

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño de filtros en guía de onda rectangular de alta selectividad



Grado en Ingeniería en
Tecnologías de Telecomunicación

Autor: Eloy Albizu Ciaurriz

Director/es: Iván Arregui Padilla, Miguel Ángel Gómez Laso

Pamplona, 30 junio 2016





Eloy Albizu Ciaurriz



Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecerle a mi tutor Iván por su dedicación durante estos tres meses de trabajo, en los cuales ha estado disponible siempre que lo he necesitado. Con quien he aprendido mucho.

También quiero agradecer a Mikel por haberme dado la oportunidad de realizar este Proyecto Fin de Carrera que en cuanto me conto de que se trataba no dude en aceptarlo.

También quiero agradecer a todos los miembros del grupo de investigación con quienes he estado a gusto en las diferentes reuniones, aunque siempre se alargaran más de la cuenta.

Del mismo modo a mis compañeros de laboratorio, Cristian y Jon Mikel, en especial a este último quien me ha ayudado cada vez que se lo pedía, ánimo con tu tesis que no queda nada .Y también a mis compañeros de carrera que aunque cada vez estamos más dispersos, a muchos ya os puedo llamar amigos y habéis sido muy importantes durante estos años y lo seguiréis siendo.

Por ultimo dar las gracias a mi familia que me ha apoyado en todo momento y a mis amigos por siempre estar cuando se les necesita.

Resumen

En este Trabajo Final de Grado se va a abordar el diseño de filtros con respuesta paso banda de alta selectividad. Para ello se va a partir de una técnica de diseño de filtros en guía de onda rectangular que ha propuesto el grupo de investigación en el que voy a realizar este trabajo. Esta técnica permite conseguir dispositivos de altas prestaciones tales como grandes anchos de banda de rechazo, alta potencia y tamaño compacto. Sin embargo, no permite obtener respuestas paso banda de pendientes muy abruptas. Por lo tanto, para mejorar este aspecto se van a utilizar singlets, es decir, elementos que utilizan la interacción entre los modos resonantes y no resonantes que aparecen en una cavidad para conseguir ceros de transmisión próximos a la banda de paso del filtro.

Para realizar este trabajo se van a utilizar los simuladores electromagnéticos comerciales FEST3D y CST Microwave Studio.

Palabras clave

Guía de onda rectangular, filtro paso banda, filtro paso bajo, cavidad resonante, modos no resonantes.

Abstract

In this Project the design of filters with bandpass frequency response and high selectivity is accomplished. In order to achieve this, I will make use of a method that has been previously proposed by me research group for the design of low-pass filters. This technique allows to achieve high performance devices such as large bandwidths rejection, high power, and compact size. However, it is not possible to use this design technique to obtain band-pass frequency responses with very steep slopes. Therefore, to improve this issue I will use singlets, i.e., elements that use the interaction between the resonant and non-resonant modes appearing in a cavity to get transmission zeros near the passband of the filter.

To perform this work we are going to use the commercial electromagnetic simulators FEST3D and CST Microwave Studio.

Key words

Rectangular wave, band-pass filter, low-pass filter, resonant cavity, non-resonant modes.

Contenido

1	Introducción	8
2	Fundamentos teóricos	10
2.1	Guía de onda rectangular	10
2.2	Modos de propagación	11
2.3	Modo TM.....	12
2.4	Modo TE.	12
2.5	Representación de los modos TE y TM	12
2.6	Singlets	13
2.7	Guía estándar WR-75	14
2.8	Diseño de filtros clásicos.	14
2.8.1	Implementación de LPF con saltos de guía	15
2.8.2	Implementación de LPF mediante commensurate-lines en guía rectangular	17
2.8.3	Filtro paso banda clásicos	18
2.8.3.1	Conceptos básicos para el diseño de filtros de plano-H.	18
2.8.3.2	Caracterización del filtro Chebysheff.	18
2.8.3.3	Definición de los parámetros de circuito para el filtro pasó bajo Chebysheff.19	
2.8.3.4	Transformaciones frecuenciales.	21
3	Filtros de guía de onda de alta selectividad	23
3.1	Filtro paso bajo	23
3.1.1	Método de diseño	23
3.1.1.1	Bloque del filtro.....	23
3.1.1.2	Red de adaptación.....	25
3.2	Filtro paso banda.....	25
3.2.1	Método de diseño	26
3.2.1.1	Estructura Paso Alto.	26
3.2.1.2	Estructura paso bajo	27
3.2.1.3	Combinación.....	27
3.3	Diseño del filtro	27
3.3.1	Introducción	27
3.3.2	Diseño del filtro paso banda	27
3.3.3	Características del filtro.....	28
3.3.4	Diseño del filtro paso banda de guía de onda rectangular	28
3.4	Diseño de Filtros de guía de onda de alta selectividad	31
3.4.1	Introducción	31
3.4.2	Diseño filtro con un singlet	31



3.4.2.1	Singlet derecha.....	32
3.4.2.2	Singlet izquierda.....	37
3.4.3	Diseño filtro con ambos singlets.....	41
3.4.4	Comparación entre diferentes soluciones.....	45
3.4.4.1	Filtro paso banda con múltiples elementos de rechazo (Stubs).....	45
3.4.4.2	Filtro paso banda clásico inductivo.....	47
3.4.4.3	Filtro paso banda con singlets y sin singlets.....	49
4	Conclusiones y líneas futuras.....	51
4.1	Conclusiones.....	51
4.2	Líneas Futuras.....	51
5	Bibliografía.....	52
5.1	Libros.....	52
5.2	Artículos y conferencias.....	52

1 Introducción

El concepto de comunicación no es fácil de definir y con frecuencia se asume que todos tenemos intuitivamente la idea de lo que es. Para las personas y animales, puede definirse como el intercambio de información entre individuos mediante un sistema común de símbolos, bien sea mediante lenguaje, signos o gestos. La definición anterior puede extenderse también a la comunicación entre máquinas, en cuyo caso los símbolos que representan la información deben reunir características especiales. La ingeniería de telecomunicación o ingeniería de comunicaciones es la rama de la ingeniería que se ocupa de la generación, transmisión, recepción y procesamiento de señales ya sea por medios eléctricos, electromagnéticos, electroacústicos, ópticos, etc., y los sistemas de telecomunicación son aquellos que mediante el empleo de técnicas y dispositivos adecuados realizan el transporte de información entre una fuente y uno o más destinatarios finales.

Así, por información se entiende aquí el conjunto de señales, producidas por fenómenos físicos, registrados, clasificados, organizados y relacionados, con un significado preciso para un destinatario específico.

Asimismo, por señal se entiende la representación de una magnitud física, detectable, variable en el tiempo, el espacio o ambos, a la que se puede asignar un determinado significado o contenido de información.

Después de esta pequeña introducción centrándonos ya en las aplicaciones de telecomunicaciones se encuentran las comunicaciones por satélite, en las cuales es esencial la utilización de dispositivos de microondas que nos permitan el paso de la señal deseada mientras eliminan el resto de señales. Con ellos se busca reducir el ruido de nuestro sistema, añadiendo las mínimas pérdidas posibles. En concreto en aplicaciones que manejan alta potencia y exigen bajas pérdidas, se requieren filtros de microondas en tecnologías de guías de onda.

Este trabajo fin de grado tiene como objetivo estudiar, diseñar y comparar diversos tipos de filtros paso banda utilizando diferentes técnicas en guía de onda rectangular con el fin de obtener un dispositivo que presente un gran ancho de banda de rechazo y permita manejo de alta potencia.

Se estudiarán diferentes técnicas en guía de onda rectangular:

- Filtro paso bajo compacto en guía de onda rectangular en la banda ku con bajas pérdidas.
- Filtro paso banda libre de espurios de alta potencia en guía de onda.
- Estructuras que incluyen combinaciones de modos resonantes y no resonantes para generar ceros de transmisión

El comienzo del proyecto constará de la base teórica necesaria para poder comprender y realizar los dispositivos en guía de onda rectangular diseñados durante el proyecto. Se comenzará explicando brevemente en que consiste la guía de onda rectangular explicando sus modos,



especialmente el fundamental que será clave durante todo el proyecto. Gran parte del material teórico lo sacaremos de **[POZ 05]**.

Continuaremos hablando sobre el funcionamiento de los singlets que serán también imprescindibles en el proyecto. A continuación comentaremos detalles sobre la guía estándar WR-75 que será la que emplearemos en este proyecto. Tras esto el apartado teórico concluirá con una pequeña introducción y explicación del funcionamiento de la teoría clásica de los filtros en guía de onda rectangular que nos ofrece **[MAT 80]** y **[CAM 07]**

En el siguiente capítulo ya nos centraremos en explicar y desarrollar los filtros que vamos a elaborar en este proyecto, comenzando por el filtro paso banda selectiva de alta selectividad. Una vez tengamos este filtro el trabajo se centrará en intentar optimizar este filtro mediante el empleo de “singlets” elementos de modos no resonantes en guía de onda. Tras emplear ambos conceptos para conseguir una respuesta óptima lo compararemos con diferentes soluciones para ver si este nuevo diseño resulta mejor.

2 Fundamentos teóricos

Las guías de onda son líneas de transmisión formadas por un único conductor. Dentro de ellas se produce la propagación de las ondas electromagnéticas. Son muy útiles para aplicaciones de alta frecuencia donde se busca transportar señales de alta potencia con bajas pérdidas.

2.1 Guía de onda rectangular

A través de la guía rectangular se propagan los modos TE y TM los cuales se caracterizan por tener una frecuencia de corte por debajo de la cual no hay propagación. El modo fundamental de propagación es el utilizado habitualmente para transportar la energía electromagnética a través de la guía de onda rectangular. Se corresponde con el modo TE_{10} que tiene la frecuencia de corte más baja.

La geometría de una guía rectangular se puede ver en la Figura 1. Esta rellena de material con permeabilidad μ y permitividad ϵ . El lado más largo se denomina a y suele estar a lo largo del eje x . El más corto b , se coloca a lo largo del eje y . Así, $a > b$.

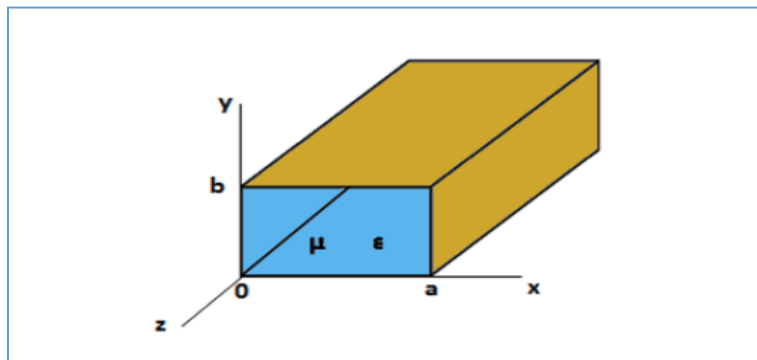


Figura 1. Geometría de una guía de onda rectangular.

La frecuencia de corte de la guía para los distintos modos viene determinada por la siguiente ecuación:

$$f_{c_{m,n}} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.1)$$

Dónde: $m, n \geq 0$ y $m = n = 0$ para $TE_{m,n}$

$m, n \geq 1$ para $TM_{m,n}$

La longitud de onda de la guía para los distintos modos que se propagan viene definida por:

$$\lambda_{g_{m,n}} = \frac{\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{1 - (f_{c_{m,n}}/f)^2}} \quad (1.2)$$

2.2 Modos de propagación

La resolución de las ecuaciones de Maxwell en la guía da lugar a distintas soluciones que se pueden clasificar en función de las componentes vectoriales de los campos magnético y eléctrico. Así, tenemos:

- Modos Transversales Electromagnéticos (*TEM*). Estas soluciones no contienen ninguna componente longitudinal, $E_z = H_z = 0$. No se generan en una guía de onda pues aparecen cuando hay dos conductores.
- Modos Transversales Magnéticos (*TM*). No contienen componente longitudinal magnética, $H_z = 0$.
- Modos Transversales Eléctricos (*TE*). No contienen componente longitudinal eléctrica, $E_z = 0$.

En una guía rectangular se pueden propagar varios modos de ondas electromagnéticas. A su vez cada modo tiene una frecuencia de corte asociada de manera que este solo se propagara con una frecuencia de trabajo mayor que la frecuencia de corte. Es decir los modos de propagación serán aquellos cuya frecuencia de corte esté por debajo de la frecuencia de trabajo

En otro caso, si la frecuencia de la señal es menor que la de corte, la energía se atenuará exponencialmente con la distancia, teniendo un valor extremadamente bajo a una distancia muy corta (este caso se denomina onda evanescente).

El modo fundamental en una guía determinada es aquél que tiene la frecuencia de corte más baja. Las dimensiones de la guía se escogen de modo que para una señal dada, sólo el modo principal pueda transmitirse por ella.

Los modos de orden superior son todas aquellas formas en que la energía se propaga por arriba de la frecuencia de corte del modo dominante. Sin embargo no es recomendable operar en frecuencias donde estos tipos de modos se presenten, puesto que no acoplan bien a la carga, ocasionando reflexiones y la aparición de ondas estacionarias.

2.3 Modo TM.

Una guía de onda rectangular se forma adicionando a los dos planos paralelos conductores horizontales otros dos planos paralelos conductores verticales, con el propósito de confinar la energía electromagnética y de servir como soporte a los dos planos paralelos conductores horizontales que son los que ayudan a la propagación. Éste modo se define con la característica de que el campo magnético es transverso, únicamente $H_z = 0$ en la dirección de la propagación; sin embargo si existe componente de campo eléctrico en la dirección de la trasmisión de la señal E_z . Los subíndices m y n en la nomenclatura TM_{mn} designan de manera análoga a los planos conductores paralelos a números enteros, que denotan el número de medias longitudes de onda de intensidad de campo para los modos TM entre las paredes de la guía, siendo m asignado a lo largo del eje x y n en el eje y

En el modo TM_{mn} las líneas de campo magnético forman curvas cerradas, de tal manera que el campo magnético varía en la dirección “ x ” e “ y ”, por esto el modo TM_{m0} , $n = 0$, no puede existir en guías de onda rectangulares, porque esto implicaría que no se tiene variación en el eje “ y ” y por lo tanto el campo magnético no forma curvas cerradas.

2.4 Modo TE.

El modo TE_{mn} implica que la componente de campo eléctrico en la dirección de propagación z es cero; por lo tanto tenemos que $E_z = 0$. Los enteros m y n denotan como el número de medias longitudinales de onda de intensidad de campo entre cada pared de la guía. El desarrollo del modo TE_{mn} para obtener tanto la configuración de sus campos como sus características, se sigue de manera similar a la del modo TM_{mn} y de hecho su velocidad de fase y de grupo son las mismas, así como muchos otros resultados. El modo TE_{mn} , presenta la frecuencia de operación más baja en guías de onda, lo que facilita la alimentación de la guía, debido a que existen modos de frecuencia más bajos esto permite una configuración más sencilla. Para la evaluación de los campos eléctricos y magnéticos en el modo TE_{mn} , con $E_z = 0$, se plantea la ecuación de onda para H_z , a partir de la cual se obtienen las componentes transversales

2.5 Representación de los modos TE y TM

La figura siguiente muestra la atenuación del conductor para diferentes modos de una guía de onda rectangular con $a = 2 \text{ cm}$. En función de la frecuencia de corte existirán unos u otros modos propagándose. Sin embargo, el modo fundamental de una guía rectangular siempre será el TE_{10} puesto que $a > b$.

