buenos resultados, ya que -20 dB es un resultado óptimo y, además, permite que el sistema obtenga unos anchos de ventana que no distan mucho de los introducidos inicialmente, consiguiendo así unos resultados muy buenos y obteniendo unos anchos de ventana que no se alejan mucho de los iniciales,  $W_{01} = 8.64$  mm,  $W_{12} = 4.869$  mm y  $W_{23} = 4.43$  mm, tal y como se puede observar en la Tabla 5, donde se comprueba que la máxima variación de  $W$  tras la optimización es de 0.41 mm.

W	W inicial	W óptimo
W01	8.73	8.64
W12	5.2	4.869
W23	4.84	4.43

Tabla 5. Comparativa  $W$  antes y después de optimizar el diseño.

### 3.3.2 Filtro diseñado con iris en CST

Tras la realización del diseño en AWR Design Environment es necesario implementar el mismo diseño en CST, un programa de mayor precisión, debido a que AWR no tiene en cuenta la posible interacción entre modos de orden superior de diferentes elementos.

En este caso, para implementar el mismo diseño que en AWR, es necesario crear los bloques del filtro uno a uno, como la Figura 36, donde se indican las variables que lo conforman; para crearlo, es necesario indicar sus dimensiones y ubicación en el espacio, tal y como se observa en Figura 37, donde se crea el segundo bloque del filtro, siendo este la primera ventana, donde  $t$  es el grosor de las ventanas, siendo este de 1 mm, y donde  $L_p$  es la longitud de la línea conectada al puerto, lo que supone que para la creación de bloques del filtro, se tenga en cuenta la ubicación del último bloque generado.

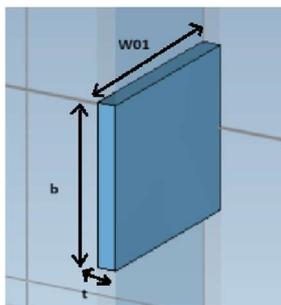


Figura 36. Bloque del primer inversor del filtro en CST.

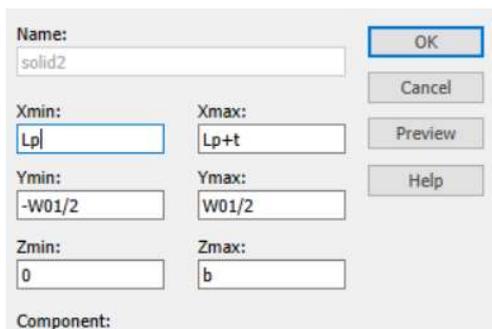


Figura 37. Parámetros de creación de la primera ventana.

De esta manera, se crean todos los bloques que conforman el filtro, cinco iris y seis líneas, de las cuales las dos de los extremos deben tener una longitud superior a  $\frac{\lambda_{g0}}{2}$ , por lo que se les asigna un valor arbitrario de 20 mm a cada una; y, por último, se añaden los dos puertos en los extremos del filtro, dando como resultado la Figura 38.

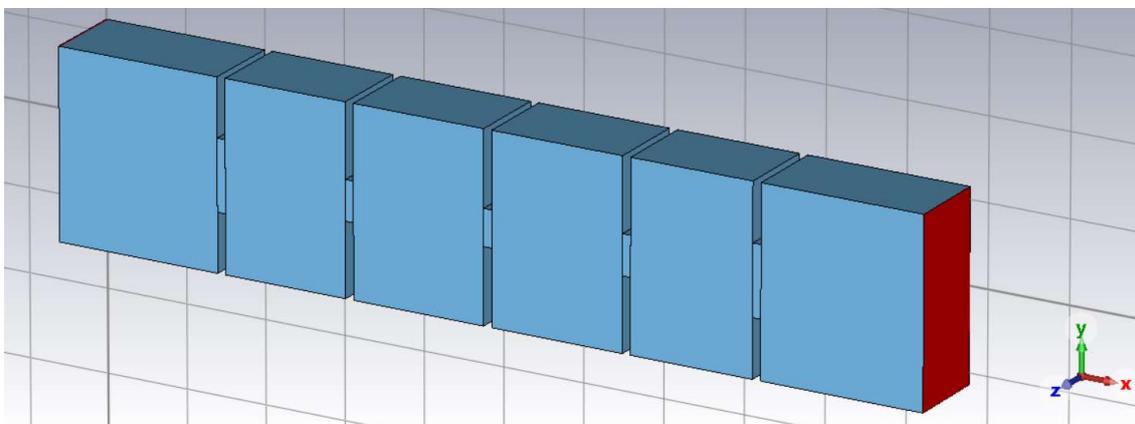


Figura 38. Filtro con 5 iris implementado en CST.

Tras completar el diseño, se simula, y, tal y como se puede observar en la Figura 39, la respuesta en frecuencia no coincide con la observada en AWR, aunque se encuentra cerca del objetivo final; por ejemplo, en este caso se puede observar claramente la falta de un mínimo puesto que se observan tres, mientras que en la Figura 35, se observan 4, que sería lo deseado.

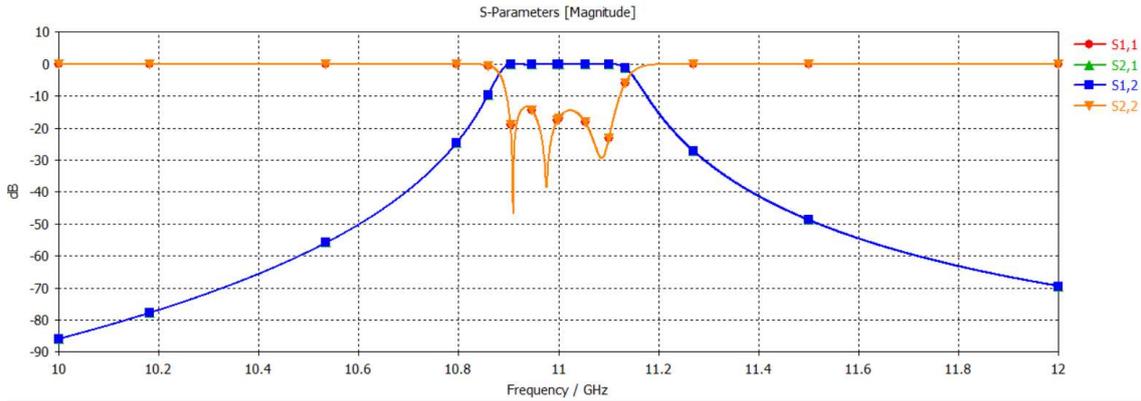


Figura 39. Respuesta en frecuencia del filtro con iris en CST

### 3.3.3 Filtro diseñado con iris en Fest 3D

Al tener dos simulaciones diferentes sobre el mismo diseño, se decide realizar una tercera simulación en otro programa todavía más preciso, llamado Fest 3D, para comprobar cuál es la respuesta más acertada y analizar qué diferencia presentan.

En este caso, el filtro se crea a partir de la creación de bloques a los que se les asignan los valores de altura, anchura y profundidad correspondientes dentro del apartado de propiedades, tal y como se observa en la Figura 40 y en la Figura 41. Tras implementar todos los bloques, es necesario conectarlos a partir de bloques llamados Step, como se muestra en la Figura 42.

A	22.86
B	10.16
L	15.12

Figura 40. Cuadro de propiedades de una línea en Fest 3D.

A	W12
B	10.16
L	1

Figura 41. Cuadro de propiedades de un iris en Fest 3D.

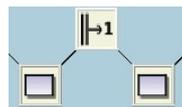


Figura 42. Bloque Step de unión de elementos.

Una vez conectados todos los elementos del diseño, se obtiene la Figura 43, cuya representación en 3D se puede observar en la Figura 44.

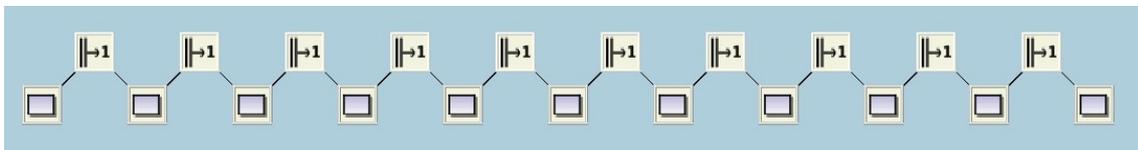


Figura 43. Diseño del filtro con iris en Fest 3D.