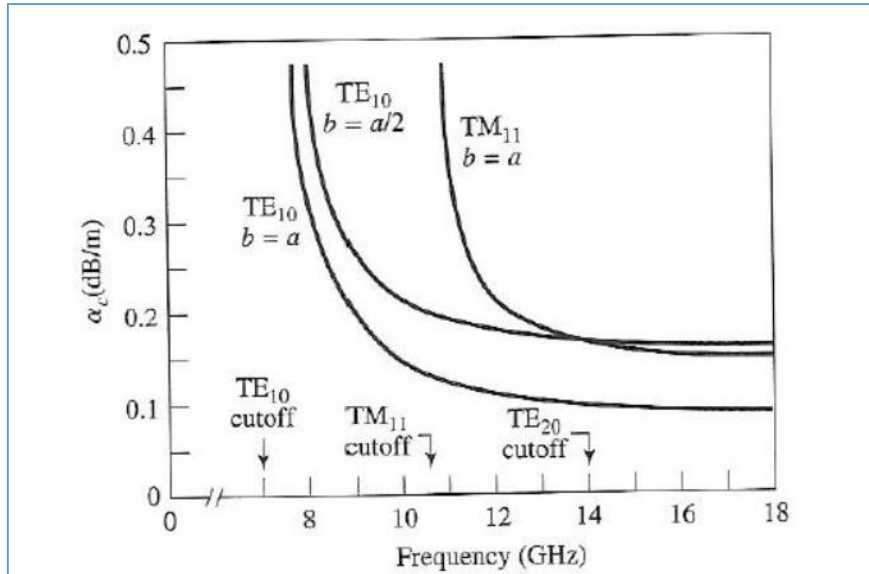


Figura 2. Atenuación de los modos de una guía rectangular con $a = 2$ cm

2.6 Singlets

Los singlets pueden construirse mediante secciones cerradas de guía de onda. Debido a las pérdidas por radiación de una guía abierta, los singlets en guía se cortocircuitan en ambos extremos ($z = 0$ y $z = d$) formando una cavidad cerrada. En este tramos de guía aparecerán ondas estacionarias que resultan de la superposición de modos viajando en sentidos $+z$ y $-z$. *Su funcionamiento está perfectamente explicado [RO 03] y [BAS 11].*

La energía eléctrica y magnética se almacena en el interior de la cavidad. El acoplamiento del singlet se hace a través de una pequeña apertura o iris.

La condición de resonancia sólo se cumplirá para determinadas frecuencias que vendrán determinadas por las condiciones que debe cumplir el campo electromagnético en los planos de los cortocircuitos (paredes de conductor perfecto).

La condición que hay que cumplir es que en los extremos ($z = 0$ y $z = d$) el campo eléctrico transversal sea cero ($E_x = E_y = 0$). Esto ocurrirá cuando la longitud del tramo de guía d es un múltiplo entero de $\lambda/2$. La frecuencia de resonancia vendrá dada por:

$$f_{r_{mnl}} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{l^2}{d^2}} \quad (1.3)$$

donde: $l=1,2, 3...$
 $TE: m, n = 0, 1, 2...; m = n \neq 0;$
 $TM: m, n = 1, 2...;$

Donde se cumple que $b < a < d$, entonces el modo resonante fundamental de la cavidad será el TE_{101} .

2.7 Guía estándar WR-75

En este proyecto la guía que se utilizara preferentemente en las simulaciones es una guía de onda rectangular rellena de aire cuyo estándar es el *WR-75* de dimensiones $a = 19.05 \text{ mm}$ y $b = 9.525 \text{ mm}$. La frecuencia de corte del modo TE_{10} , que posee esta guía es:

$$f_{c_{10}} = \frac{1}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = \frac{c}{2 \cdot a} = 7.869 \text{ GHz.} \quad (1.4)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y su valor es de 299792458 m/s .

Para esta guía estándar, las frecuencias de corte de cada modo se resumen en la Figura 3 que tenemos a continuación:

Modo	f_c (GHz)	Modo	f_c (GHz)	Modo	f_c (GHz)
TE ₁₀	7.869	TE ₃₀	23.606	TE ₄₁	35.189
TE ₂₀	15.737	TE ₃₁	28.371	TE ₂₂	35.189
TE ₀₁	15.737	TM ₃₁	28.371	TM ₄₁	35.189
TE ₁₁	17.595	TE ₄₀	31.474	TM ₂₂	35.189
TM ₁₁	17.595	TE ₀₂	31.474	TE ₅₀	39.343
TE ₂₁	22.256	TE ₁₂	32.443	TE ₃₂	39.343
TM ₂₁	22.256	TM ₁₂	32.443	TM ₃₂	39.343

Figura 3. Diferentes frecuencias de corte para los diferentes modos.

Esta guía de onda está pensada para trabajar en monomodo en la banda *KU*, en el rango de frecuencias 10 - 15 GHz.

2.8 Diseño de filtros clásicos.

Un filtro es un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI) diseñado para alterar el contenido espectral (las componentes frecuencia les modulo y fase) de la señal de entrada.

Un filtro ideal será aquel que proporcione pérdidas de inserción nulas y respuesta en fase lineal en la banda de paso, y una atenuación infinita en las bandas rechazadas. Estas características no pueden ser obtenidas en la práctica por lo que el objetivo a la hora de diseñar un filtro será aproximarse a los requisitos ideales con una cierta tolerancia.

2.8.1 Implementación de LPF con saltos de guía

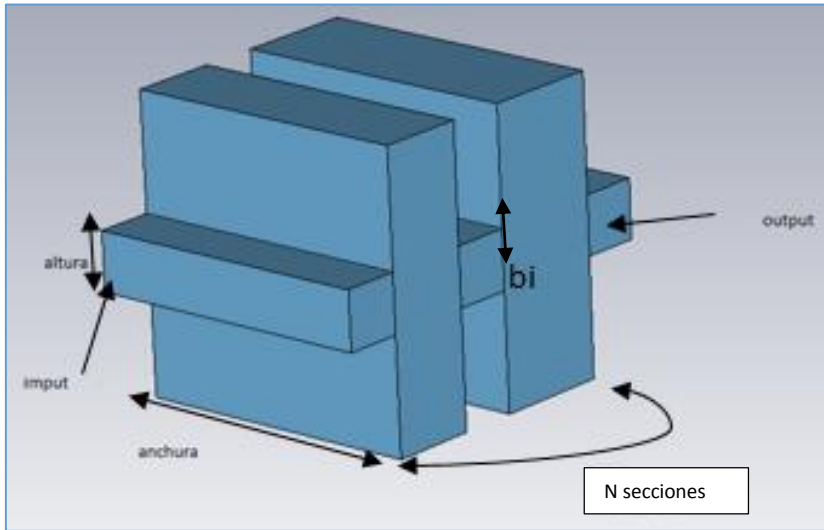


Figura 4. Esquema de un filtro

La guía de onda también se puede modelar con una línea de transmisión caracterizada por una impedancia característica y una constante de propagación. En base a que la altura de las secciones varía definimos una impedancia característica ya que esta no está unívocamente determinada.

$$P = \frac{1}{2} \frac{V^2}{Z_0} \rightarrow Z_0 = \frac{1}{2} \frac{V^2}{P} = \frac{60\pi^2}{\sqrt{a^2 - \frac{c \cdot a}{2f}}} \cdot b \quad (1.5a)$$

Donde:

$$P = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \int_0^b \int_0^a \vec{E} \times \vec{H}^* \cdot d\vec{S} \right\} \quad (1.5b)$$

$$V = \int_0^b E_y \left(x = \frac{a}{2} \right) dy \quad (1.6)$$

Modo TE₁₀.

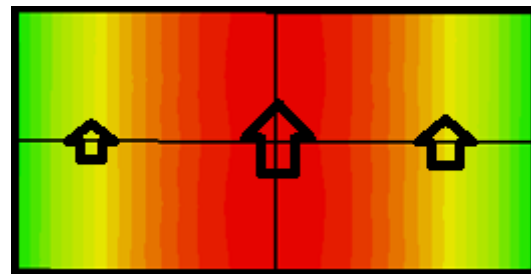
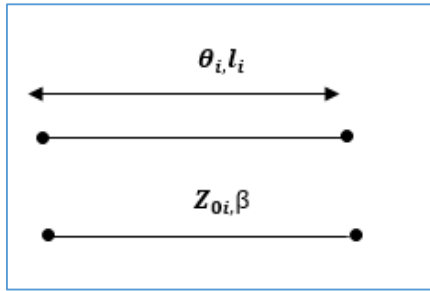


Figura 5. Modo TE₁₀

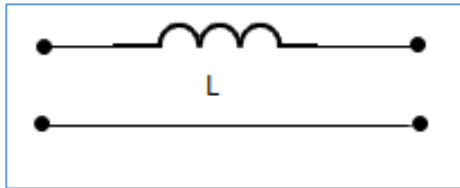
El siguiente paso sería sacar la matriz equivalente de cada elemento rectangular en función de sus características:



Línea de transmisión:

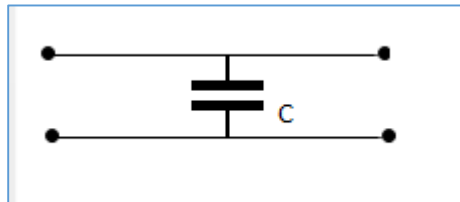
$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & j \cdot Z_0 \cdot \sin(\beta l) \\ j \cdot Y_0 \cdot \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

donde $\rightarrow b = \frac{2\pi}{\lambda_g}$



Bobina serie:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \cdot 2\pi \cdot f \cdot L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$



Condensador paralelo:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j \cdot 2\pi \cdot f \cdot C & 1 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Como podemos apreciar en la siguiente imagen los tramos con una altura superior se implementan con bobinas y los tramos de guías más pequeños se implementan con condensadores.

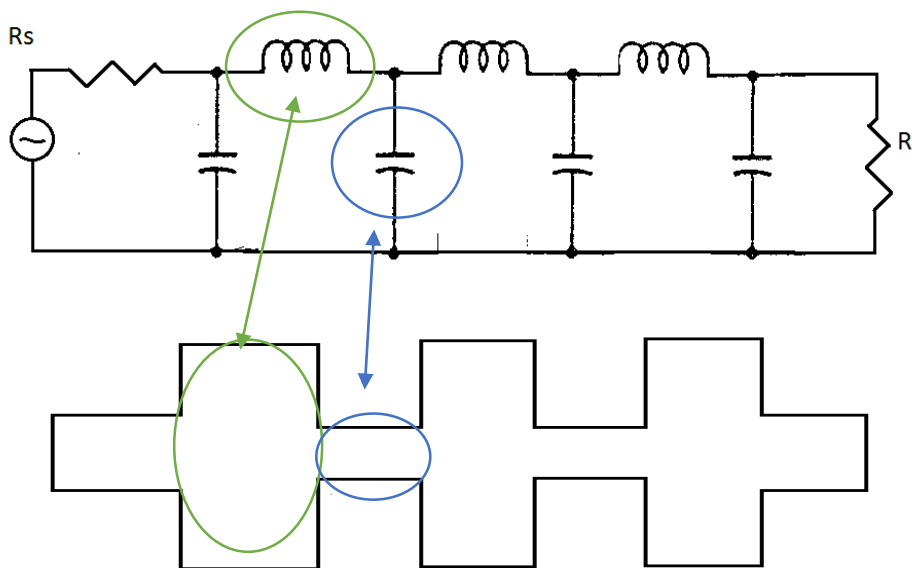
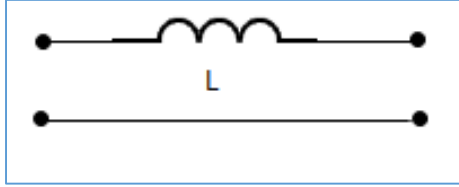
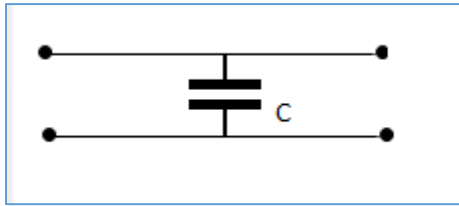


Figura 6. Equivalente Filtro elemento Concentrados , filtro de guía rectangular

Si para el cálculo de los L y C del filtro con elementos concentrados hemos utilizado R_s en el proceso de desnormalización, las alturas de las guías de las secciones de guía de onda se eligen altas (limite por multimodo) y bajas (limite por potencia) respecto a la del *puerto bs*.



$$\frac{l_{high}}{\lambda_{gp}} = \frac{L \cdot f_p}{Z_{high}} \rightarrow l_{high} = \frac{L \cdot f_p}{b_{high}} \cdot \lambda_{gp} \quad (1.10)$$



$$\frac{l_{low}}{\lambda_{gp}} = C \cdot f_p \cdot Z_{low} \rightarrow l_{low} = C \cdot f_p \cdot b_{low} \cdot \lambda_{gp} \quad (1.11)$$

2.8.2 Implementación de LPF mediante commensurate-lines en guía rectangular

Tenemos múltiples tramos de guías de onda rectangulares, UE (unit element):

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & j \cdot Z_0 \cdot \sin(\beta l) \\ j \cdot Y_0 \cdot \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & j \cdot Z_0 \cdot \sin(\theta) \\ j \cdot Y_0 \cdot \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Si concatenamos N UE la matriz de transición total es el producto de la matriz de transición de todos los UE :

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & j \cdot Z_1 \cdot \sin(\theta) \\ j \cdot Y_{01} \cdot \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & j \cdot Z_2 \cdot \sin(\theta) \\ j \cdot Y_{02} \cdot \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \cos(\theta) & j \cdot Z_r \cdot \sin(\theta) \\ j \cdot Y_{0r} \cdot \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

De la cual tras operar se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$[S_{21}(\sin \theta)]^2 = \frac{1}{a_n(\sin \theta)^n + a_{n-1}(\sin \theta)^{n-1} + \dots + a_1 \sin(\theta) + a_0} \quad (1.14)$$

Donde $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0 = fun(Z_1, Z_2, \dots, Z_r)$

2.8.3 Filtro paso banda clásicos

2.8.3.1 Conceptos básicos para el diseño de filtros de plano-H.

La mayoría de los filtros de microondas (paso bajo, paso alto, paso banda o rechazo banda) poseen unas características que derivan de las de un prototipo de filtro paso bajo al que se le aplican una serie de transformaciones para convertirlo en el filtro deseado. Los filtros prototipo más utilizados son el filtro máximamente plano o *Butterworth* y el filtro *Chebyscheff*. En muchas aplicaciones se utiliza la respuesta *Chebyscheff* como prototipo debido a que ofrece un mejor rendimiento en términos de rechazo. En este capítulo se ha trabajado específicamente con este para el diseño de filtros de iris inductivo

2.8.3.2 Caracterización del filtro *Chebyscheff*.

La función de atenuación de un filtro *Chebyscheff*, y cuya respuesta se observa en la figura se puede describir matemáticamente como:

$$\begin{cases} L_{A_{dB}}(\omega') = 10 \log_{10} \left(1 + \varepsilon \cdot \cos^2 \left(n \cdot \arccos \left(\frac{\omega'}{\omega'_1} \right) \right) \right), & \omega' \leq \omega'_1 \\ L_{A_{dB}}(\omega') = 10 \log_{10} \left(1 + \varepsilon \cdot \cosh^2 \left(n \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{\omega'}{\omega'_1} \right) \right) \right), & \omega' \geq \omega'_1 \end{cases} \quad (1.15)$$

Donde ω'_1 denota la frecuencia de corte de un filtro paso bajo, ω'_1 es la frecuencia normalizada respecto a la frecuencia angular ω'_1 , n es el grado del filtro y ε es un coeficiente relacionado con la tolerancia de atenuación en la banda de paso (ver figura 7) o también llamado rizado de las pérdidas de inserción, L_{Ar} .

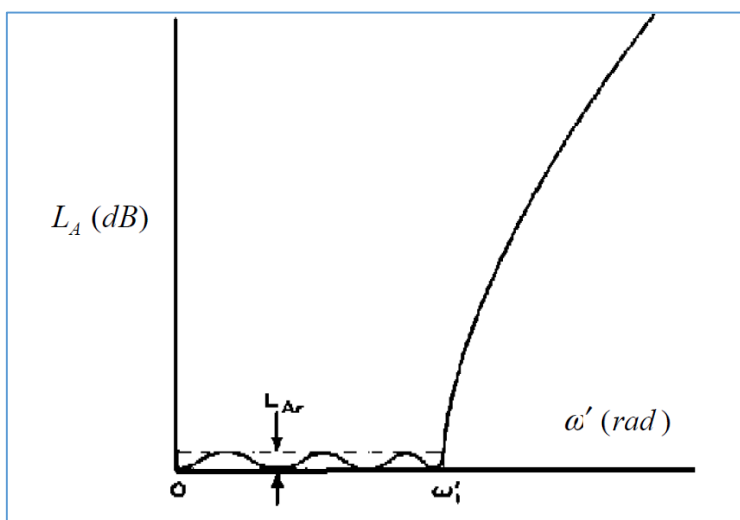


Figura 7. Respuesta filtro *Chebyscheff*

El parámetro ϵ viene dado por:

$$\epsilon = 10^{\frac{L_{Ar}(dB)}{10}} - 1 \quad (1.16)$$

Normalmente los requerimientos del filtro se dan en función de las pérdidas de retorno, RL , por lo que es necesario relacionar el parámetro L_{Ar} con estas:

$$L_{Ar}(dB) = -10 \cdot \log_{10} \left(1 - \frac{1}{\frac{RL}{10^{10}}} \right) \quad (1.17)$$

2.8.3.3 Definición de los parámetros de circuito para el filtro pasó bajo Chebysheff.

Mediante este circuito podemos representar la función de Chebysheff:

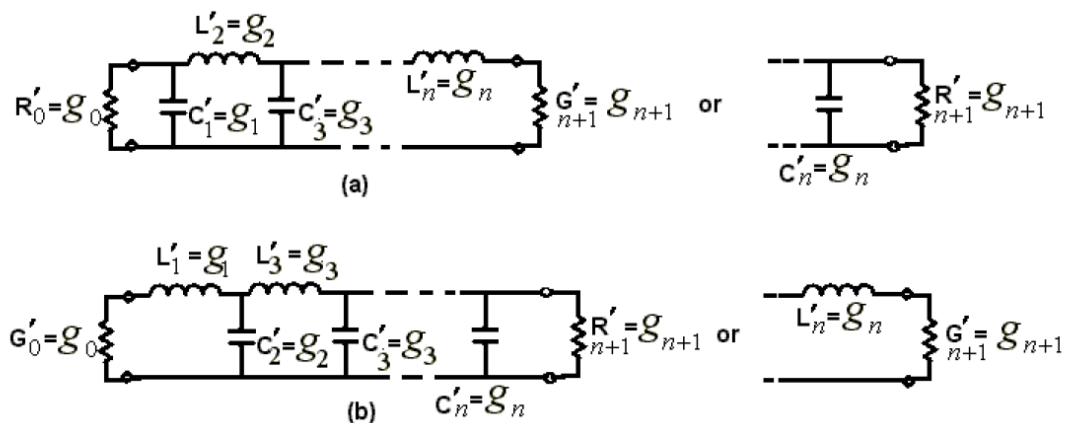


Figura 8. Definición de los parámetros del prototipo de filtro paso bajo: g_i .

La función se puede representar de dos formas equivalentes como podemos apreciar en la Figura 8 donde podemos ver que la red es recíproca por lo tanto los elementos quedarían definidos como:

$$g_0 = \begin{cases} \text{Resistencia interna del generador} & R'_0 \quad \text{si} \quad g_1 = C'_1 \\ 0 & \\ \text{Conductancia interna del generador} & G'_0 \quad \text{si} \quad g_1 = L'_1 \end{cases}$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} \text{Resistencia de carga } R'_{n+1} & \text{si } g_n = C'_n \\ 0 & \\ \text{Conductancia de carga } G'_{n+1} & \text{si } g_n = L'_n \end{cases}$$

$$g_{j|_{j=1 \text{ a } n}} = \begin{cases} \text{Inductancia para los elementos en serie} \\ 0 \\ \text{Capacidad para los elementos en paralelo} \end{cases}$$

Los elementos se suponen todos normalizados para $g_0 = 1$ y $w'_1 = 1$, pero con unas simples transformaciones podríamos tener otros valores de impedancia.

En la mayoría de libros, por ejemplo **[MAT 80]**, existen tablas donde ya están calculados estos parámetros para unos determinados valores de LA y n , con $g_0 = 1$ y $w'_1 = 1$

En la siguiente tabla tenemos los diferentes valores de g para la implementación de un filtro Chebysheff ($w_p = w_c = 1 \text{ rads/s}$, $Rg = 1\Omega$) y con un rizado de 0.5dB ($kp = 0.5 \text{ dB}$).

n	g1	g2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	0.6986							
2	1.4029	0.7071	1.9481					
3	1.5963	1.0967	1.5963	1.0000				
4	1.6703	1.1926	2.3661	0.8419	1.9481			
5	1.7058	1.2296	2.5408	1.2296	1.7058	1.0000		
6	1.7254	1.2479	2.6064	1.3137	2.4758	0.8696	1.9481	
7	1.7372	1.2583	2.6381	1.3444	2.6381	1.2583	1.7372	1.0000

Para calcular los valores desnormalizados, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$R = \left(\frac{R_0}{R_0'} \right) R' \quad \text{or} \quad G = \left(\frac{G_0}{G_0'} \right) G' \quad (1.18)$$

$$L = \left(\frac{R_0}{R_0'} \right) \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right) L' = \left(\frac{G_0'}{G_0} \right) \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right) L' \quad (1.19)$$

$$C = \left(\frac{R_0'}{R_0} \right) \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right) C' = \left(\frac{G_0}{G_0'} \right) \left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right) C' \quad (1.20)$$

2.8.3.4 Transformaciones frecuenciales.

Con el objetivo de utilizar el filtro paso bajo Chebysheff descrito anteriormente para el análisis de los filtros paso banda, se realiza una serie de transformaciones frecuenciales que mantienen toda la información del paso bajo pero en términos de filtro paso banda.

Las transformaciones frecuenciales necesarias de filtro paso bajo a filtro paso banda vienen definidas por **[MAT 80]**:

$$\frac{\omega'}{\omega'_1} = \frac{1}{BW(\%)} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (1.21)$$

donde $BW(\%)$ es el ancho de banda fraccional:

$$BW(\%) = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \quad (1.22)$$

Y ω_0 la frecuencia central de la banda de paso, siendo ω_1 y ω_2 las frecuencias angulares superior e inferior, respectivamente, de la banda de paso:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_2 \cdot \omega_1} \quad (1.23)$$

Las frecuencias ω'_0 y ω'_1 hacen referencia al filtro paso bajo, mientras que las frecuencias ω , ω_0 , ω_1 y ω_2 hacen referencia al filtro paso banda. Es necesario trasladar estas transformaciones frecuenciales a guía onda ya que es la tecnología utilizada en este proyecto. En términos de guía onda, las ecuaciones de (1.21) a (1.22) quedan como:

$$\frac{\omega'}{\omega'_1} = \frac{2}{w_\lambda} \left(\frac{\lambda_{g_0} - \lambda_g}{\lambda_{g_0}} \right) \quad (1.23)$$

Donde:

$$w_\lambda = \left(\frac{\lambda_{g_1} - \lambda_{g_2}}{\lambda_{g_0}} \right) \approx \left(\frac{\lambda_{g_0}}{\lambda_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \right) \quad (1.24)$$

$$\lambda_{g_0} = \frac{\lambda_{g_1} + \lambda_{g_2}}{2} \quad (1.25)$$



$\lambda_{g0}, \lambda_{g1}, \lambda_{g2}, y \lambda_g$ Son las longitudes de onda de la guía a las frecuencias w_0, w_1, w_2 y w respectivamente. Mientras que λ_0 es la longitud de onda de una onda plana a la frecuencia w_0 en el medio de la guía y w_λ es el ancho de banda fraccional de la guía.

3 Filtros de guía de onda de alta selectividad

En el siguiente apartado explicaremos el diseño de filtros con respuesta paso banda de alta selectividad. Para ello se va a partir de una técnica de diseño de filtros en guía de onda rectangular que me ha propuesto el grupo de investigación en el que realizo el trabajo. Para optimizar estos filtros emplearemos “Singlets”. Para realizar este trabajo hemos utilizado simuladores electromagnéticos comerciales como FEST3D y CST Microwave Studio.

3.1 Filtro paso bajo

En el siguiente apartado vamos a proponer una alternativa a los filtros clásicos perfectamente explicada en **[ARR 15]**. Esta nueva forma permite obtener filtros de guía de onda rectangular más compactos con una gran reducción de las pérdidas de inserción.

Una de las principales características de las guías de onda rectangular son las bajas pérdidas de retorno. El filtro que se explica a continuación fue introducido perfectamente en: **[COH 48]**.

Este diseño se guía de onda rectangular se compondrá de múltiples elementos de rechazo banda (stubs) y entre ellos intercalados pequeños tramos de guía de onda más pequeños. El filtro que se explica a continuación presenta mejores pérdidas de inserción y es más compacto que el clásico corrugado.

3.1.1 Método de diseño

El filtro de paso bajo de guía de onda se compone por dos partes: el bloque del filtro y las redes de adaptación de entrada y salida. El filtro se compone de varios elementos en forma de escalón separados por secciones de guía de onda muy cortas distribuidas a lo largo del eje z de propagación.

3.1.1.1 Bloque del filtro

Para diseñar el bloque del filtro (Figura 9) se comienza buscando las alturas de los elementos más altos (h_{max}) y los más cortos (h_{min}) para conseguir la banda de rechazo desde la (f_{min}) hasta la (f_{max}).

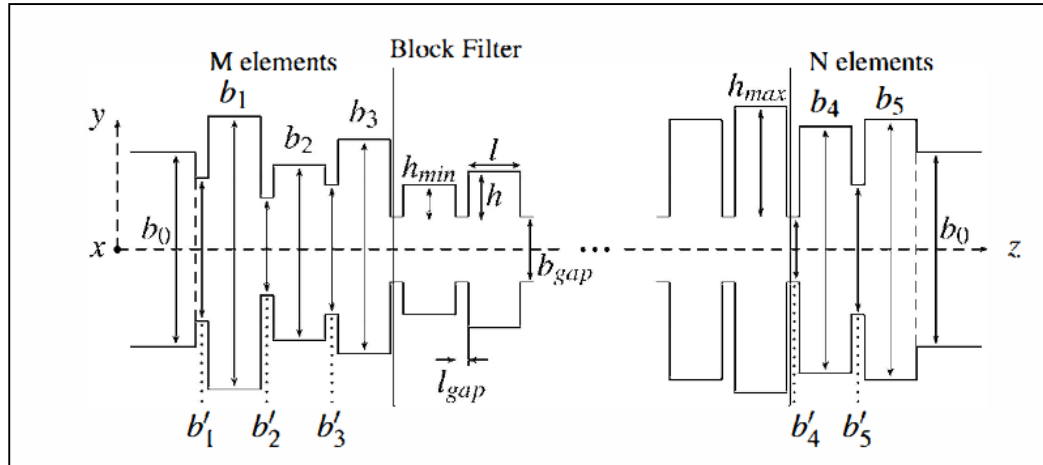


Figura 9. Esquema del filtro propuesto.

La altura de cada elemento de rechazo (stub) rondara $\lambda_g/4$, siendo λ_g la longitud de onda donde el modo fundamental TE_{10} es rechazado a esa frecuencia. De esta manera calculando las diferentes λ_g con las formulas comentadas en el apartado anterior rechazaremos diferentes frecuencias.

Para la elaboración del filtro colocaremos varios elementos rechazo banda con diferentes alturas entre nuestra (h_{max}) y (h_{min}) para rechazar frecuencias intermedias entre (f_{min}) y (f_{max}).

Una gran ventaja de este método es que si introducimos varios elementos de rechazo banda con (h_{max}) es fácil conseguir una pendiente vertical entre la banda de paso y la banda de rechazo utilizando un número de elementos muy reducido. Es decir conseguimos reducir el tamaño de nuestro filtro en comparación con la teoría clásica que necesitaría un número elevado de elementos.

A continuación para la elaboración del filtro se pasa a elegir la distancia de guía de onda entre los diferentes elementos rechazo banda, l_{gap} , y la longitud de los elementos rechazo banda que será la misma para todos los elementos.

A diferencia de la teoría clásica que se ha presentado en el apartado 2.8, en estos filtros solo la altura de los stubs h , es una variable crítica. En concreto la l_{gap} no influye en la respuesta en frecuencia del filtro y puede ser reducida hasta tamaños que sea posible fabricar. Esto nos permite poder elaborar estructuras más compactas. En cambio la longitud de los elementos que rechazan la banda debe ser amplia para su elaboración pero a su vez pequeña para conseguir una estructura compacta, el objetivo sería conseguir un elemento lo más compacto posible pero pudiéndolo fabricar perfectamente.

Por último el b_{gap} es un parámetro libre en nuestros diseños, con lo que lo diseñaríamos pequeño para conseguir una estructura más compacta pero se diseña con el tamaño necesario para conseguir unas pérdidas de inserción pequeñas y si fuera necesaria conseguir una buena capacidad de manejo de potencia.

En resumen, el objetivo del bloque del filtro es suprimir el modo fundamental TE_{10} en la banda de rechazo.

3.1.1.2 Red de adaptación

Empleando la técnica que hemos explicado en los párrafos anteriores es fácil diseñar filtros con la intención de rechazar la banda deseada. Pero además tenemos que añadir dos adaptaciones, una a la entrada y otra a la salida del bloque. Con el objetivo de colocar dos guías estándar en los puertos con altura b_0 y con la intención de controlar las pérdidas de retorno en la banda de paso.

Finalmente el filtro consistirá en el bloque del filtro que diseñamos en el apartado anterior y dos adaptaciones formadas por un número M y N stubs en la entrada y en la salida del filtro respectivamente. Con forme más stubs coloquemos en la salida o en la entrada más fácil será la adaptación de nuestro filtro y se conseguirán las pérdidas de retorno deseadas de un manera más inmediata, pero tendremos una estructura más grande. Por lo que el resultado óptimo sería conseguir los objetivos de la adaptación con el menor número de stubs posibles sin tener que llegar a tamaños complicados para su fabricación.

En este caso cada stub en la adaptación tendrá su altura b_i y su longitud. Además todos ellos estarán separados por pequeñas secciones todas ellas también con su altura b'_i y su longitud.

La estimación inicial de b_i es una interpolación lineal entre los elementos más largos y más cortos del bloque del filtro y la altura del puerto estándar b_0 . Para el caso de b'_i este se estimara a partir de la interpolación lineal entre el mínimo gap del plano-E b_{gap} y el puerto estándar b_0 .

Posteriormente tras la optimización, que en este trabajo se realizaran con los simuladores electromagnéticos comerciales, en este caso se emplea FEST3D. Se buscara conseguir los valores de pérdidas de retorno variando estos valores iniciales de b'_i y b_i , llegando a sus valores finales.

3.2 Filtro paso banda

El siguiente filtro que se explica a continuación se elabora a partir del filtro paso bajo comentado en el apartado anterior añadiéndole la estructura paso alto.

Básicamente se integra la estructura paso alto dentro de la paso bajo que ya se tiene. Comparando con el filtro clásico inductivo las características de este filtro presenta una banda de rechazo mucho más amplia.

Los filtros de guía de onda inductivo clásicos son utilizados en diversas aplicaciones. Donde una banda de paso es necesaria y una necesidad de funcionamiento a altas potencias.

Un ejemplo de filtro paso banda mediante la combinación de una estructura paso bajo y otra estructura paso alto esta propuesto en **[HAU 88]**.

En el siguiente capítulo e elaborara un filtro paso banda de alta potencia mediante la combinación de una estructura de paso alto y la estructura paso bajo explicada anteriormente. Con ello se pretende conseguir una buena banda de paso, que funcione a altas potencias una buena banda de rechazo que con los la teoría clásica no se puede conseguir

3.2.1 Método de diseño

El filtro paso banda se realiza al combinar lo explicado anteriormente en el filtro paso bajo es decir una estructura paso bajo y una estructura paso alto que se explica a continuación.

3.2.1.1 Estructura Paso Alto.

La estructura paso alto es la encargada de conseguir la pendiente entre la banda de paso y el rechazo de las frecuencias bajas entre f_1 y $f_{max,L}$ como podemos apreciar en la Figura 10. En una guía de onda rectangular la respuesta paso alto en frecuencia se obtiene reduciendo la anchura como podemos ver en la Figura 11. La a_{min} determina la frecuencia de corte, dicha frecuencia permite la propagación de ondas por encima de ella y rechazar aquellos que estén por debajo de ella.

Esta nueva anchura a_{min} en nuestros diseños se introducirá en el bloque del filtro quedando dos anchuras diferenciadas a_{min} y a_0 , esta primera sería la anchura del bloque y esta ultima la anchura de las adaptaciones.

La diferencia entre a_{min} y a_0 determina la pendiente de la respuesta en frecuencia y también las pérdidas de retorno para las frecuencias posteriores a la frecuencia de corte.