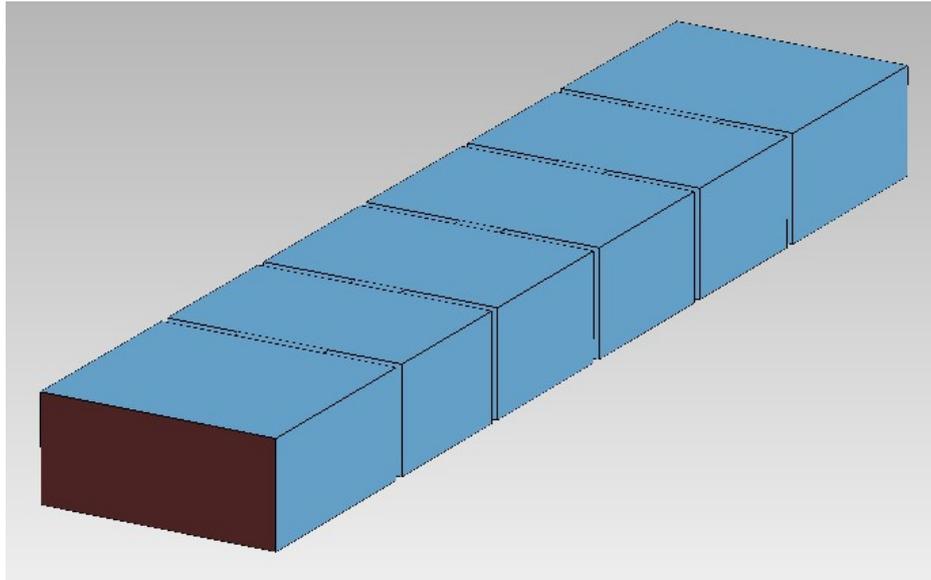


Figura 44. Representación del filtro con iris implementado en Fest 3D.

A continuación, se simula el filtro creado, como se observa en la Figura 45; en ella se observa su similitud con la respuesta en CST, ya que presenta también 3 mínimos, aunque de una profundidad diferente.

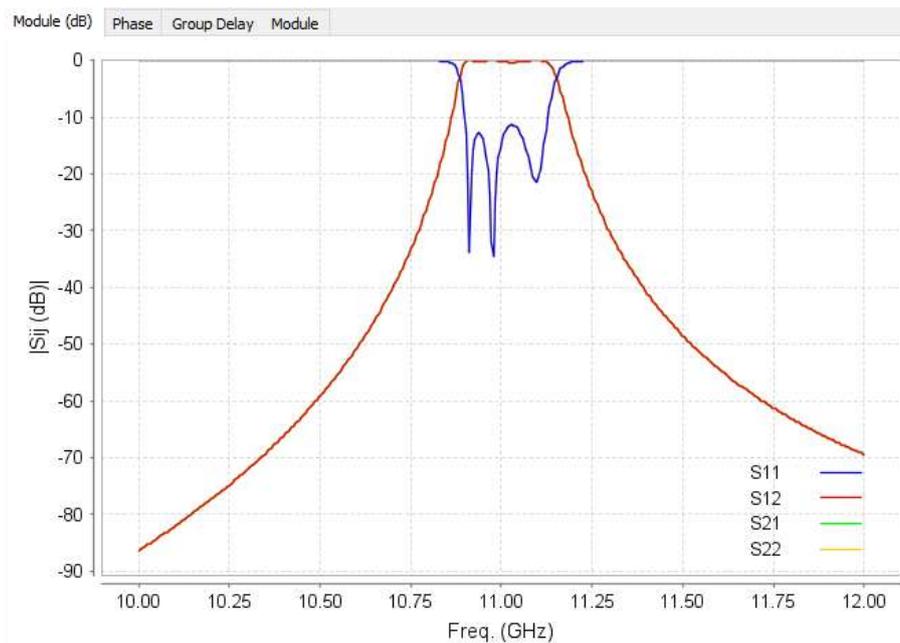


Figura 45. Respuesta en frecuencia del filtro en Fest 3D sin optimizar.

En esta ocasión, se decide optimizar el diseño para comprobar si los valores de  $W$  obtenidos distan mucho de los empleados en los diseños en AWR debido a que este programa presenta una velocidad mayor que CST. Tras la optimización se obtiene la respuesta de la Figura 46, donde se observa la aparición del cuarto mínimo. Además, en la Tabla 6 se puede comprobar que la variación de  $W$  y  $L$  no es muy elevada, tan solo lo necesario para conseguir cuatro mínimos del parámetro  $S_{11}$  en la banda de paso.

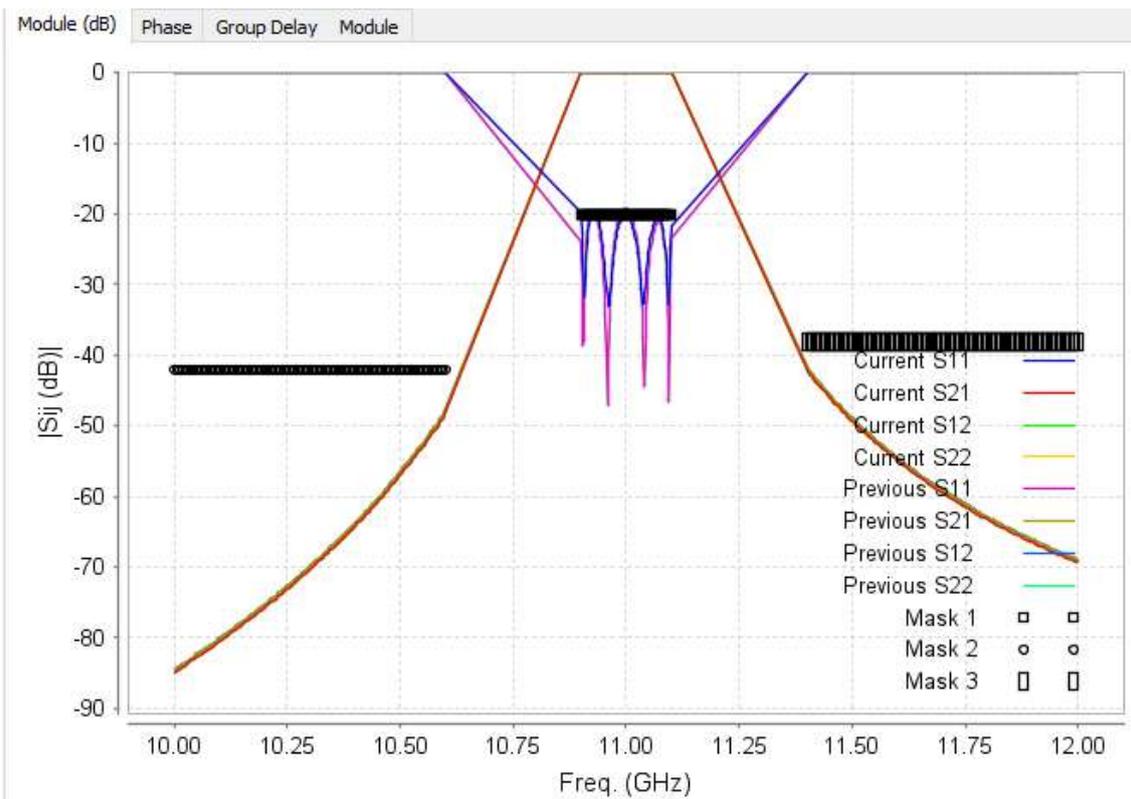


Figura 46. Respuesta en frecuencia del filtro en Fest 3D después de la optimización.

Parámetros	Parámetros iniciales	Parámetros optimizados
W01	8.642	8.812
W12	4.869	4.841
W23	4.433	4.478
L1	15.12	15.138
L2	16.28	16.309

Tabla 6. Comparación de parámetros antes y después de la optimización.

## Capítulo 4. Inserción de ceros en la respuesta

Una vez se han comprobado que los resultados del análisis del filtro de orden 4 empleando cinco iris son adecuados, se desea introducir dos ceros en la respuesta del filtro, uno en la banda superior a la de paso, y uno en la inferior. Para la inclusión de ceros en transmisión es necesario emplear una estructura cuya  $K$  valga cero en la frecuencia en la que se desea introducir éste y que, a su vez, sea, aproximadamente,  $K_0$  en la frecuencia central del sistema. Esto permitirá que la estructura introduzca ceros en la respuesta mientras continúa actuando como inversor.

En el artículo [2] se decide emplear la estructura de la Figura 47 para sustituir dos iris del filtro, por lo que en el diseño que se va a realizar se opta por utilizar el mismo tipo de estructura; además, se opta por la sustitución de los iris situados en segunda y tercera posición, lo cual no va a generar diferencias debido a la simetría que presenta inicialmente el filtro, descartando por completo los extremos ya que, al presentar una  $K$  mayor que el resto, resultaría más complejo obtener los resultados deseados.

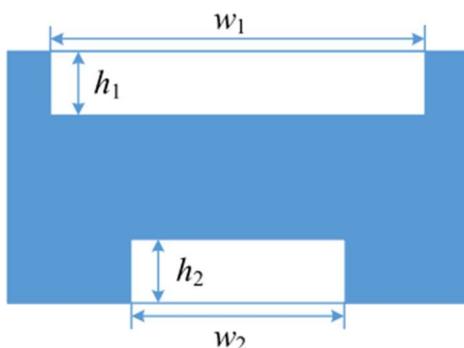


Figura 47. Ventana que se desea implementar para sustituir iris [2].

Para ello, es necesario obtener los valores necesarios de  $K'$  y  $m'$  que presentarán dichos inversores e introducirán dos ceros en la respuesta del filtro. Estos valores se obtienen a partir de un esquemático realizado en AWR como en los casos anteriores. Posteriormente, se pasará a CST, donde, a partir de los valores obtenidos tras la optimización, se observarán los parámetros de la ventana que proporcionen esos resultados.

### 4.1 Inserción del cero en la banda superior de la frecuencia central

En primer lugar, se opta por introducir el cero en la banda superior a partir de la modificación del bloque central. Esto se debe a que la menor constante de inversión presente se sitúa en la posición central del sistema, es decir, en el tercer lugar del filtro creado, lo que implica que, teóricamente, es el cero más sencillo de implementar.