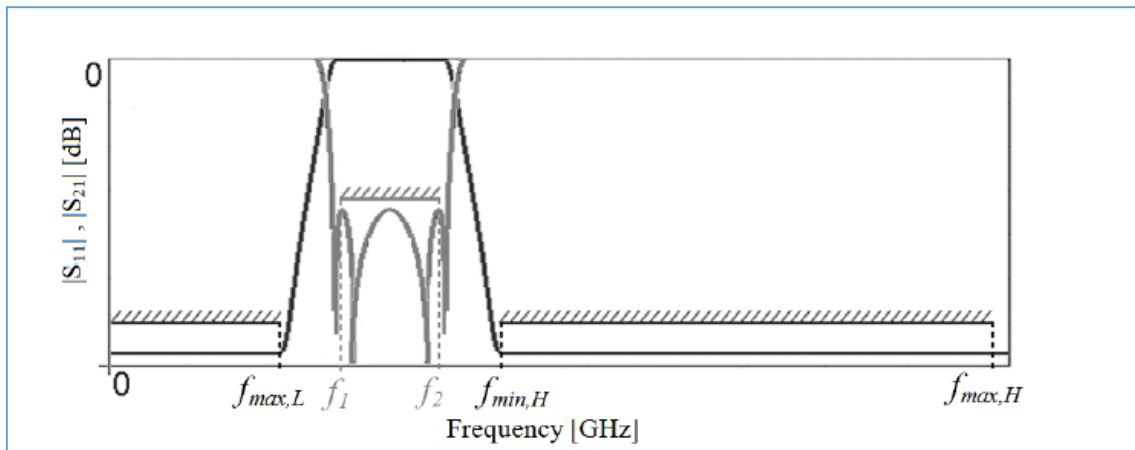


Figura 10. Respuesta filtro paso banda



Figura 11. Estructura del filtro

3.2.1.2 Estructura paso bajo

La elaboración de la estructura paso bajo esta explicado en el apartado anterior Filtro Paso Bajo , y en este caso determinara la frecuencia de la banda de paso f_2 y el rechazo entre f_{minH} y $f_{max,H}$ como podemos apreciar en la Figura 10.

3.2.1.3 Combinación

Para conseguir el objetivo, que es un filtro paso banda el siguiente paso es combinar ambas técnicas, el filtro paso alto y el filtro paso bajo .Para ello lo que hacemos es introducir dos a diferentes a lo largo de nuestro filtro con el fin de obtener la pendiente entre la banda de rechazo inferior y la banda de paso entre f_1 y $f_{max,L}$ dentro de una estructura paso bajo, es decir manteniendo las variaciones de las alturas del filtro paso bajo. Con esta combinación obtenemos el filtro paso banda, es decir con dos estructuras una paso alto y una paso bajo perfectamente integradas obtenemos un filtro paso banda compacto como se aprecia en la figura 12.

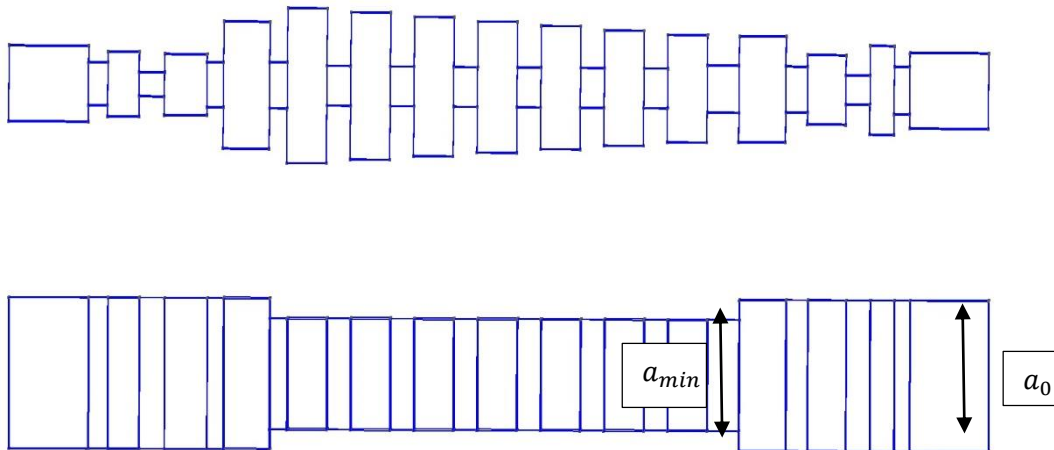


Figura 12. Esquema del modelo paso banda

3.3 Diseño del filtro

3.3.1 Introducción

A continuación después de explicar la teoría, se elabora un diseño de un filtro en el que se pone en práctica lo explicado en los apartados anteriores.

3.3.2 Diseño del filtro paso banda

Se comenzara con el diseño de un filtro paso banda con las características que se enumeraran a continuación, será un filtro en la banda ku .La banda Ku es una porción del espectro electromagnético en el rango de las microondas que va de los 12 a los 18 GHz. La banda Ku se

usa principalmente en las comunicaciones satelitales, siendo la televisión uno de sus principales usos.

3.3.3 Características del filtro

Se propone diseñar un filtro de las siguientes características:

- Banda de paso: 11,5-12,5GHz.
- Banda de rechazo: 15-20 GHz.
- Perdidas de retorno: 20dB.
- Nivel en la banda de rechazo ≥ 60 dB.
- Puerto estándar: WR -75. ($a=19.05$ mm $b=9.525$ mm).

3.3.4 Diseño del filtro paso banda de guía de onda rectangular

Se diseña un filtro paso banda empleando las técnicas descritas anteriormente el cual tenemos dos anchuras diferentes a_0 (19,05mm) que equivale a la anchura estándar de los puertos, esta anchura la tendremos en las adaptaciones como podemos ver en la Figura 13 y a_{min} (14mm) que será la anchura del bloque del filtro. Para calcular esta segunda altura se empleará la fórmula (1.26) Con estas dos alturas como ya hemos explicado en el apartado anterior conseguiremos la parte del filtro paso alto.

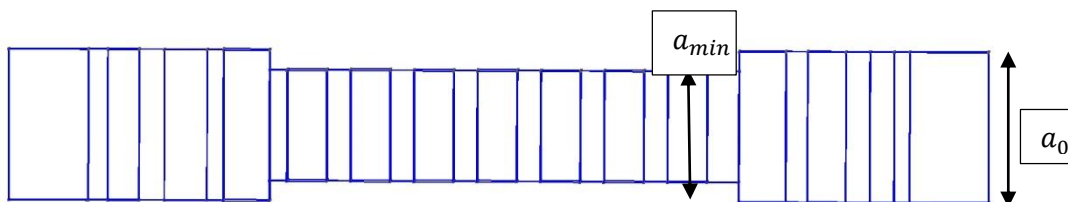


Figura 13. Esquema filtro paso banda de alta selectividad

Para el caso de las alturas del bloque del filtro las calcularemos con la formula mostrada en el apartado teórico, con la cual calcularemos la λ_g de cada elemento para la cual se rechaza en las frecuencias que deseamos la señal. Partiendo que nuestra b_{gap} (5mm) nuestra $h_{max} = 19.5mm$ y nuestra $h_{min} = 13.5mm$. En la siguiente tabla mostramos las diferentes alturas que tenemos en nuestra estructura:

b	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
Altura optimizada(mm)	19.5	18.5	17.5	16.5	15.5	14.5	13.5

Para el caso de los tramos de guías entre los diferentes elementos de rechazo tendremos una anchura de $h = 5mm$.

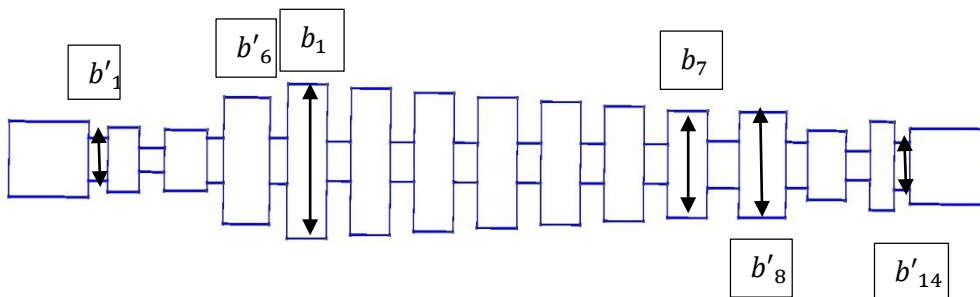


Figura 14. Esquema de nuestro filtro paso banda selectivo

Para el caso de la adaptación las alturas se calcula optimizando con el FEST3D para obtener los valores deseados .En la siguiente tabla mostramos los valores de los diferentes tramos:

b	b'_1	b'_2	b'_3	b'_4	b'_5	b'_6	b'_7	b'_8	b'_9
inicial	5	10	5	10	5	10	5	5	10
optimizada	5.43	8.18	3.02	7.6	5.66	16.00	5.79	5.91	13.30

b'_{10}	b'_{11}	b'_{12}	b'_{13}	b'_{14}
5	10	5	10	5
5.80	8.73	3.67	11.16	5.96

En cuanto a los puertos de entrada y de salida utilizamos una guía estándar $WR - 75$ que tiene una $h = 9.525mm$ y una $a=19.05mm$ que ya se ha comentado anteriormente.

Por último la última variable que se tiene en cuenta es la longitud de los diferentes elementos, para el bloque se tiene dos longitudes diferentes, $L=5mm$ para los elementos de rechazo (los tramos más altos) y otra $L=3mm$ para los tramos de guía con $h=5mm$.

En cuanto a las longitudes en los tramos de adaptación partirá de unos valores iguales que en el bloque 5mm para los tramos altos (los que tienen una altura inicial de 10mm) y 3mm para el resto. Pero para conseguir los valores deseados esta será una variable dentro de la optimización en Fest3D y por lo tanto los valores acaban siendo los mostrados en la siguiente tabla:

l	l'_1	l'_2	l'_3	l'_4	l'_5	b'_6	l'_7	l'_8	l'_9
inicial	3	5	3	5	3	5	3	3	5
optimizada	2.43	3.96	3.18	5.38	2.07	5.87	2.22	4.00	5.90

l'_{10}	l'_{11}	l'_{12}	l'_{13}	l'_{14}
3	5	3	5	3
2.73	4.84	3.04	3.05	1.96

Con los siguientes datos que hemos enumerado el resultado tras simular en FEST3D es el siguiente:

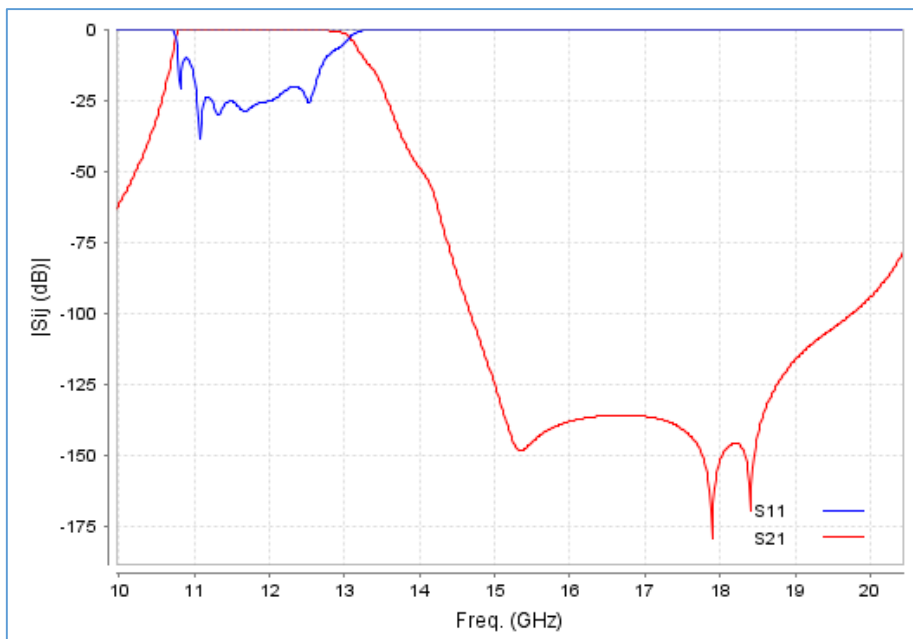


Figura 15. Respuesta del filtro paso banda (FiltroPasoBanda.FEST3D).

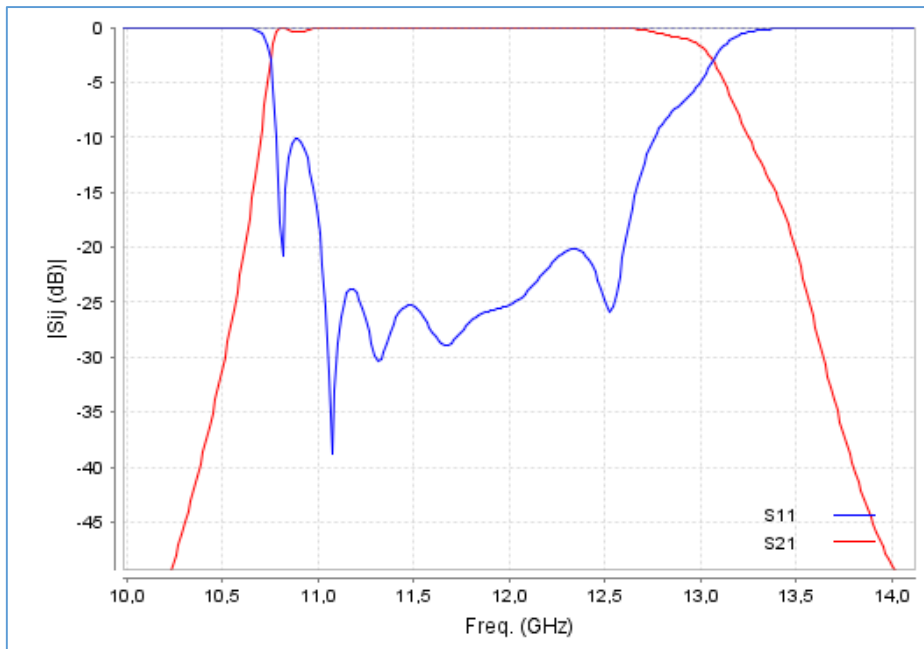


Figura 16. Respuesta del filtro paso banda (FiltroPasoBanda.FEST3D).

Como se puede apreciar cumple los requisitos marcados. Con una banda de paso con el ancho de banda marcado unas pérdidas de retorno mejores que las requeridas y un rechazo banda hasta los 20GHz con un nivel en la banda de rechazo mejor al necesario.

3.4 Diseño de Filtros de guía de onda de alta selectividad

3.4.1 Introducción

Con el objetivo de mejorar las prestaciones del filtro de guía de onda rectangular de alta selectividad se propone añadir unos singlets. Con estos singlets se pretende aumentar la pendiente entre la banda de paso y la de rechazo. En los siguientes apartados se comentara como elaborar el filtro con ambos componentes sus diferentes opciones y se compara la solución con la del filtro del apartado anterior añadiéndole más elementos de rechazo.

3.4.2 Diseño filtro con un singlet

A continuación se va a diseñar una nueva estructura a partir del filtro elaborado anteriormente añadiendo los singlets.

3.4.2.1 Singlet derecha

Primero se diseña el singlet para introducir un cero en la frecuencia deseada, como en este primer ejemplo se pretende introducir un cero de transmisión a la derecha se diseña el siguiente singlet:

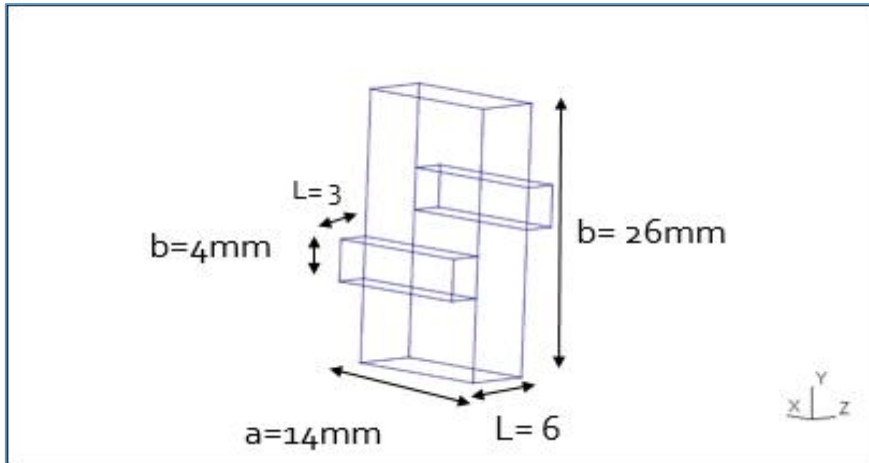


Figura 17. Esquema singlet cero de transmisión a la derecha

Tal y como se propaga el modo TM_{110} que será con el que trabajemos, para dejar nuestro cero de transmisión a la derecha tenemos que colocar la entrada y salida del singlet en contrafase.