Por este motivo, empleando el mismo esquemático que en el caso anterior, Figura 32, se implementan las variables  $K'_{23}$  o ( $K_{23p}$ ) y  $m'_{23}$  ( $mk_{23p}$ ), siendo estas variables los nuevos parámetros de la ecuación  $K_{23}$ , dando como resultando las ecuaciones tal y como se observan en la Figura 48.

$$\begin{aligned}
 f &= 1e-9 * \_FREQ \\
 K_{01} &= K_{01o} + mk_{01} * (f - f_0) \\
 K_{12} &= K_{12o} + mk_{12} * (f - f_0) \\
 K_{23} &= K_{23po} + mk_{23p} * (f - f_0) \\
 K_{34} &= K_{12o} + mk_{12} * (f - f_0) \\
 K_{45} &= K_{01}
 \end{aligned}$$

Figura 48. Ecuaciones del filtro para introducir un cero en la tercera posición

A continuación, se simula el esquemático y se indican las variables que el sistema debe implementar, siendo estas las longitudes  $L1$  y  $L2$ ,  $K23'o$  y  $mk23'$  y los anchos de los iris  $W_{01}$  y  $W_{12}$ .

Los objetivos que debe cumplir son los mostrados en la Figura 49, aunque al principio se implementan unos más relajados para que el sistema sea capaz de cumplirlos y así, optimización a optimización, restringirlos más, para indicarle al programa de manera adecuada el camino que debe seguir para cumplir los objetivos. De esta forma, como se observa en la Figura 50, se logra introducir un cero en la banda superior e incluso volver a restringir el parámetro  $S_{11}$  a  $-23$  dB en la banda de paso.

Measurement	Enabled	Cost	Weight	L	X Start	X Stop	Y Start	Y Stop	Type
Filtro LT RW:DB(S(1,1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	10.9 GHz	11.1 GHz	-23	-23	Meas < Goal
Filtro LT RW:DB(S(2,1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	MIN	10.6 GHz	-25	-25	Meas < Goal
Filtro LT RW:DB(S(2,1))	<input checked="" type="checkbox"/>	2.019e-28	1	2	11.3 GHz	11.3 GHz	-80	-80	Meas = Goal

Figura 49. Objetivos para introducir un cero en 11.3 GHz.

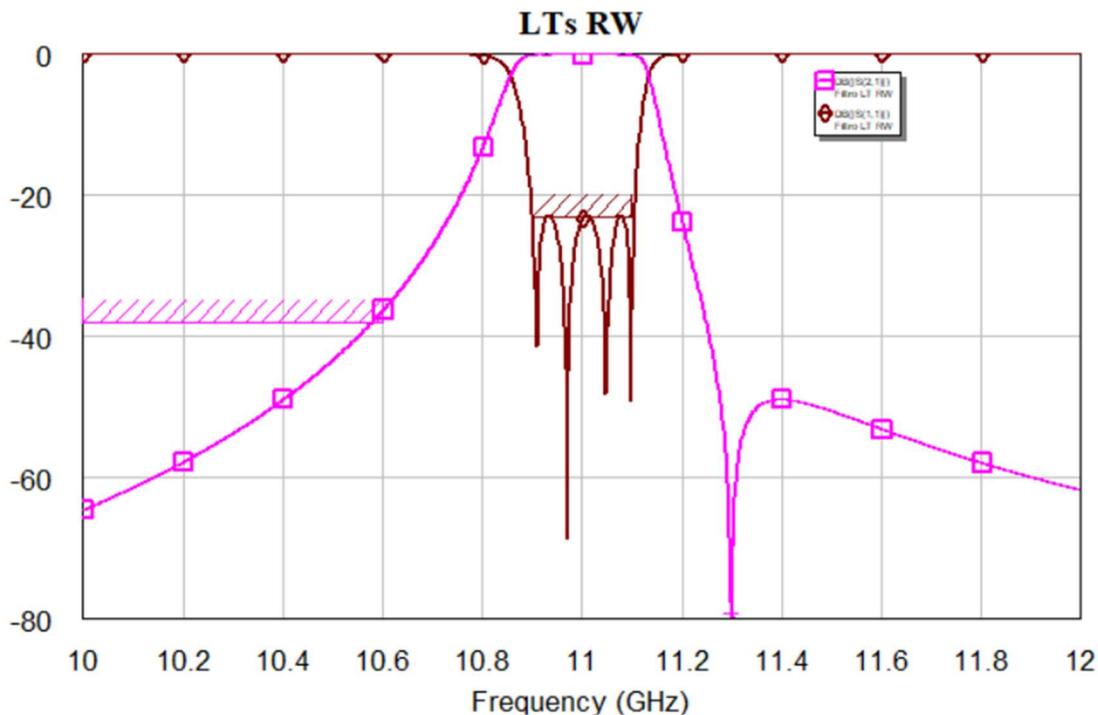


Figura 50. Respuesta en frecuencia con un cero introducido en la banda superior

#### 4.2 Inserción del cero en la banda inferior de la frecuencia central

A continuación, se desea comprobar que el sistema también es capaz de introducir un cero en su banda inferior. Para ello, se intenta, en primer lugar, introducirlo optimizando los parámetros  $K12'o$  y  $mk12'$ , en lugar de  $K23'o$  y  $mk23'$ . Sin embargo, este modelo genera problemas a la hora de introducir el cero; por tanto, se decide introducir el cero también a partir de la ventana central, puesto que el objetivo de este diseño es comprobar que es posible un cero en la banda inferior a la banda de paso.

A pesar de los cambios realizados, en este caso es un poco más complicado obtener los resultados deseados en un primer momento; por tanto, se dirige al sistema cambiando un poco los objetivos cada vez e introduciendo nuevos límites para que las especificaciones que se observan en la Figura 51 se cumplan.

Filtro LT RW:DB(S(1.1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	10.9 GHz	11.1 GHz	-22	-22	Meas < Goal
Filtro LT RW:DB(S(2.1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	11.6 GHz	MAX	-40	-40	Meas < Goal
Filtro LT RW:DB(S(2.1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	MIN	10.65 GHz	-40	-40	Meas < Goal
Filtro LT RW:DB(S(2.1))	<input checked="" type="checkbox"/>	8.781	1	2	10.7 GHz	10.7 GHz	-80	-80	Meas = Goal

Figura 51. Objetivos de la inserción de un cero en la banda inferior.

Una vez se logran los objetivos especificaciones, se obtiene la respuesta en frecuencia de la Figura 52.

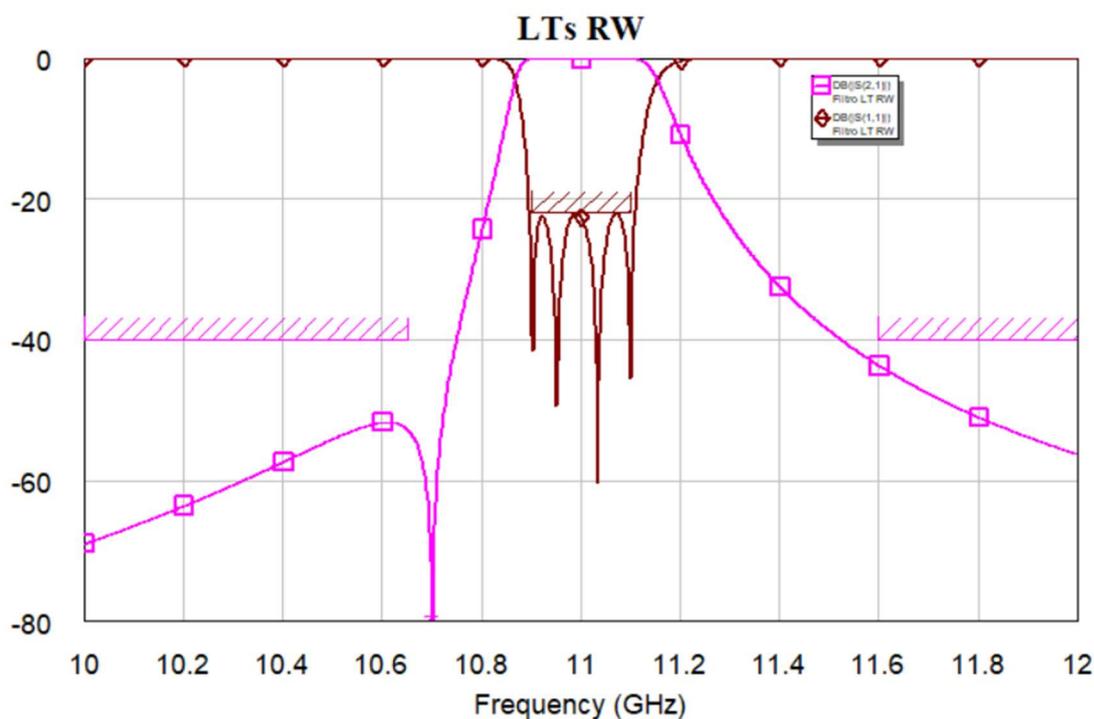


Figura 52. Respuesta en frecuencia con un cero introducido en la banda inferior

### 4.3 Inserción de dos ceros en el filtro de orden cuatro

Tras realizar la comprobación de la posibilidad de introducir ceros tanto en la banda superior como inferior de la banda de paso, se debe intentar combinar ambos ceros en un mismo diseño.

Para lograr esta combinación se sustituyen la segunda y la tercera ventana, siendo la segunda quien introduzca el cero inferior, y la tercera, el superior, esto implica que a los parámetros de la segunda ventana se les asignarán los valores teóricos y a los de la tercera, los calculados en el primer caso; además, los valores de  $K'$  y  $m'$  se restringen en signo, siendo  $K_{12}'$  negativa,  $K_{23}'$ , positiva y las dos pendientes, negativas también, independientemente del signo obtenido para estos parámetros en los casos previos. Tras añadir los parámetros oportunos al diseño, se cambian las ecuaciones del filtro, resultando en la Figura 53.

$$\begin{aligned}
 K_{01} &= K_{01o} + m_{k01o} * (f - f_0) \\
 K_{12} &= K_{12po} + m_{k12p} * (f - f_0) \\
 K_{23} &= K_{23po} + m_{k23p} * (f - f_0) \\
 K_{34} &= K_{34o} + m_{k34o} * (f - f_0) \\
 K_{45} &= K_{45o} + m_{k45o} * (f - f_0)
 \end{aligned}$$

Figura 53. Ecuaciones resultantes tras cambiar el segundo y el tercer inversor.

A continuación, empleando el esquemático con guías e inversores en forma de T, Figura 54, se comienza la optimización para ubicar un cero a cada lado de la banda de paso.

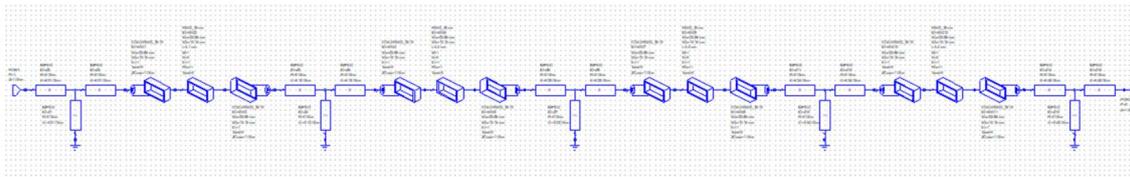


Figura 54. Esquemático del filtro introduciendo dos ceros

Una vez alcanzados dichos objetivos, se van ajustando más a los valores deseados, acercando los ceros a la banda de paso, obteniendo también una mejor respuesta del filtro en la banda de paso al ajustarse la caída de  $S_{11}$  puesto que inicialmente aparecían determinados mínimos de este parámetro fuera de la banda de transmisión; con lo que se obtiene finalmente la gráfica de la Figura 55.

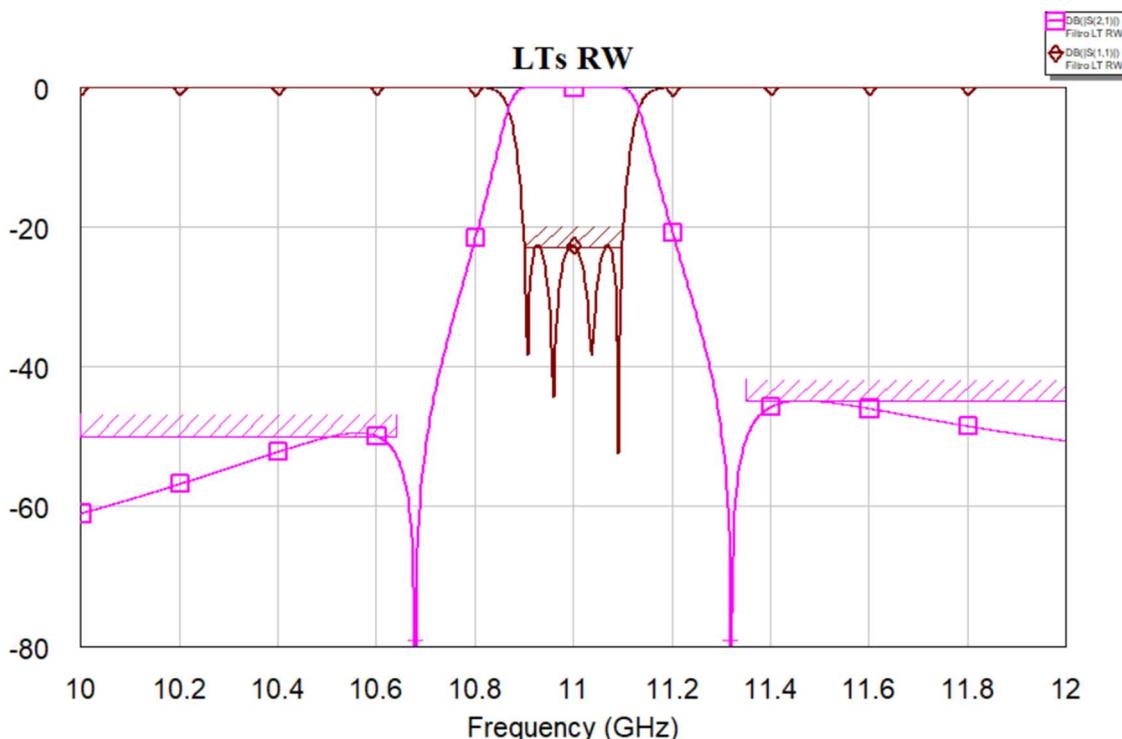


Figura 55. Respuesta en frecuencia del filtro con dos ceros introducidos.

Filtro LT RW:DB(S(1,1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	10.9 GHz	11.1 GHz	-23	-23	Meas < Goal
Filtro LT RW:DB(S(2,1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	MIN	10.64 GHz	-50	-50	Meas < Goal
Filtro LT RW:DB(S(2,1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	11.35 GHz	MAX	-45	-45	Meas < Goal
Filtro LT RW:DB(S(2,1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	10.68 GHz	10.68 GHz	-80	-80	Meas = Goal
Filtro LT RW:DB(S(2,1))	<input checked="" type="checkbox"/>	0	1	2	11.32 GHz	11.32 GHz	-80	-80	Meas = Goal

Figura 56. Objetivos de optimización para la inserción de dos ceros.

Los objetivos de optimización de este diseño se pueden observar en la Figura 56; en ella se aprecia como los ceros se han introducido a 10.68 GHz y 11.32 GHz, encontrándose ambos a la misma distancia de la frecuencia central. Además, se logra obtener un valor de  $S_{11}$  por debajo de -23 dB, así como unos valores muy bajos de señal transmitida en la banda eliminada del filtro, cumpliendo así todos los objetivos impuestos al sistema.

#### 4.4 Obtención de parámetros para la ventana

Una vez obtenidos los valores óptimos de  $K$  y  $m$ , se debe realizar un análisis para conocer los valores de los parámetros que proporcionarán dichos valores. Este análisis se va a llevar a cabo en CST, donde se van a ir variando los distintos parámetros de la ventana, comentada previamente, Figura 57, hasta alcanzar los resultados deseados.

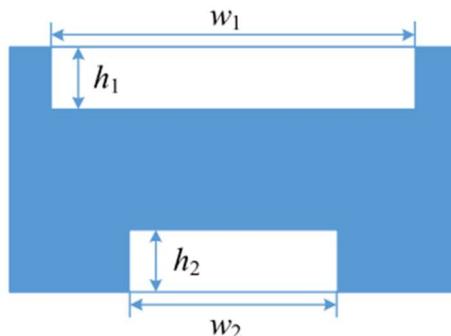


Figura 57. Parámetros de la ventana a implementar [2].

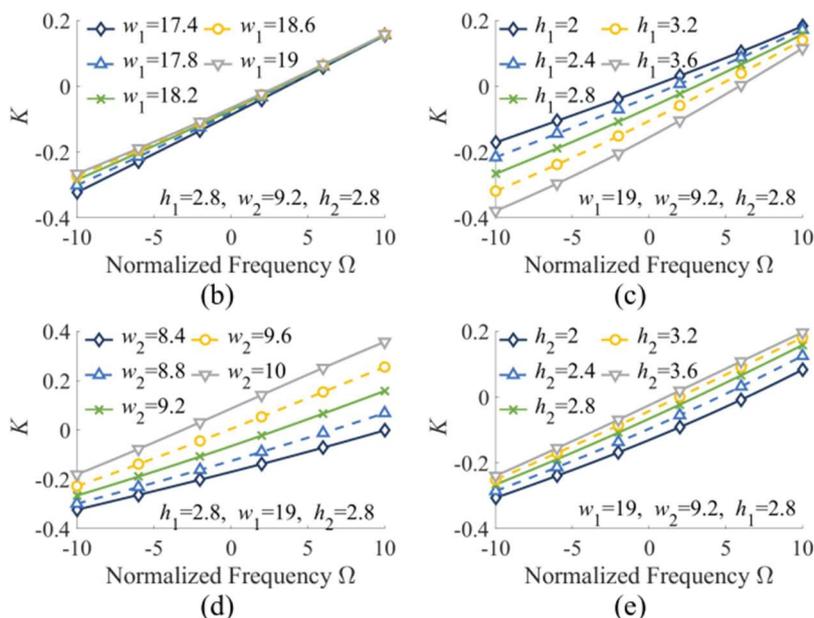


Figura 58. Variación de  $K$  en función de los distintos parámetros. [2]

Por otra parte, teniendo en cuenta la Figura 58, se observa como el valor de  $w_1$  no afecta prácticamente al valor de  $K$ , por lo que se opta por asignarle un valor de 19 mm inicialmente, para comprobar si proporciona una buena aproximación para conseguir posteriormente la recta de  $K$  buscada. Además, hay que tener en cuenta que la pendiente de  $K$  generada en el sistema será de signo contrario al de dichas gráficas puesto que en el artículo [2] se han programado de manera que estas sean de signo positivo, aunque las gráficas de  $K$  sean realmente de signo contrario, como están en el diseño de CST.