Para calcular la frecuencia de resonancia se emplea la fórmula explicada en el apartado teórico anterior de la f_r . (1.3)

Una vez se consigue la f_r deseada y se obtienen los valores de la anchura y altura del elemento central, la cavidad resonante ($a = 14mm$, $b = 26mm$). Una vez se tienen estos valores se juega con la altura y el offset de la entrada y la salida para conseguir acercar el cero de transmisión a la frecuencia de resonancia y obtener una respuesta óptima.

En cuanto a la altura de la entrada y la salida será $b = 4mm$ y será la misma para ambas. El offset será de 3mm respecto al centro para ambas siendo 3mm para abajo en la entrada y 3mm para arriba en la salida.

La anchura como apreciamos en la imagen será de $14mm$, esto quiere decir que colocamos este primer singlet en la zona del bloque del filtro donde teníamos esta anchura. Este singlet se podía colocar en cualquier parte del filtro pero realizando diferentes simulaciones se ha estimado que era el lugar más óptimo para colocarlo, cerca del rechazo. En cambio al estar colocado en este lugar y no en la zona de una anchura mayor el elemento será un poco más alto ya que la frecuencia de resonancia para este modo depende de ambas variables

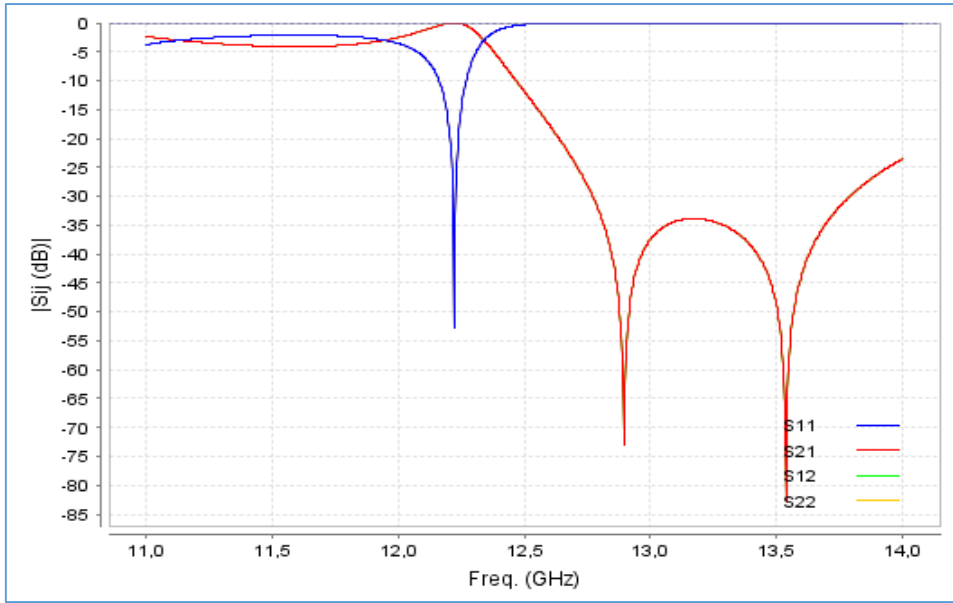


Figura 18. Respuesta singlet cero de transmisión a la derecha (ResonadorMasAnchoDerecha.FEST3D)

Una vez se tiene el singlet, se incorpora al filtro paso bajo diseñado en el apartado anterior. En este caso se coloca en el bloque del filtro como se ha explicado anteriormente. En la Figura 19 se puede apreciar la respuesta del nuevo filtro y en la Figura 20 la estructura.

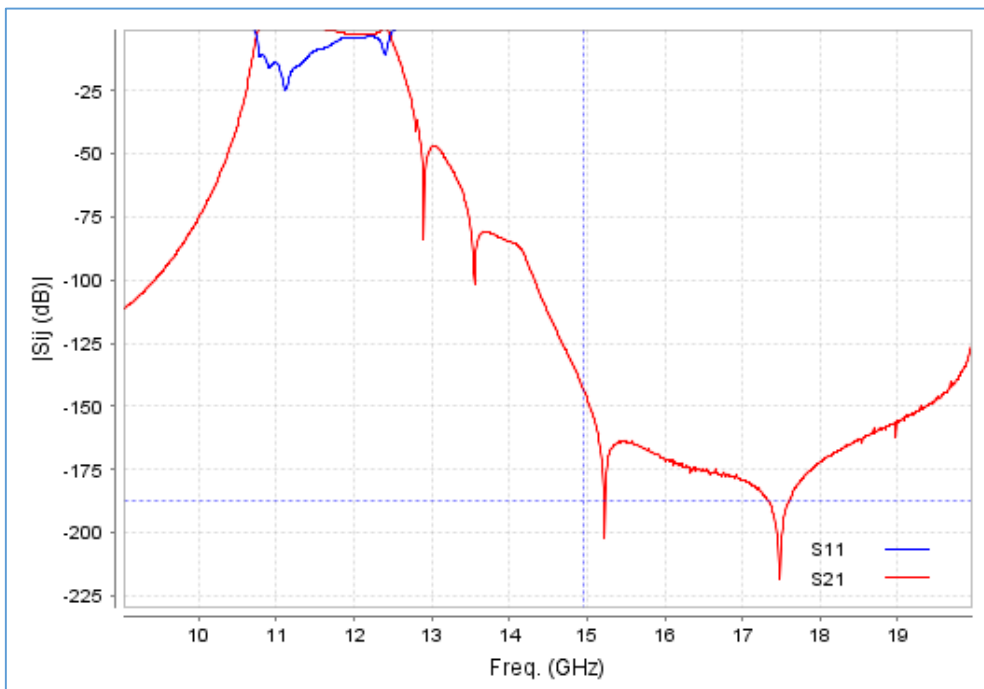


Figura 19. Respuesta filtro con singlet. (ResonadorderechasinOpt.FEST3D)

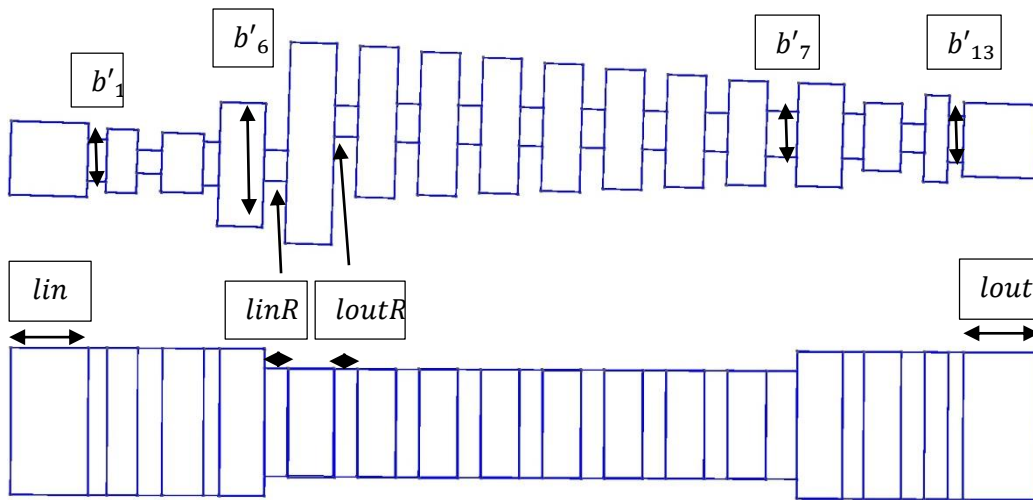


Figura 20. Esquema del filtro paso banda con el singlet sin optimizar.

Como se puede apreciar en la Figura 21, el singlet ejerce la influencia deseada en el filtro añadiéndole el cero de transmisión en el lugar deseado, pero estropeando su banda de paso.

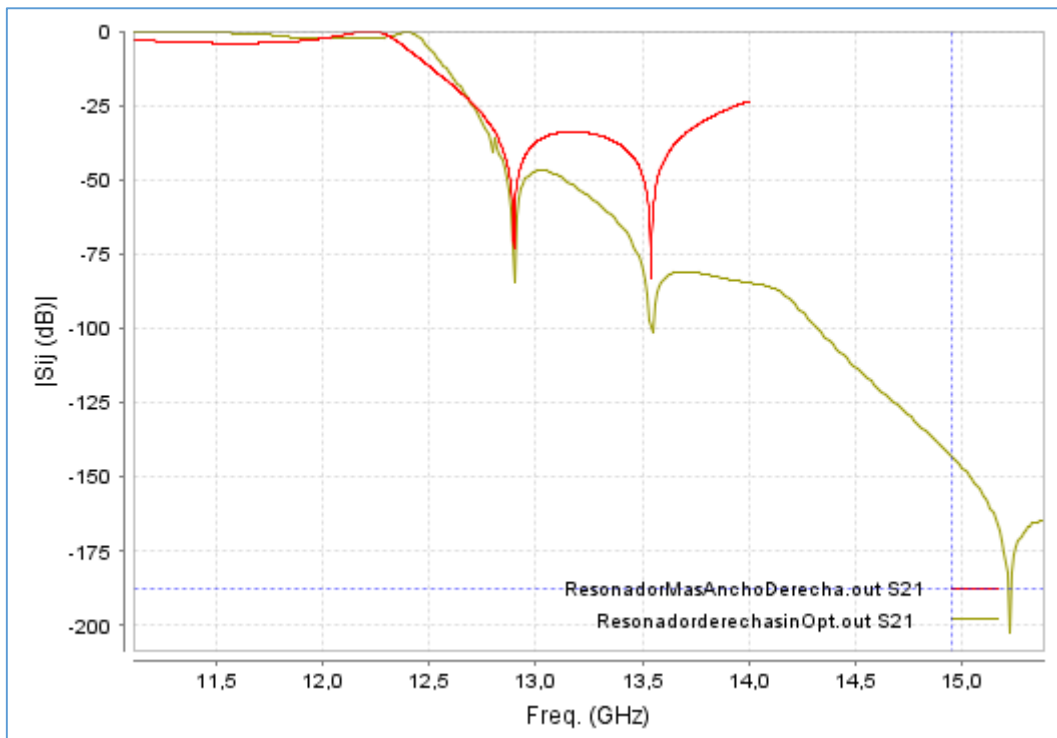


Figura 21. Comparación Respuesta singlet y Filtro con singlet

El siguiente paso es optimizar las adaptaciones con Fest3D para conseguir recuperar la banda de paso sin perder esta mejora en la banda de rechazo. Para optimizarlo se utilizaran de variables tanto la altura como la longitud de los diferentes elementos de las adaptaciones. También se pueden utilizar las longitudes de las excitaciones del singlet.

Una vez optimizamos nuestro filtro paso banda con el singlet nos cambiaran las siguientes variables:

En la parte del filtro nos variarían las siguientes:

b		b'_1	b'_2	b'_3	b'_4	b'_5	b'_6	b'_7	b'_8
inicial		5.43	8.18	3.02	7.6	5.66	16.00	5.91	13.30
optimizada		4,03	14.75	1.86	7.55	3.22	15.28	5.99	15.08

b'_9	b'_{10}	b'_{11}	b'_{12}	b'_{13}
5.80	8.73	3.67	11.16	5.96
4.92	8.06	1.99	11.36	2.86

l	l'_1	l'_2	l'_3	l'_4	l'_5	l'_6	l'_7	l'_8
inicial	2.43	3.96	3.18	5.38	2.07	5.82	4.00	5.90
optimizada	1.84	1.49	5.50	1.65	5.77	6.5	1.49	5.36

l'_9	l'_{10}	l'_{11}	l'_{12}	l'_{13}	lin	lout
2.73	4.84	3.04	3.05	1.96	10	10
2.20	4.42	4.16	1.97	1.52	3.15	11.80

Para el singlet solo nos cambiara la longitud:

l	linR	loutR
inicial	3	3
optimizada	1.49	1.98

Como podemos apreciar tras la optimización los valores cambian bastante y queda una adaptación bastante diferente a la inicial pero esto no estropeará la banda de rechazo. En la Figura 22 se puede ver cómo queda este nuevo filtro y en la Figura 23 su respuesta.

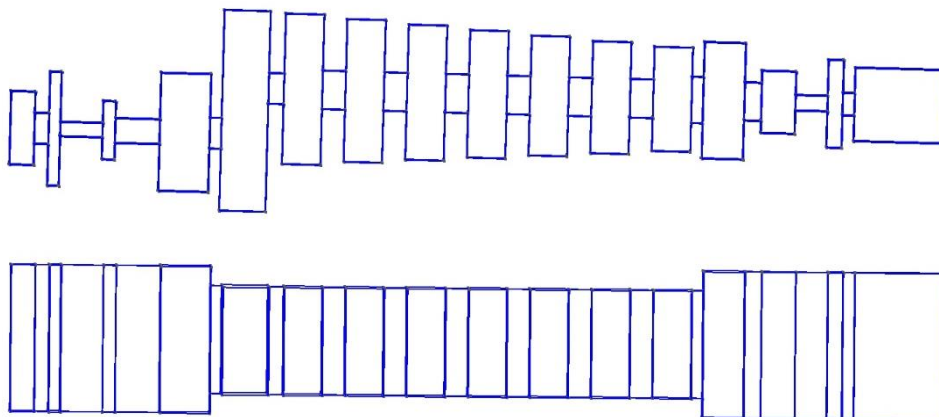
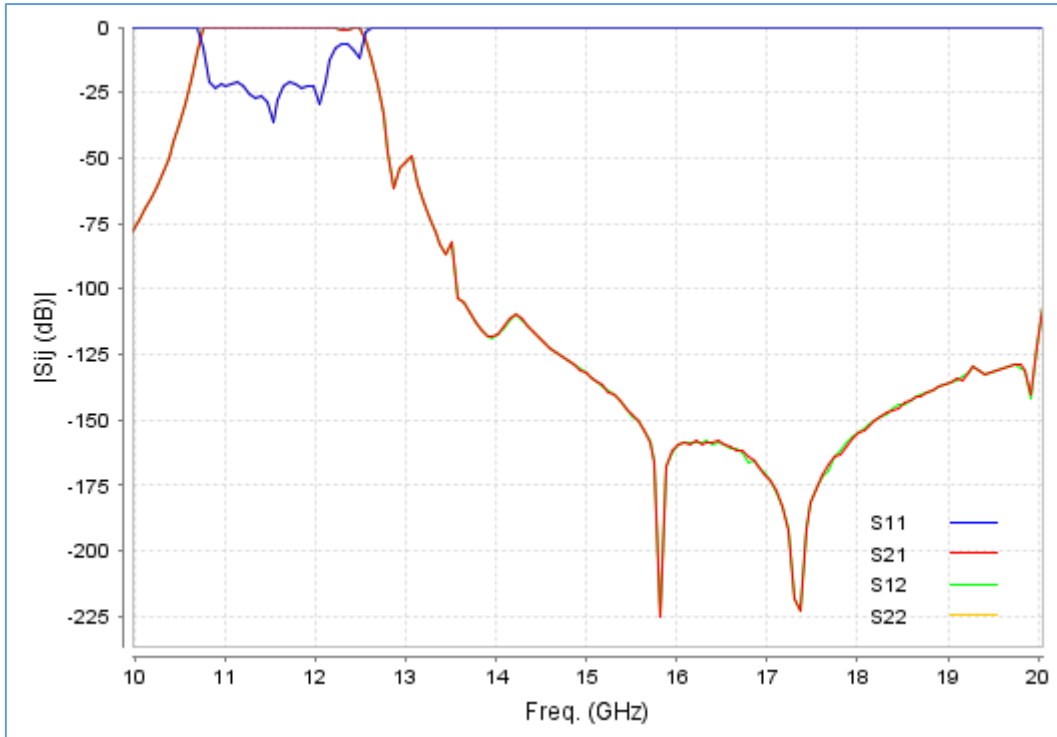
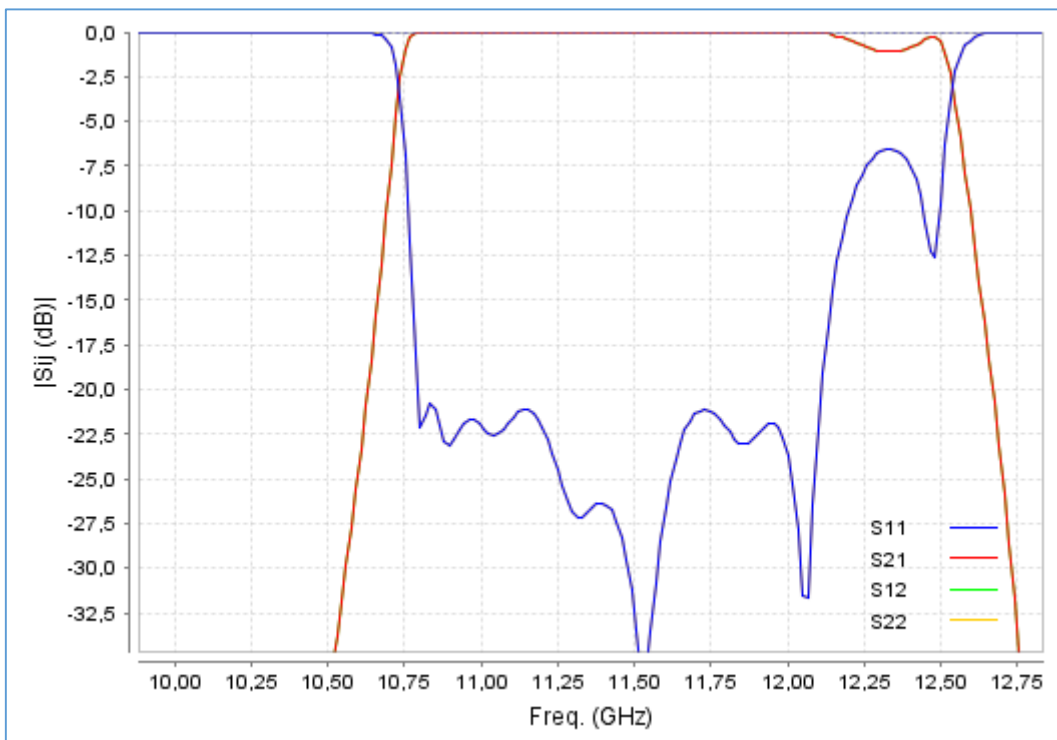