#### 4.4.1 Parámetros para la segunda ventana

En primer lugar, se opta por buscar los parámetros que van a introducir el cero de la banda inferior, es decir, los que conforman la segunda ventana. Esta ventana debe cumplir que su parámetro  $K$  en 10.68 GHz sea 0, y que, a 11 GHz sea -0.043307. Tras varios intentos se logra obtener una gráfica que se acerca mucho a los resultados buscados, Figura 59, pasando por 0 a 10.68 GHz y teniendo un valor de -0.04152 a 11 GHz, muy próximo al valor buscado. Esta gráfica es proporcionada por los siguientes parámetros de ventana:  $w_1 = 19$  mm,  $w_2 = 8.97$  mm,  $h_1 = 1.67$  mm y  $h_2 = 3.4$  mm, quedando el inversor como se observa en Figura 60.

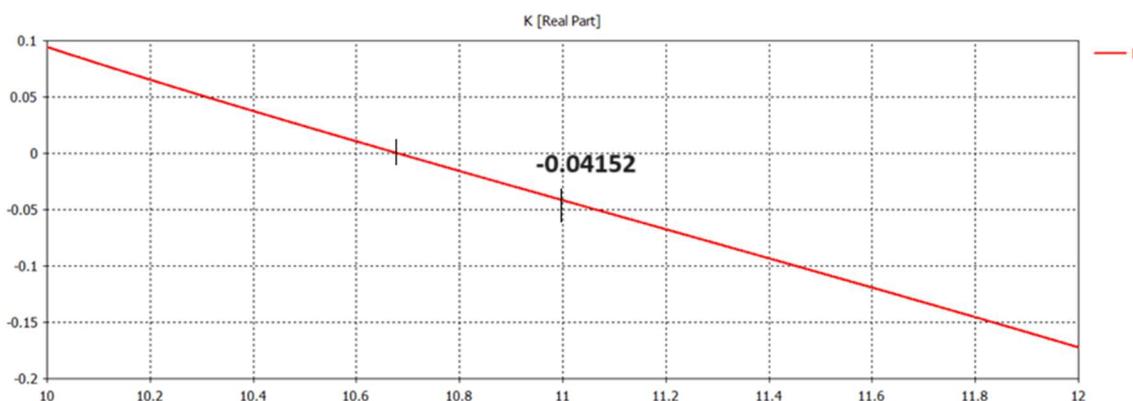


Figura 59. Gráfica de  $K$  para introducir el cero inferior.

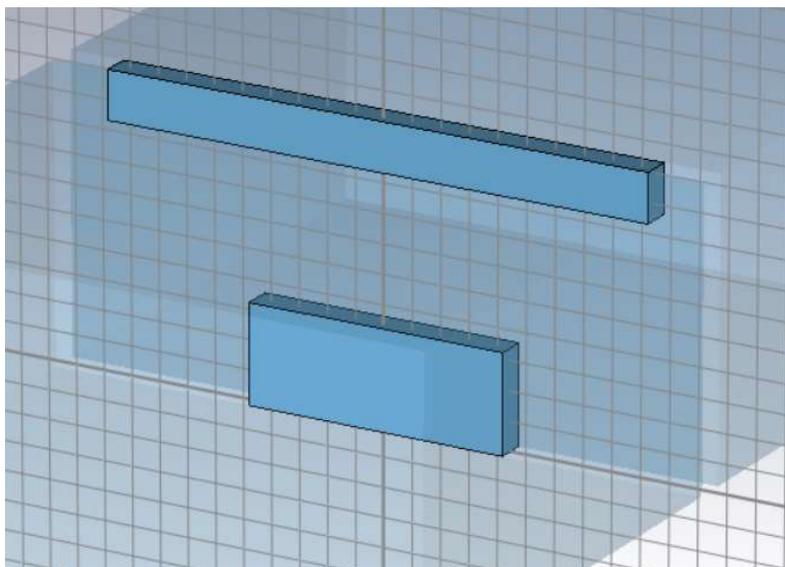


Figura 60. Segunda ventana del filtro.

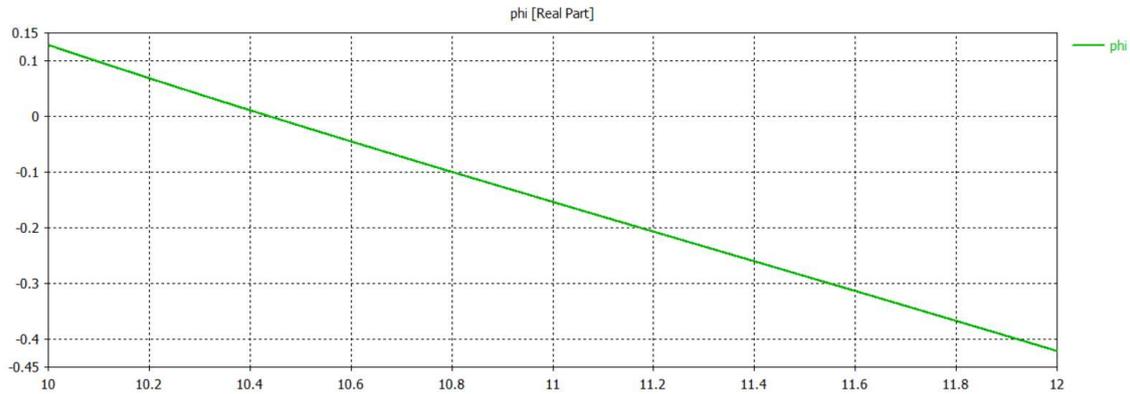


Figura 61. Gráfica de phi para la segunda ventana.

Por otra parte, como se observa en la Figura 61, se obtiene el valor de phi correspondiente a la segunda ventana, presentando este un valor de 0.15335, al cambiarle el signo al valor obtenido en la gráfica para la realización de cálculos posteriores.

#### 4.4.2 Parámetros para la tercera ventana

Una vez obtenidos los valores para la segunda ventana, se realiza el mismo procedimiento para obtener los valores de los parámetros que proporcionen un valor de K de 0.03286 a 11 GHz y que en 11.32 GHz sea 0. Tras realizar varios intentos, mediante la realización de cambios a determinados parámetros en función de qué se desee cambiar de la función, se obtiene la gráfica de la Figura 62, donde se observa una gráfica adecuada, puesto que pasa por cero a 11.318 GHz y presenta un valor de 0.03375 a 11 GHz.

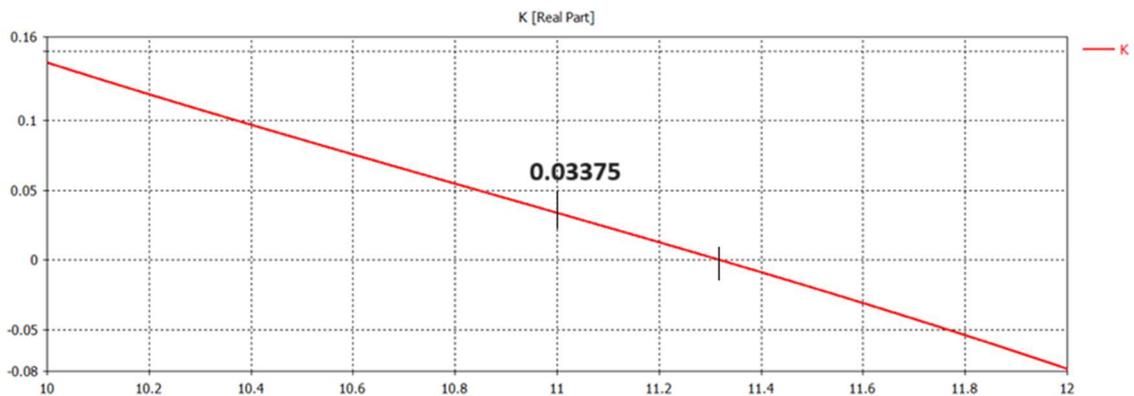


Figura 62. Gráfica de la K de la tercera ventana.

Esta gráfica viene proporcionada por los siguientes parámetros de ventana:  $w_1 = 19$  mm,  $w_2 = 8.98$  mm,  $h_1 = 1.57$  mm y  $h_2 = 1.85$  mm, dando como resultado la ventana de la Figura 63, y proporcionado la gráfica de phi de la Figura 64, cuyo valor a 11 GHz es -0.03375.

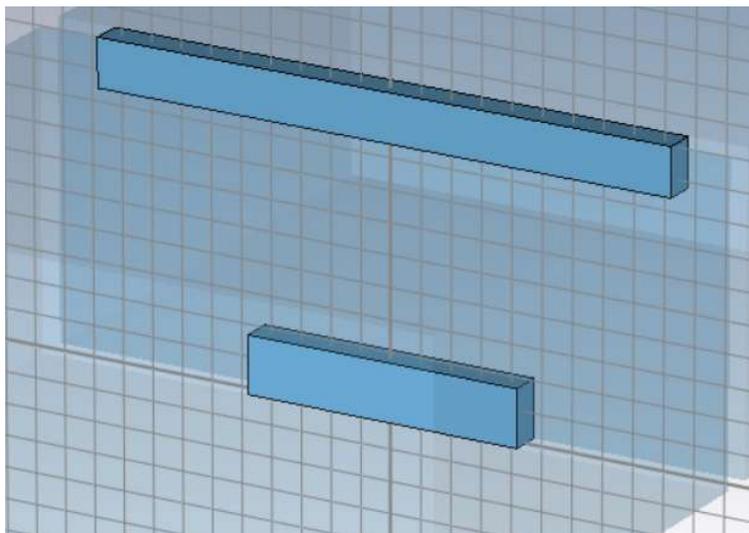


Figura 63. Tercera ventana del filtro.

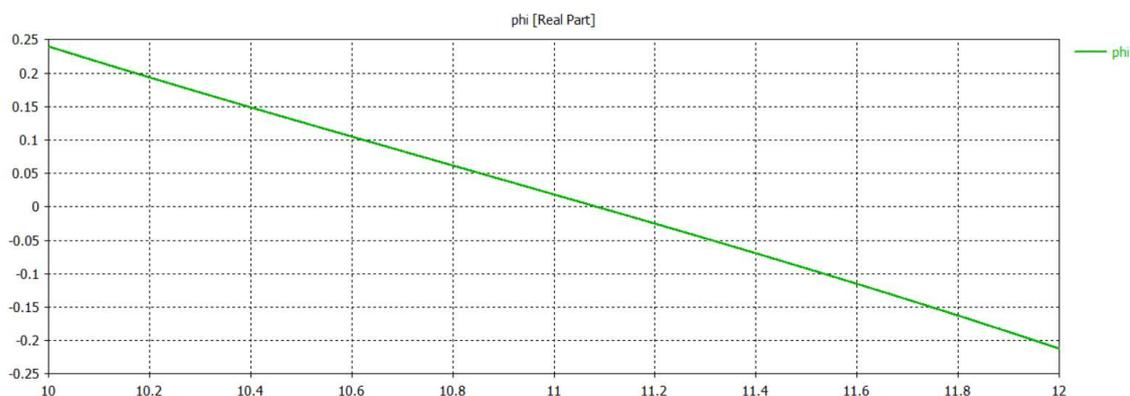


Figura 64. Gráfica de phi para la tercera ventana.

#### 4.5 Filtro con dos ceros introducidos en CST

Una vez obtenidos los parámetros de las ventanas que se van a sustituir, se puede pasar a la creación del diseño del filtro final con inserción de dos ceros, tomando como base el creado en CST previamente con cinco iris.

Para ello, queda calcular el valor de las nuevas longitudes, dependientes del valor de phi de cada ventana. Por tanto, a partir del inversor empleado en CST a lo largo de todo el proyecto, se obtiene la Figura 65, de donde se obtienen los valores restantes de phi para el filtro a realizar, siendo estos, 0.52075 para la primera ventana, 0.147475 para la cuarta, y 0.5247 para la quinta.

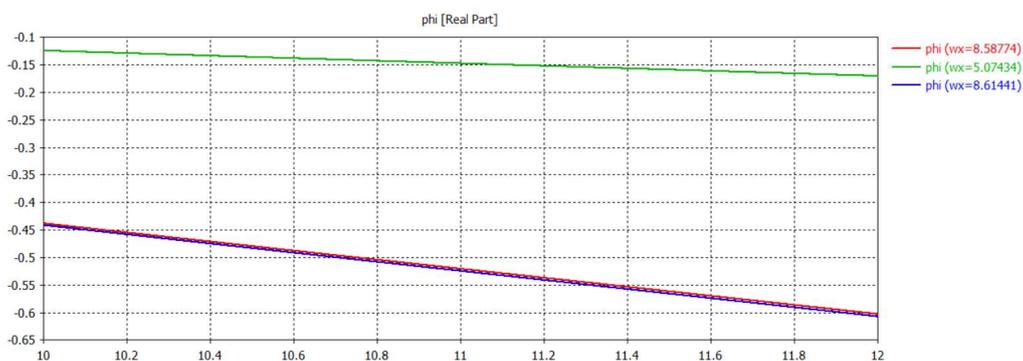


Figura 65. Gráfica de phi para la primera, cuarta y quinta ventana.

De esta manera, los valores de las ventanas que se van a introducir en el diseño de CST se pueden observar en la Tabla 7.

Parámetros	Valores (mm)
W01	8.587
W34	5.074
W45	8.614
w1_2	19
w2_2	8.97
h1_2	1.67
h2_2	3.4
w1_3	19
w2_3	8.98
h1_3	1.57
h2_3	1.85

Tabla 7. Parámetros que se van a introducir en el filtro.

A partir estos valores, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\varphi}{2} = \beta l \quad (4.1)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_{g0}} \quad (4.2)$$

$$L_i = \frac{\lambda_{g0}}{2} - l_{i-1,i} - l_{i,i+1} \quad (4.3)$$

Se obtienen los valores de las longitudes, observándose los cálculos y resultados más en detalle en la Figura 66, siendo  $\lambda_{g0}$ , 33.93 mm. De esta forma se obtienen los siguientes resultados para las longitudes de cada línea del filtro a diseñar, cuyos valores son L1 = 15.29 mm, L2 = 16.64 mm, L3 = 16.58 mm y L4 = 15.16 mm.

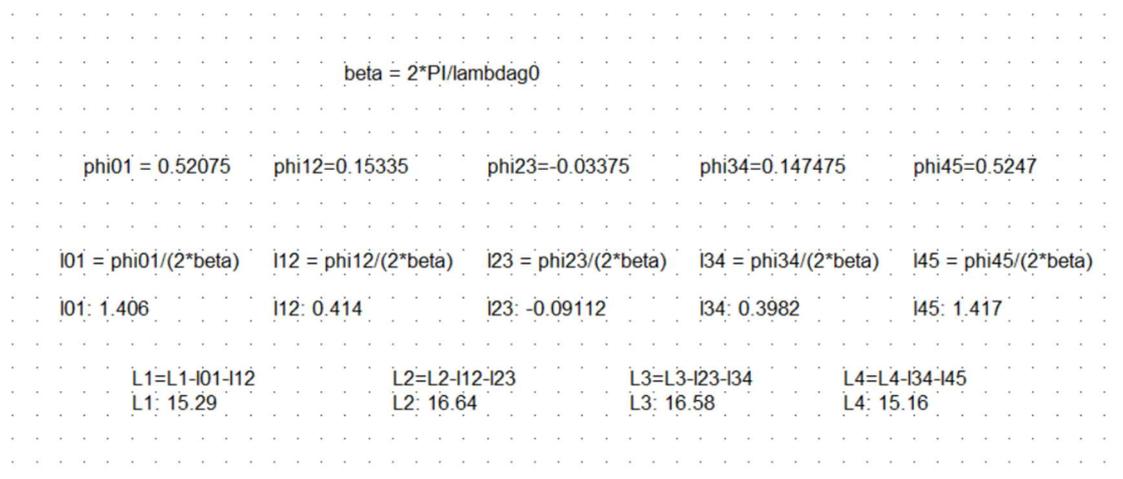


Figura 66. Cálculos para la obtención de las longitudes de las líneas del filtro.

Con los resultados obtenidos, se modifica el filtro de la Figura 38, y se obtiene la Figura 67, cuyas ventanas se observan más claramente en la Figura 68, la cual muestra las cinco ventanas presentes en el filtro.

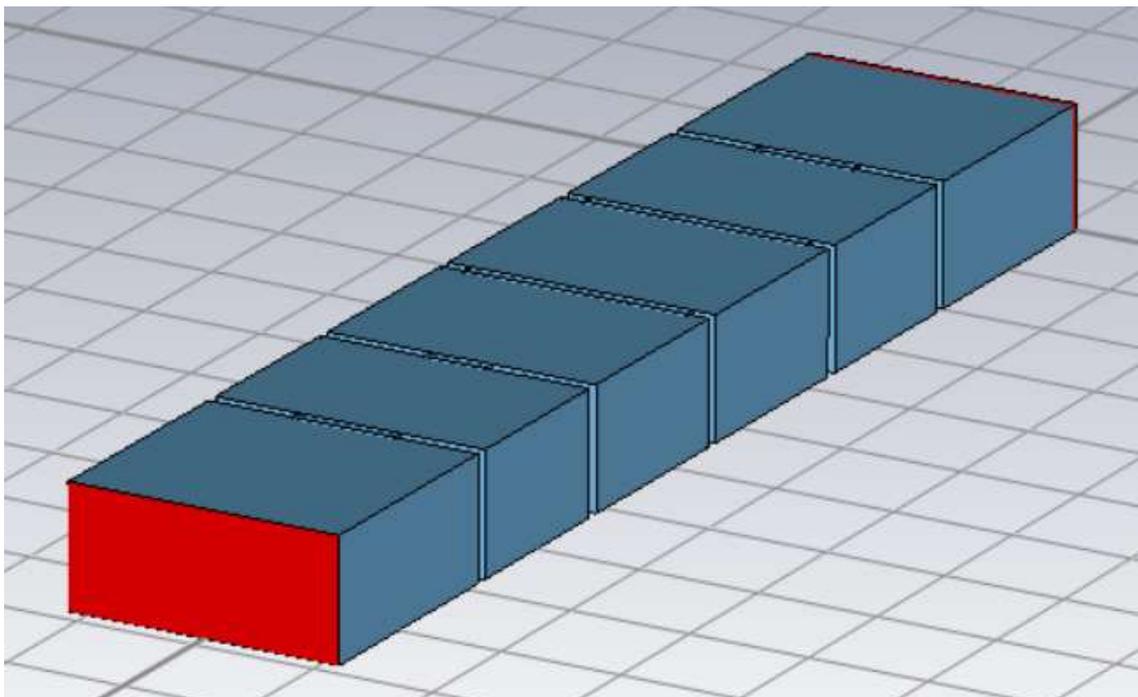


Figura 67. Filtro para introducir dos ceros en la respuesta.