Figura 22. Esquema del filtro Paso Banda con el singlet



a)



b)

Figura 23. Resultados del filtro paso Banda con el singlet. (FiltroPasoBandaResonadorDerecha.FEST3D) A) muestra la banda de paso y rechazo b)detalle de la banda de paso

3.4.2.2 Singlet izquierda

Para el caso del singlet con cero de transmisión a la izquierda de la frecuencia de resonancia se sigue el mismo procedimiento, se calculará f_r con la fórmula anteriormente comentada (1.3). Pero en este caso la forma del singlet será diferente. Para conseguir nuestro cero a la izquierda la entrada y la salida estarán en fase.

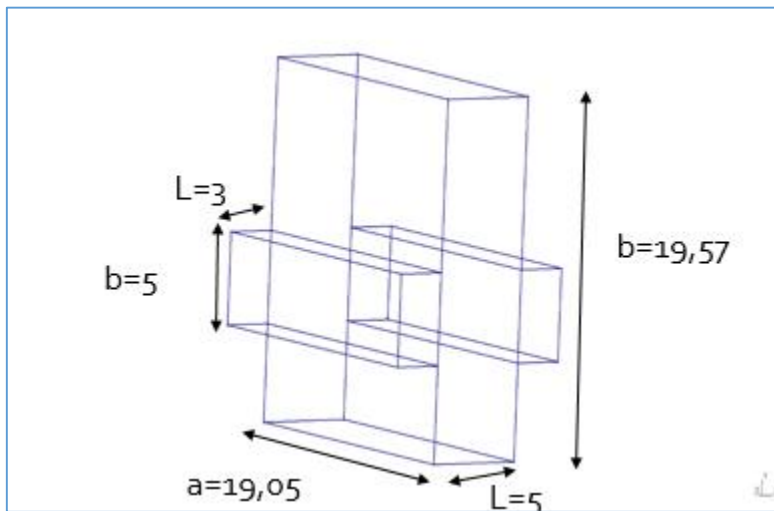


Figura 24. Singlet que genera cero de transmisión a la izquierda

Como podemos ver en la Figura 24 la anchura de este singlet es $a=19.05\text{mm}$ por lo tanto se colocara en una de las adaptaciones. En este caso no podía ser de otra manera ya que para la anchura de 14mm la frecuencia de corte esta entre la f_r y el cero de transmisión y el singlet no tendría un funcionamiento correcto.

En cuanto a la altura de la entrada y la salida será $b=5\text{mm}$ y será la misma para ambas. El offset será de 2mm respecto al centro para ambas.

Este singlet es más importante, ya que es más difícil conseguir la pendiente entre el rechazo mínimo y la banda de paso. Su respuesta la podemos ver en la Figura 25.

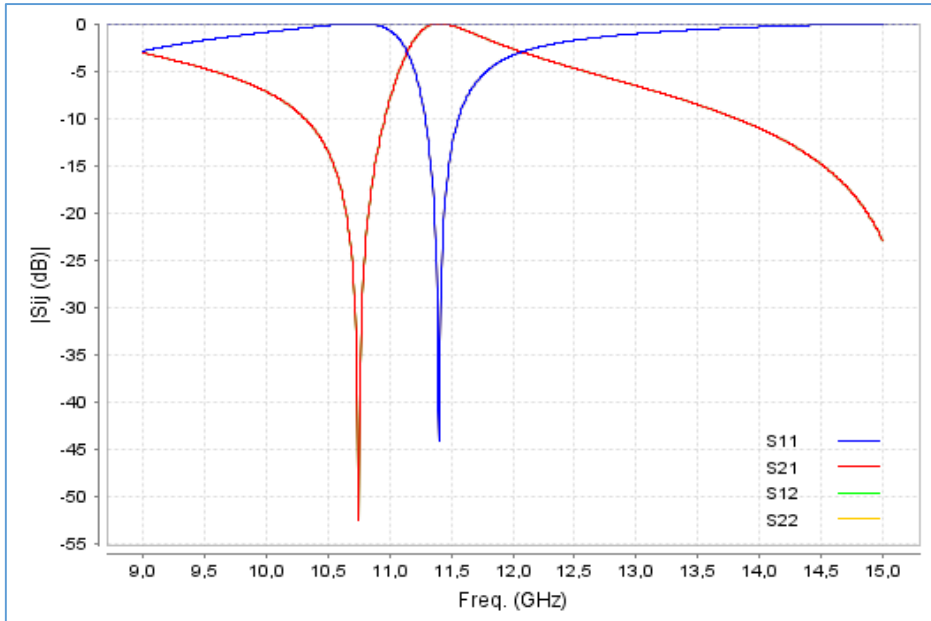


Figura 25. Respuesta singlet con cero de transmisión a la izquierda (ResonadorMasAncholzquierda.FEST3D)

Al igual que para el caso del singlet a la derecha una vez se tiene el singlet deseado se pasa a introducirlo en el filtro, pero en este caso se introduce en la adaptación.

En la Figura 26 se puede apreciar cómo quedaría el filtro y donde está colocado el singlet. En la Figura 27 se puede apreciar cómo se des adapta el filtro al introducir el singlet pero como se consigue ese cero de transmisión para darle más verticalidad a la pendiente.

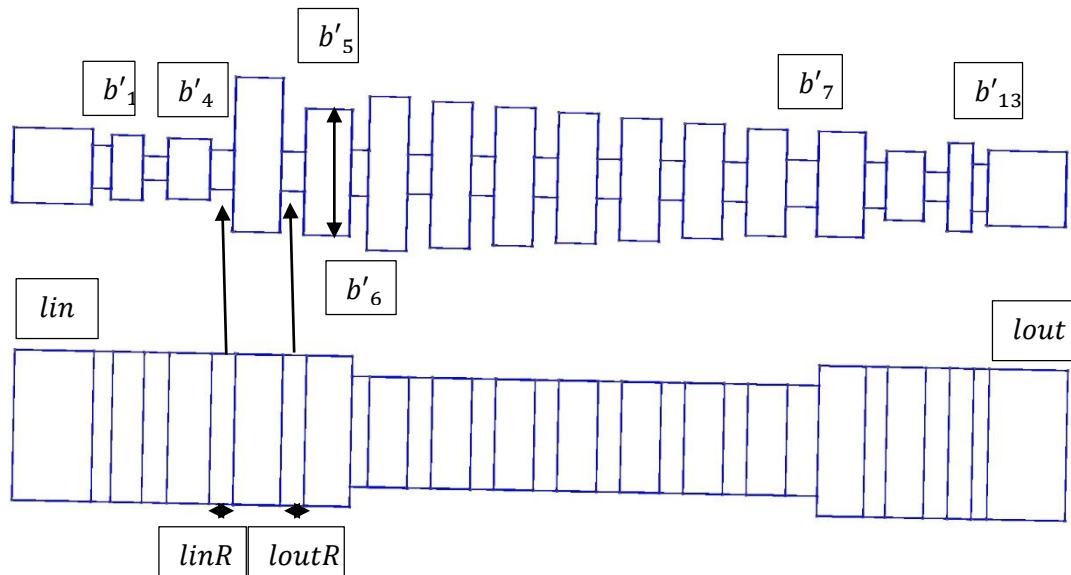


Figura 26. Esquema del filtro con el singlet que genera cero de transmisión a la izquierda.

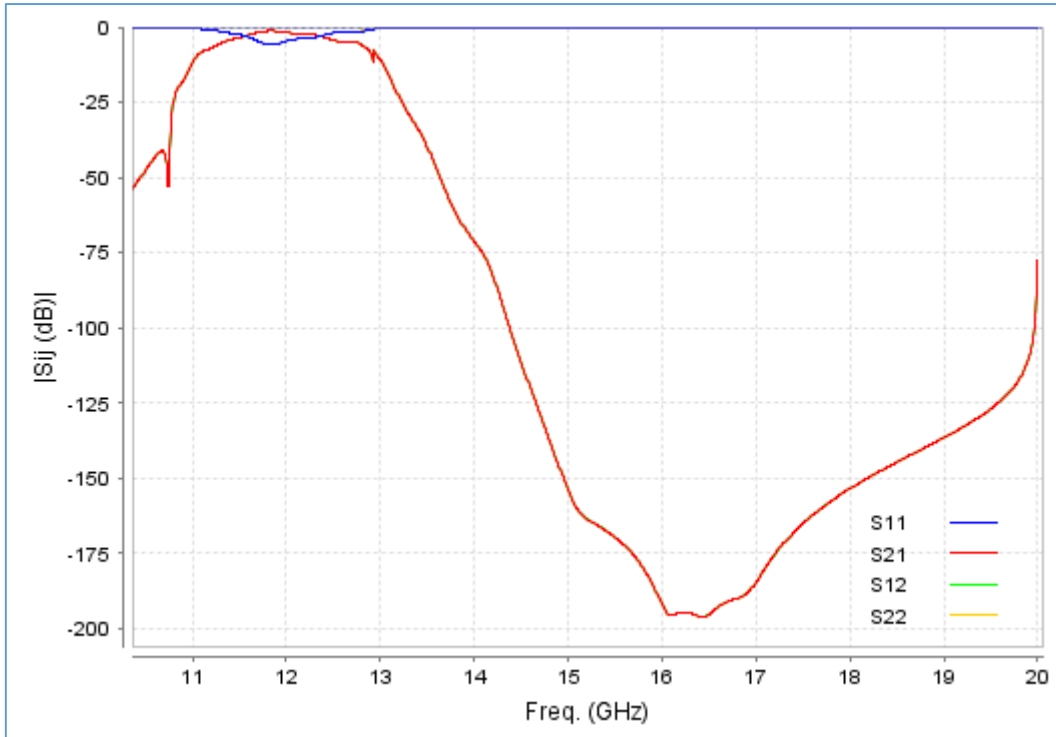


Figura 27. Respuesta en frecuencia del filtro con singlet que genera cero a la izquierda. (ResonadorIzquierdasinOpt.FEST3D)

Al introducir el singlet como se ha apreciado en Figura 27 la respuesta del filtro cambia y se desadaptada, en la Figura 28 se puede apreciar cómo influye el singlet en la respuesta en el filtro.

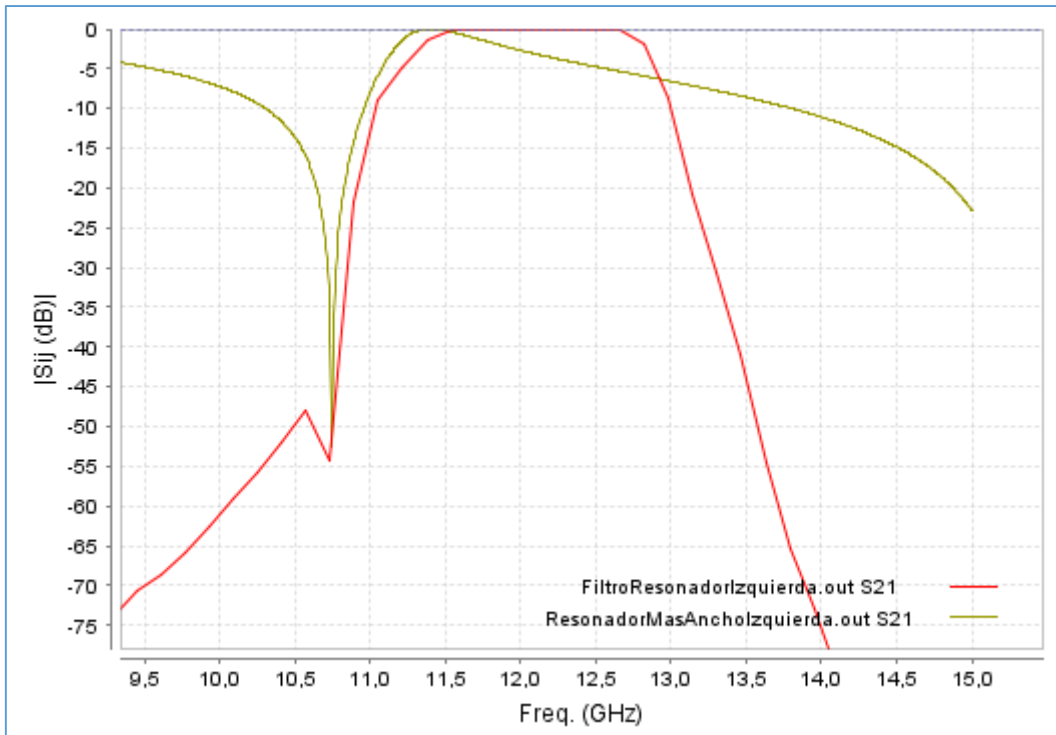


Figura 28. Respuesta del singlet y del filtro con el singlet incorporado

Cuando ya se ha conseguido el cero de transmisión en la frecuencia deseada como ya se ha hecho en el apartado anterior con el singlet que genera un cero de transmisión a la derecha, se comienza a optimizar el filtro para conseguir la banda de paso deseada. En el siguiente caso tras optimizar con FEST3D los valores que nos salen son los siguientes:

En la parte del filtro nos variarían las siguientes:

b	b'_1	b'_2	b'_3	b'_4	b'_5	b'_6	b'_7	b'_8
inicial	5.43	8.18	3.02	7.66	16.00	5.91	5.91	13.30
optimizada	5.19	9.27	3.37	10.03	12.48	3.06	4.77	12.44

b'_9	b'_{10}	b'_{11}	b'_{12}	b'_{13}
5.80	8.73	3.67	11.16	5.96
4.33	8.58	2.90	12.84	5.20

l	l'_1	l'_2	l'_3	l'_4	l'_5	l'_6	l'_7	l'_8
inicial	2.43	3.96	3.18	5.38	5.82	2.22	4.00	5.90
optimizada	1.84	1.49	5.50	1.65	6.5	1.50	3.72	2.73

l'_9	l'_{10}	l'_{11}	l'_{12}	l'_{13}	lin	lout
2.73	4.84	3.04	3.05	1.96	10	10
2.50	4.33	1.85	1.50	1.83	9.83	9.63

Para el singlet solo nos cambiara la longitud:

l	linR	loutR
inicial	3	3
optimizada	2.70	1.50

Al igual que para el caso del singlet anterior los valores de la adaptación cambian bastante quedando un filtro algo diferente como se puede apreciar en la Figura 29. Pero gracias a esta optimización se consigue recuperar la banda de paso como se puede ver en la Figura 30.