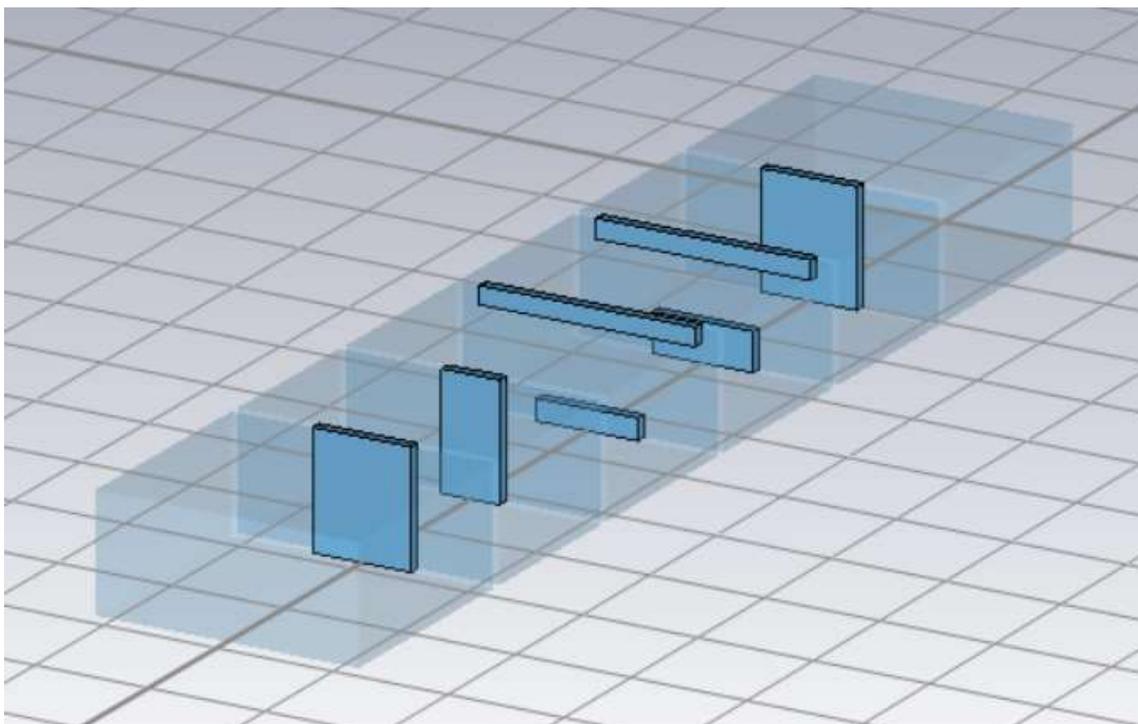


Figura 68. Ventanas del filtro en CST.

A partir de este diseño del filtro de orden 4 se realiza la simulación pertinente, obteniendo la Figura 69, donde se observa una buena respuesta como primer diseño, objetivo principal de realizar el diseño primeramente en AWR. Se puede ver como se insertan dos ceros cerca de las frecuencias esperadas, más en concreto, a 10.65 GHz y a 11.31 GHz. Sin embargo, el valor de  $S_{11}$  en la banda de transmisión es más alto de lo esperado. Por tanto, se debe realizar una optimización del filtro para obtener los resultados esperados.

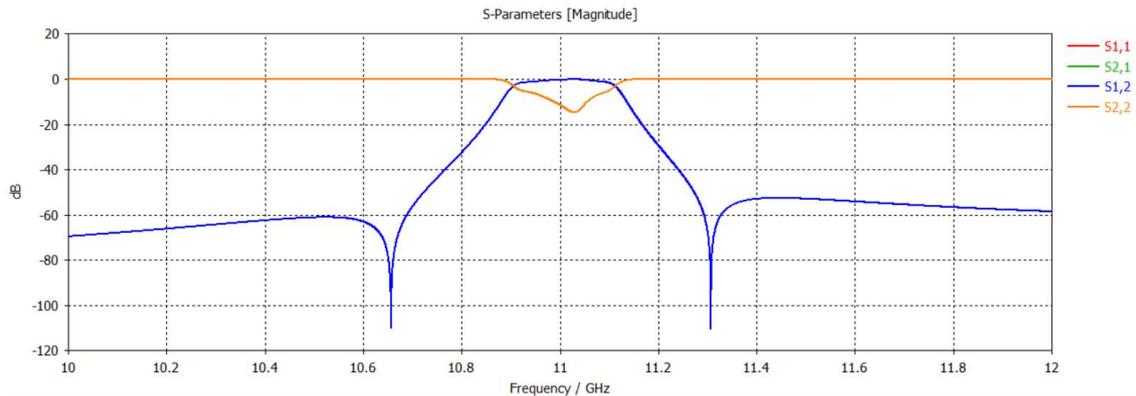


Figura 69. Simulación del filtro diseñado en CST.

Para la realización de esta optimización, se marcan 15 parámetros optimizables, todas las longitudes, anchos de ventana y parámetros de la segunda y tercera ventana.

Sin embargo, debido a la precisión requerida para obtener los valores óptimos y al tiempo que necesita CST para realizar la optimización, se observa que realizarla empleando este programa puede ser muy costoso conseguir reducir el parámetro  $S_{11}$ . Por tanto, se opta por intentar realizar la misma optimización utilizando Fest 3D.

Para ello, se deben realizar cambios al esquemático de la Figura 43 introduciendo las ventanas con forma de H. En esta ocasión, además, se opta por cambiar la tercera y cuarta ventana para tener el mismo orden de ventanas que el empleado en el artículo tomado como ejemplo [2]. Con todo esto, se obtiene el diseño de la Figura 70, donde se observan las diferentes ventanas del filtro conectadas mediante las líneas correspondientes.

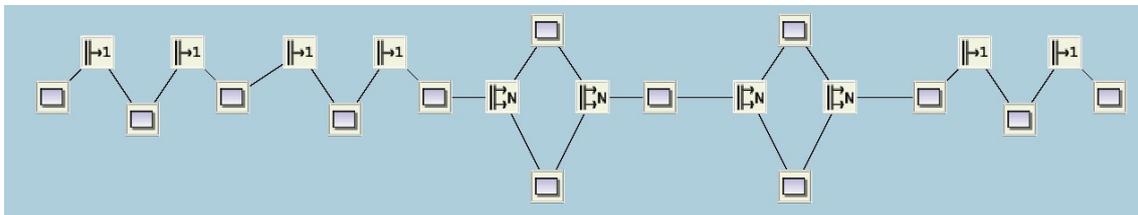


Figura 70. Esquemático en Fest para introducir dos ceros.

Para conseguir una simulación precisa, es necesario implementar las especificaciones generales de la Figura 71.

Num. of accessible Modes	30
Num. of MoM basis functions	90
Num. of Green's function terms	900

Figura 71. Especificaciones para una óptima precisión.

Una vez introducidos todos los parámetros e información relevante para la simulación de la respuesta, se simula y se obtiene, a la precisión adecuada, la Figura 72.

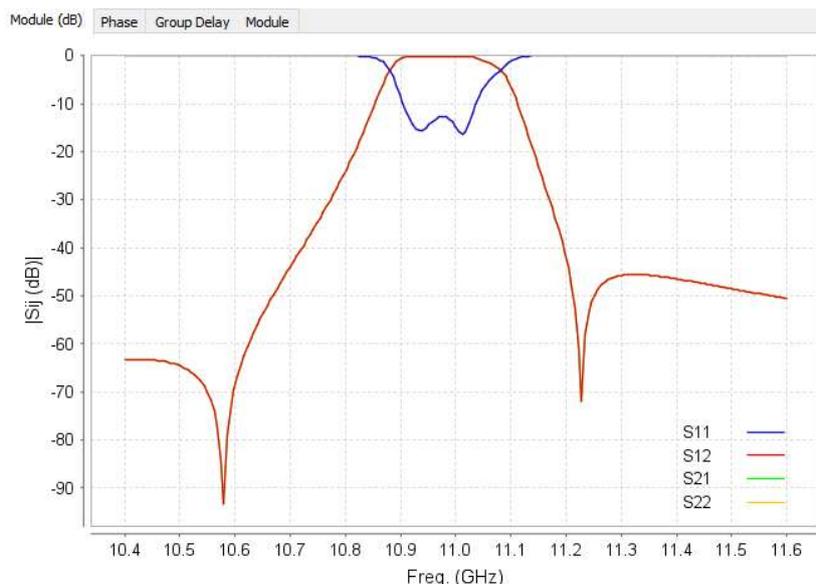


Figura 72. Filtro sin optimizar en Fest 3D.