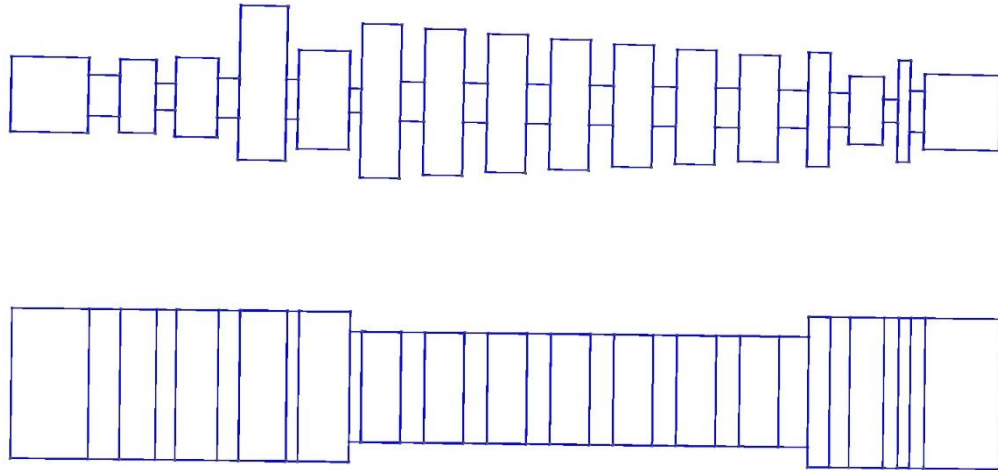


Figura 29. Esquema del filtro con el singlet.

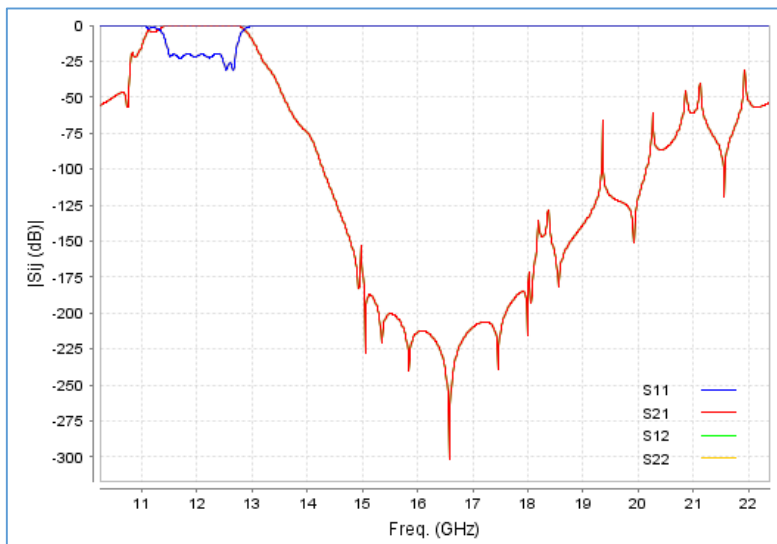


Figura 30. Respuesta en frecuencia del filtro con el cero de transmisión a la izquierda. (FiltroResonadorIzquierda.FEST3D)

3.4.3 Diseño filtro con ambos singlets

Una vez se han conseguido ambos singlets e introducirlos en los filtros el último paso es unir ambos singlets en un solo filtro para conseguir introducir un cero de transmisión a ambos lados de la banda de paso.

Para este apartado utilizaremos los singlets que hemos empleado en los apartados anteriores que podemos ver en la Figura 17 y en la Figura 24. Se colocaran ambos singlets en el mismo lugar que se han colocado anteriormente en la Figura 31 se puede apreciar cómo queda el filtro tras unir los singlets.

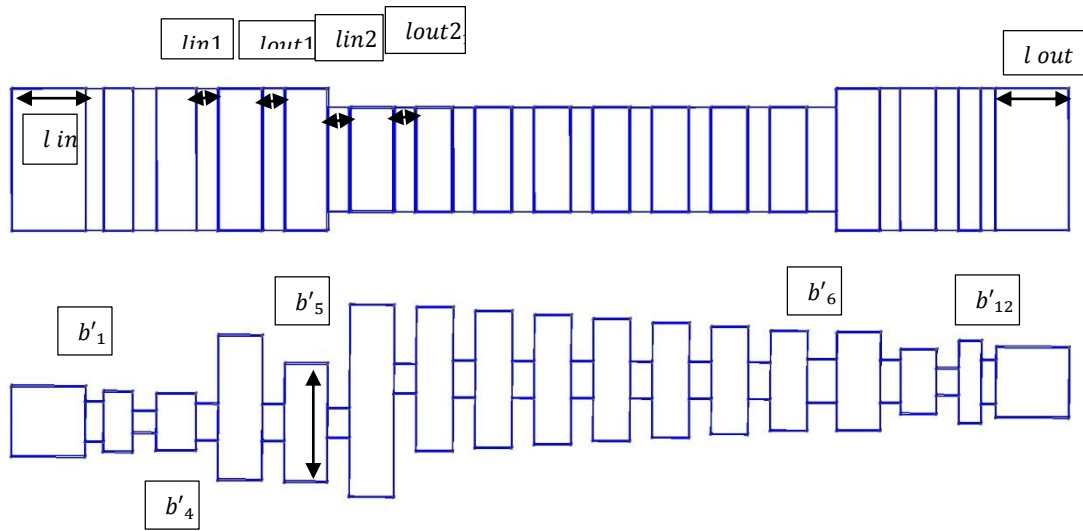


Figura 31. Esquema del filtro con los singlets

Al añadir los dos singlets se puede apreciar perfectamente Figura 32 la aportación de estos en cuanto a ceros de transmisión. Aunque como ya se ha comentado se pierde la banda de paso al variar el filtro, esta será fácilmente recuperable.



Figura 32. Respuesta del filtro con los singlets. (FiltroPasoBandaResonadorOpt.FEST3D)

Como último paso para conseguir el filtro paso banda de alta selectividad con singlets acoplados será optimizar la adaptación del filtro para conseguir la banda de paso deseada. Para optimizarla seguiremos los mismos pasos realizados anteriormente, tendremos como variables a optimizar la altura y longitud de los diferentes elementos y las longitudes de las entradas y salidas de los singlets, dándole como en todo momento unos límites lógicos.

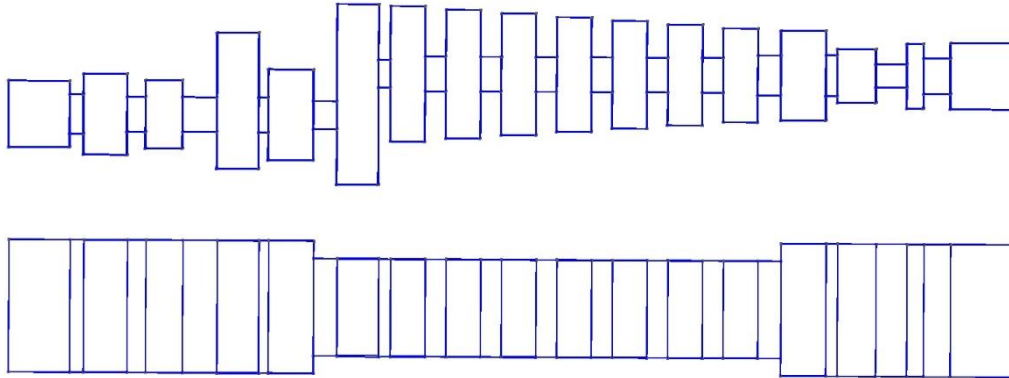


Figura 33. Esquema del filtro final con los singlets.

Como podemos apreciar los valores han cambiado bastante con respecto al filtro sin optimizar y se pueden ver en las siguientes tablas:

b	b'_1	b'_2	b'_3	b'_4	b'_5	b'_6	b'_7	b'_8
inicial	5.43	8.18	3.02	7.66	16.00	5.91	13.30	5.80
optimizada	5.63	11.66	5.09	9.82	13.09	5.76	12.98	5.88

b'_9	b'_{10}	b'_{11}	b'_{12}
8.73	3.67	11.16	5.96
7.73	3.29	9.26	5.09

l	l'_1	l'_2	l'_3	l'_4	l'_5	l'_6	l'_7	l'_8
inicial	2.43	3.96	3.18	5.38	5.82	4.00	5.90	2.73
optimizada	1.97	6.29	2.67	5.33	3.31	6.5	6.50	1.62

l'_9	l'_{10}	l'_{11}	l'_{12}	lin	lout
4.84	3.04	3.05	1.96	10	10
5.55	4.46	2.42	3.85	8.82	9.39

Para los singlets solo nos cambiara la longitud:

L izquierda	$Lin1$	$Lout1$	$lin1$	$Lout2$
inicial	3	3	3	3
optimizada	4.96	1.40	3.37	1.70

En la Figura 33 se pueden apreciar los cambios que se han producido tanto en las adaptaciones del filtro como en la longitud de los diferentes singlets, gracias a ello hemos conseguido optimizar el filtro llegando al resultado deseado como se puede apreciar perfectamente en la Figura 35.

En la Figura 34 podemos apreciar el resultado del filtro final, como es el deseado cumpliendo los objetivos marcados al inicio:

- Banda de paso: 11,5-12,5GHz.
- Banda de rechazo: 15-20 GHz.
- Perdidas de retorno: 20dB.
- Nivel en la banda de rechazo ≥ 60 dB.

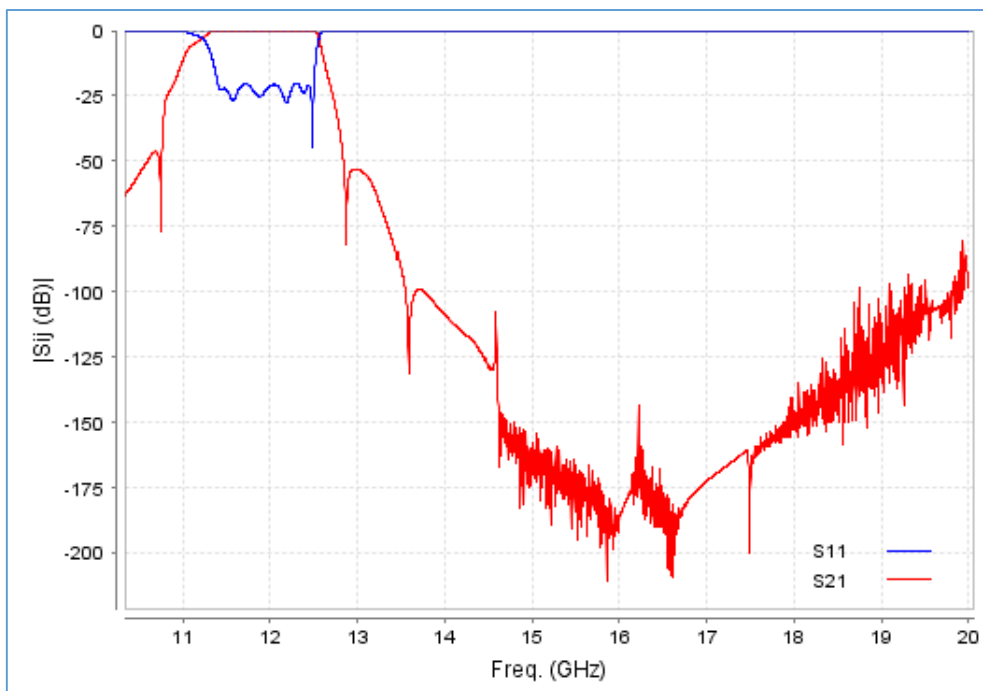


Figura 34. Respuesta del filtro paso banda final(FiltroPasoBandaResonadores.FEST3D)

El singlet que introduce el cero a la derecha es importante para ganar más pendiente pero está pendiente se podía ganar de otras maneras, que veremos a continuación, pero el cero a la izquierda es más importante porque no se puede mejorar de otra manera y con esta forma conseguimos una excelente pendiente a la izquierda de la banda de paso.

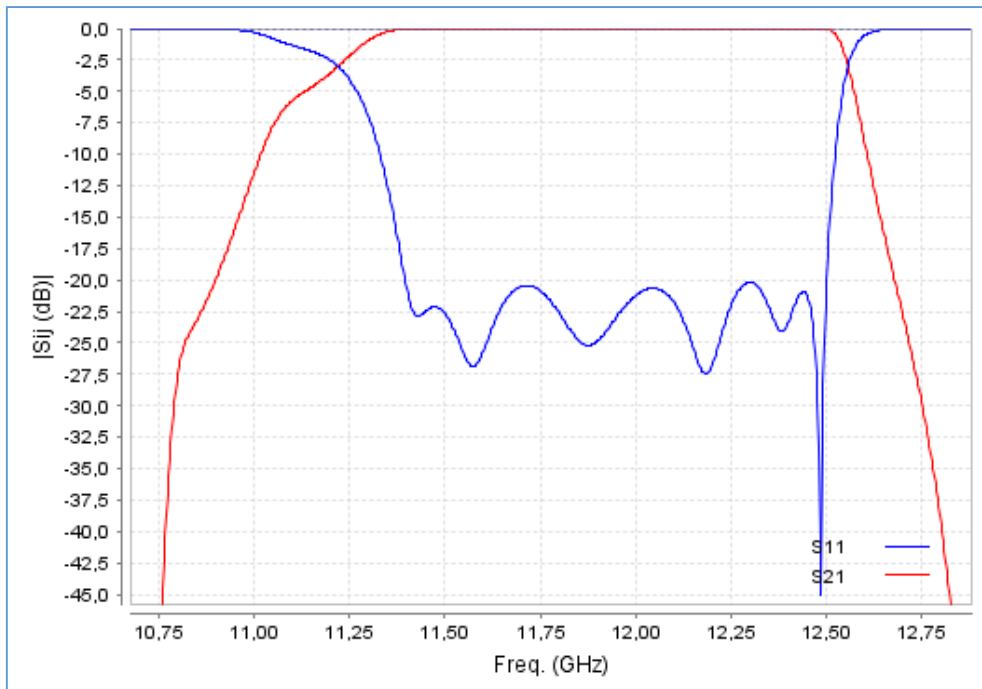
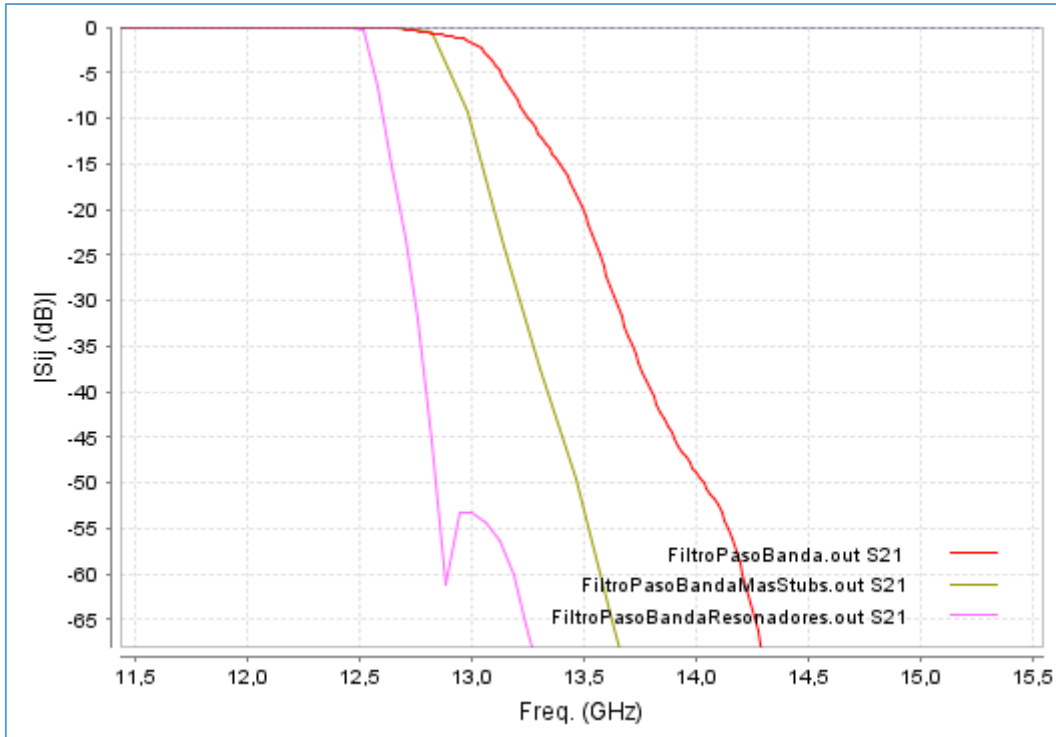


Figura 35. Respuesta paso banda del filtro Final FiltroPasoBandaResonadores.FEST3D).