Una vez indicados los parámetros a optimizar y los objetivos de optimización, se realiza la optimización del filtro, con lo que se obtiene la Figura 73, donde se pueden observar los dos ceros introducidos y como el factor de reflexión sí que logra estar por debajo de los -22 dB, logrando los objetivos requeridos al inicio del proyecto, puesto que la banda de transición es reducida y la transmisión de señal en la banda eliminada es muy pequeña.

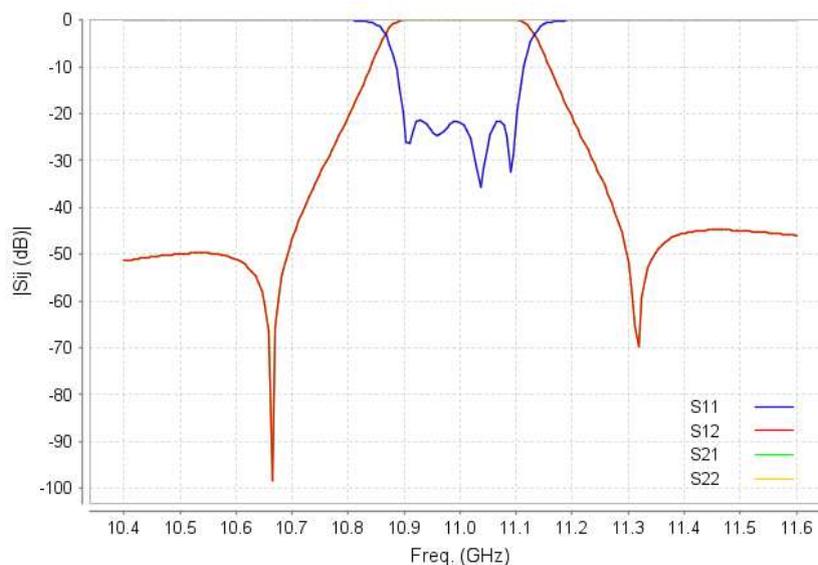


Figura 73. Filtro optimizado en Fest 3D.

Los parámetros óptimos obtenidos se observan junto a los implementados inicialmente en la Tabla 8. Para realizar esta comparativa se recupera el orden empleado en el filtro a lo largo de todo el trabajo para emplear la misma nomenclatura.

Parámetros (mm)	Iniciales (mm)	Optimizados (mm)	Diferencia resultante (mm)	Diferencia resultante (%)
L1	15.29	14.897	0.393	2.5703
L2	16.64	16.497	0.143	0.859

L3	16.58	16.532	0.048	0.2895
L4	15.16	14.977	0.183	1.207
W01	8.588	9.233	0.645	7.5105
W34	5.074	5.166	0.092	1.813
W45	8.614	9.002	0.388	4.504
w1_2	19	16.191	2.809	16.191
w2_2	8.97	9.733	0.763	8.506
h1_2	1.67	2.414	0.744	44.55
h2_2	3.4	2.784	0.616	18.118
w1_3	19	18.96	0.04	0.211
w2_3	8.98	8.805	0.175	1.945
h1_3	1.57	2.084	0.514	32.739
h2_3	1.85	2.316	0.466	25.1892

Tabla 8. Comparación de parámetros tras la optimización en Fest 3D.

En esta tabla se pueden observar los valores iniciales, los finales y la diferencia resultante entre ellos. Generalmente, la diferencia entre ambos valores no es elevada, superando una única vez el milímetro. Sin embargo, como determinados parámetros son muy pequeños, la diferencia en porcentaje en determinados casos es algo más elevada, aunque siguen siendo valores muy próximos.

## Capítulo 5. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

### 5.1 Conclusiones

En primer lugar, se han realizado los cálculos teóricos necesarios para obtener los valores de  $g$  correspondientes al filtro de Chebychev de orden 4 empleado. A continuación, se han obtenido funciones de diferentes parámetros en función del ancho de ventana empleado.

Posteriormente, se han realizado diseños de filtros, comenzando por el ideal, cuyos componentes, como su nombre indica, son ideales, y se estudia su respuesta en frecuencia. A continuación, se han sustituido las líneas ideales por guías de onda, las cuales presentan carácter dispersivo, punto clave del estudio que se ha realizado, y se han analizado las diferencias entre ambos filtros.

Una vez completado el análisis de este filtro, se ha cambiado el modelo de inversor en forma de T y se han implementado iris en su lugar. Este ha sido el diseño base a partir del cual se han insertado posteriormente los ceros. Este diseño se estudia en diferentes programas de diferente precisión para realizar una comparativa entre ellas y ver qué resultados proporciona un filtro paso banda cuyas cinco ventanas son iris.

Tras la realización de este diseño de manera precisa, se ha comenzado el estudio para que el filtro diseñado inserte dos ceros. Para ello, se ha comprobado que sea posible insertar un cero en las frecuencias deseadas y, una vez confirmado, se han introducido los ceros sustituyendo dos de los iris, el segundo y el tercero, puesto que el filtro inicialmente era simétrico, por otras estructuras, cuyos parámetros se obtuvieron posteriormente.

Antes de obtener dichos parámetros, se han calculados los valores de  $K_0$  que permiten que en las frecuencias deseadas no se transmita señal. Una vez obtenidos esos valores, en CST se han calculado los parámetros de las estructuras correspondientes que hacen que el parámetro  $S_{12}$  sea 0 en las frecuencias deseadas.

Para poder optimizar los parámetros requeridos para la inserción de dos ceros en el filtro, se ha realizado el diseño final en Fest 3D, donde se ha logrado obtener la respuesta deseada. Con esto, se logra demostrar la posibilidad de reducir la banda de transición mediante la inserción de ceros al cambiar determinadas estructuras de ventana. Sin embargo, este diseño necesita una precisión demasiado elevada para poder realizarse mediante maquinaria a día de hoy, por lo que se deben realizar los ajustes pertinentes al filtro una vez creado.

### 5.2 Propuesta de trabajo futuro

Tal y como se realiza en el artículo [2], donde se realizan diversos tipos de ventana, se puede analizar qué ocurriría al insertar postes u otras estructuras en el filtro en lugar de ventanas en forma de H. Esto permitirá analizar el comportamiento del filtro en función de las estructuras que lo componen, así como analizar si existen otras estructuras que faciliten la inserción de estos ceros de manera física.



## Bibliografía

- [1] S. C. Borrás, Fundamentos de la Teoría de Filtros, Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2016.
- [2] Y. Zhang, H. Meng y K. L. Wu, «Direct Synthesis and Design of Dispersive,» *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, vol. 68, nº 5, 2020.
- [3] «MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico,» The MathWorks, Inc., [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>. [Último acceso: 21 junio 2024].
- [4] «AWR Microwave Office | Cadence,» Cadence Design Systems, [En línea]. Available: [https://www.cadence.com/en\\_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-microwave-office.html](https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-microwave-office.html). [Último acceso: 21 junio 2024].
- [5] «Software de simulación y análisis de EM 3D CST Studio Suite,» Dassault Systèmes, [En línea]. Available: [https://www.cadence.com/en\\_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-microwave-office.html](https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-microwave-office.html). [Último acceso: 21 junio 2024].
- [6] «Fest3D - Passive Component Design| SIMULIA - Dassault Systèmes,» Dassault Systèmes, [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/products/simulia/fest3d>. [Último acceso: 21 junio 2024].
- [7] «Filtro pasa banda (BPF),» Musiki-2016|Creative Commons Atribución, [En línea]. Available: [https://musiki.org.ar/Filtro\\_pasa\\_banda\\_%28BPF%29](https://musiki.org.ar/Filtro_pasa_banda_%28BPF%29). [Último acceso: 21 junio 2024].
- [8] V. E. Boria Esbert y S. Cogollos Borrás, Líneas de transmisión. Tema 5. Filtro de microondas, 2020.
- [9] F. P. Foix, «Laboratorios Virtuales Universitat Politècnica de València,» [En línea]. Available: <https://labmatlab.upv.es/eslabon/Filtros/>. [Último acceso: 21 junio 2024].

## Anexo I. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030

Relación del trabajo de fin de grado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.				X
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.	X			
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsables.				X
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				X

Este proyecto cumple a un nivel alto lo siguientes ODS de la Agenda 2030:

- ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.  
Las empresas que decidan emplear este tipo de filtros para reducir su banda de transición presentarán una mejora en la calidad del producto al reducirse la banda de transmisión y, con ello, las posibles interferencias; esto podría desembocar en un aumento de las ventas de los productos que decidan implementarlos en sus sistemas.
- ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.  
Esta implementación implicaría una mejora en la calidad de los filtros, altamente empleados en el campo de las telecomunicaciones.