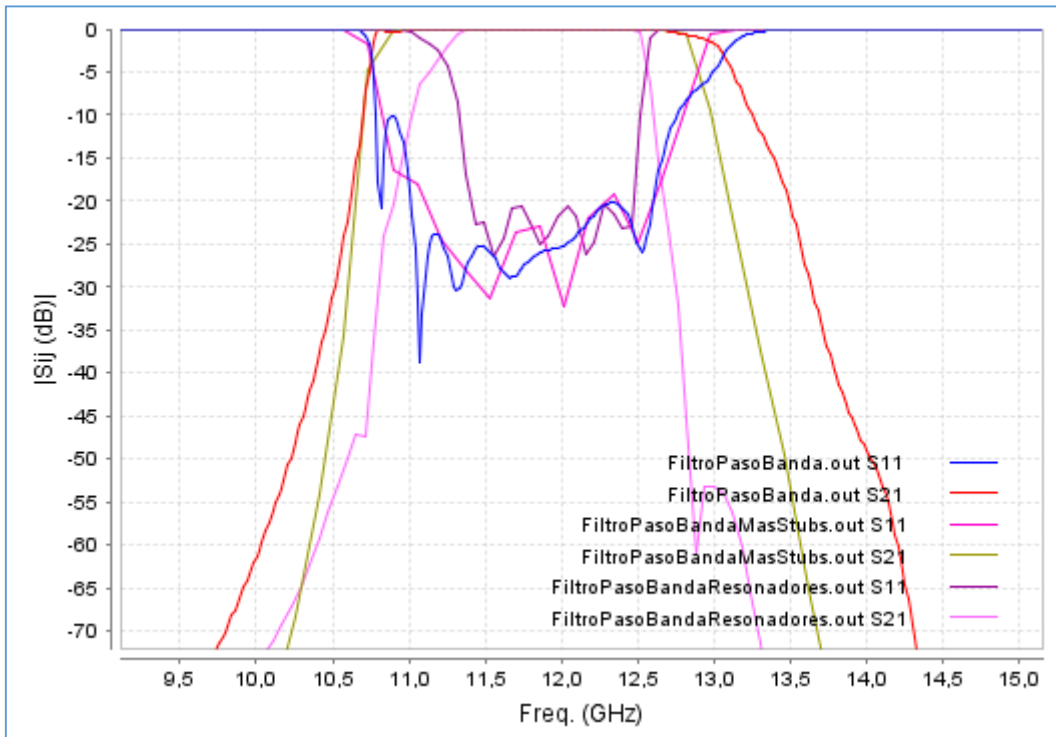
3.4.4 Comparación entre diferentes soluciones

3.4.4.1 Filtro paso banda con múltiples elementos de rechazo (Stubs)

Con la intención de observar la mejora que proporciona la introducción de singlets en nuestro filtro paso banda se compara con un filtro paso banda de mismas dimensiones, pero introduciéndole más elementos de rechazo a la frecuencia mínima comentada en el apartado del filtro paso banda y los resultados se pueden apreciar en la Figura 36.



a)



b)

Figura 36. Comparación de las diferentes estructuras a) diferentes pendientes de las diferentes estructuras. b) detalle de la banda de paso

Como se puede apreciar en la Figura 36.a) Incluyendo múltiples stubs en la banda de rechazo se consigue una pendiente más óptima, en este caso hemos añadido 3 elementos de rechazo con sus correspondientes guías. Pero también la estructura nos quedaría más alargada, por ello vemos que emplear los singlets, además de conseguir una respuesta mejor nos queda una estructura más compacta.

En la figura b) se puede apreciar como ambas estructuras cumplen los requisitos necesarios en cuanto a la banda de paso.

3.4.4.2 Filtro paso banda clásico inductivo

Con un filtro pasa banda de guía de onda inductivo se puede conseguir la pendiente que se consigue empleando los singlets, pero para ello necesitas un filtro de orden alto. En este caso hemos simulado un filtro de orden $n=10$. Como el que se puede apreciar en la Figura 37.

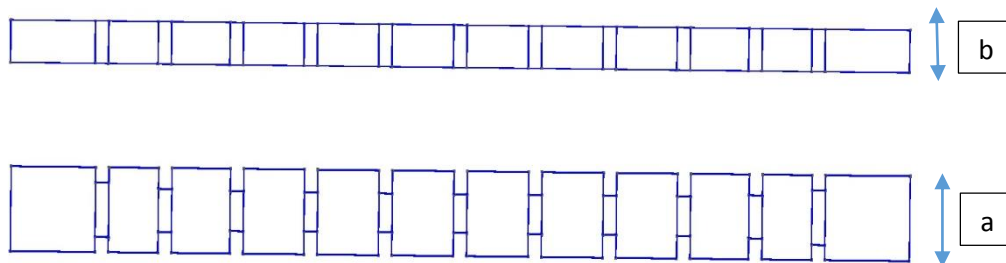


Figura 37. Esquema Filtro Inductivo

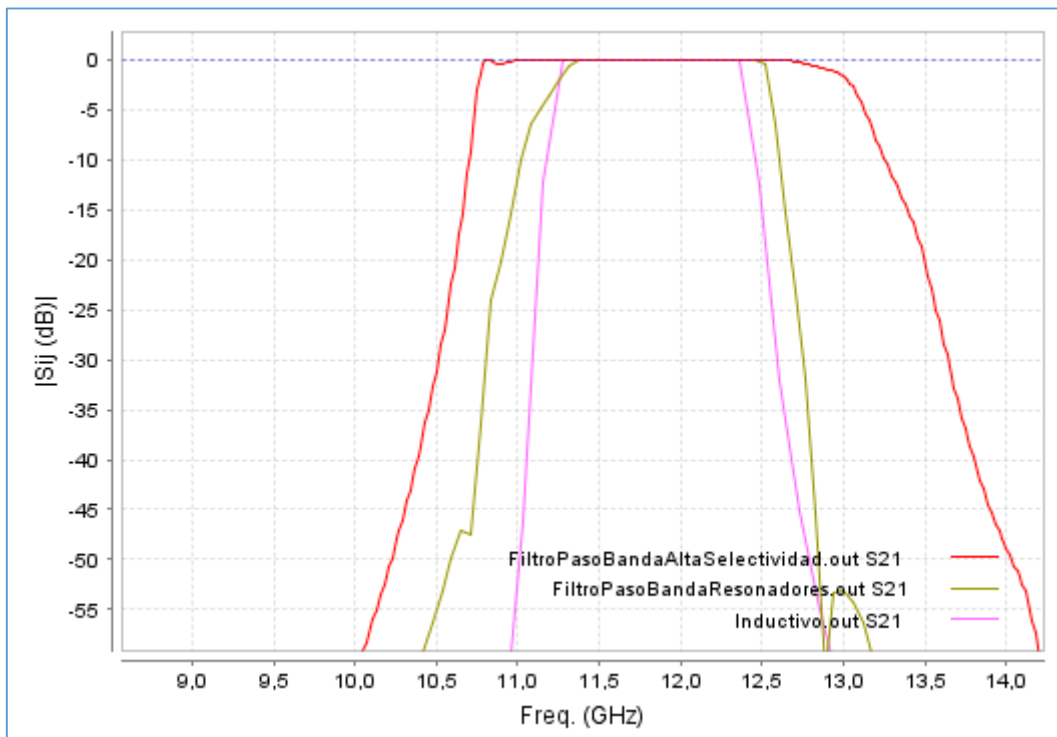


Figura 38. Comparación de la pendiente del filtro clásico con los creados anteriormente.

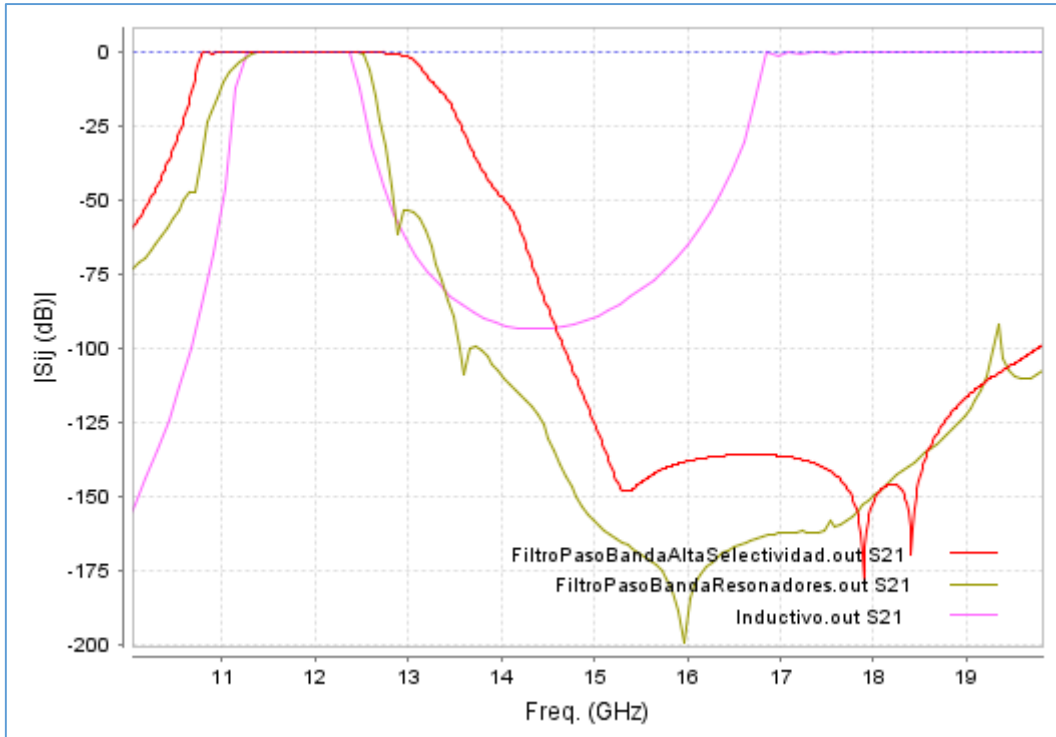


Figura 39. Comparación de la respuesta del filtro clásico y los creados anteriormente.

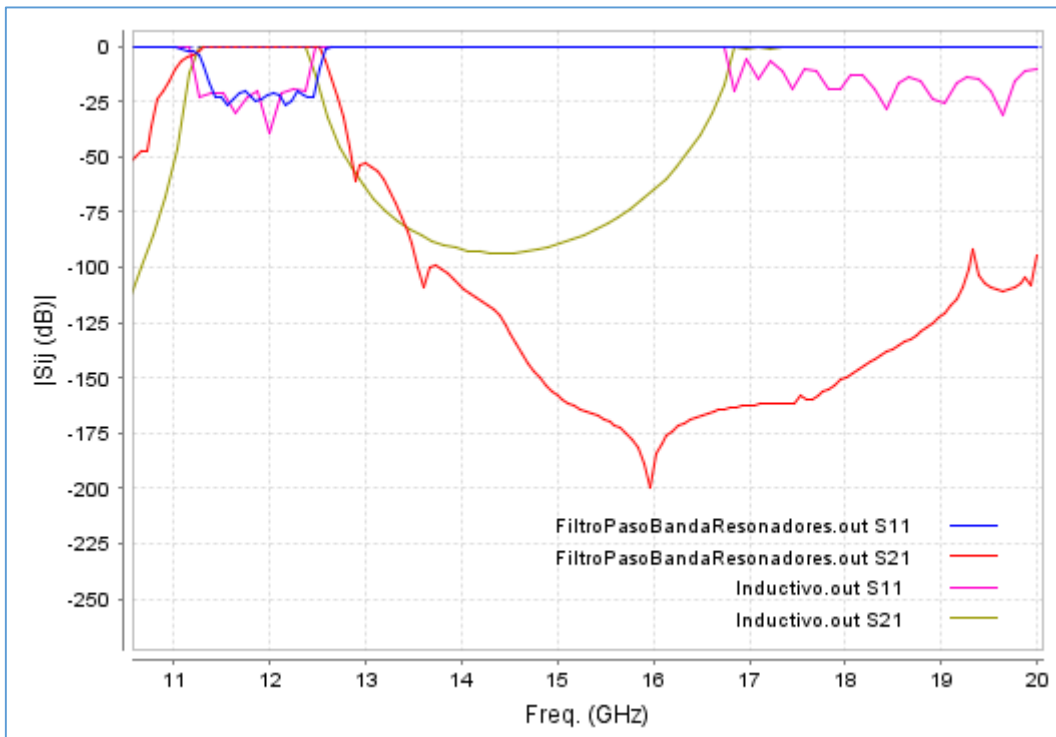


Figura 40. Comparación de la respuesta de (FiltroPasoBandaResonadores.FEST3D) y (Inductivo.FEST3D).

En las Figuras 38 y 39 se puede apreciar como con el filtro de guía de onda clásico inductivo se puede conseguir la misma pendiente que tenemos añadiendo un singlet, incluso mejor pero que resulta imposible como se ha comentado en los apartados teóricos conseguir una banda de rechazo tan buena, es más se consigue una banda de rechazo muy pequeña.

Además como podemos ver en la Figura 37 necesitamos un orden alto para conseguir las mismas prestaciones en cuanto a pendiente, lo que esto provoca es un filtro de mayores dimensiones y por lo tanto peor.

Como se puede ver en la Figura 40, ambas respuestas cumplen la banda de paso que tenemos marcada como objetivo. Pudiendo apreciar a simple vista que nuestro filtro mejora y amplía la banda de rechazo de un filtro inductivo de similares prestaciones, consiguiendo también una estructura más compacta. Teniendo el filtro inductivo una $L=202.26mm$ y el filtro paso banda con los singlets $L=145.1mm$.

3.4.4.3 Filtro paso banda con singlets y sin singlets.

Tras realizar el filtro e introducirle los singlets se comparan los resultados de ambas respuestas. Como se puede apreciar en la Figura 41 se ha conseguido optimizar la pendiente utilizando el singlet consiguiendo la banda de paso necesaria.

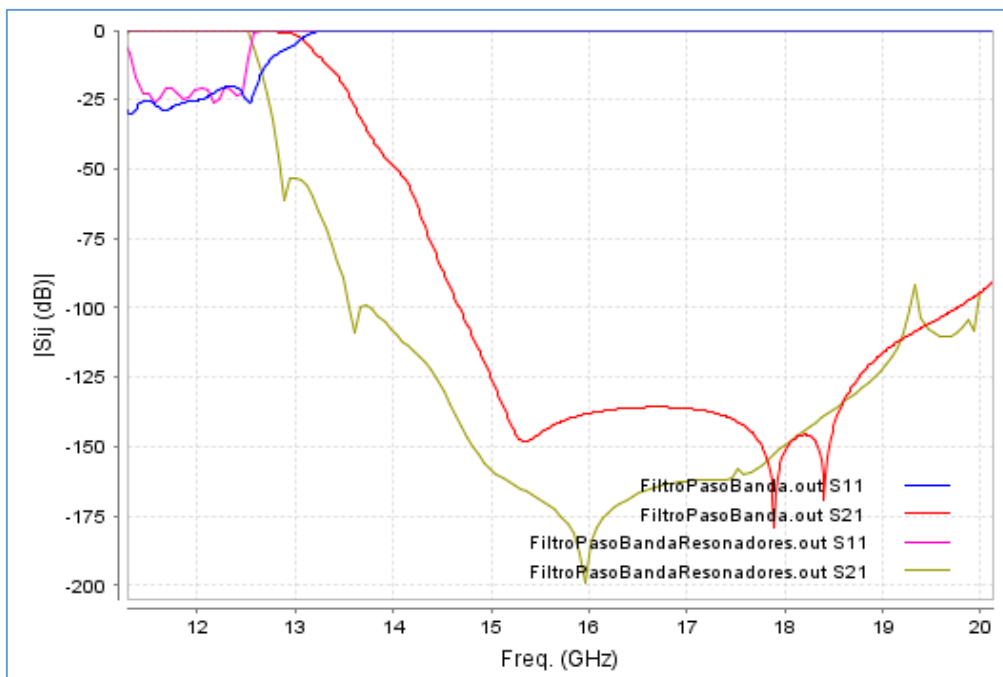
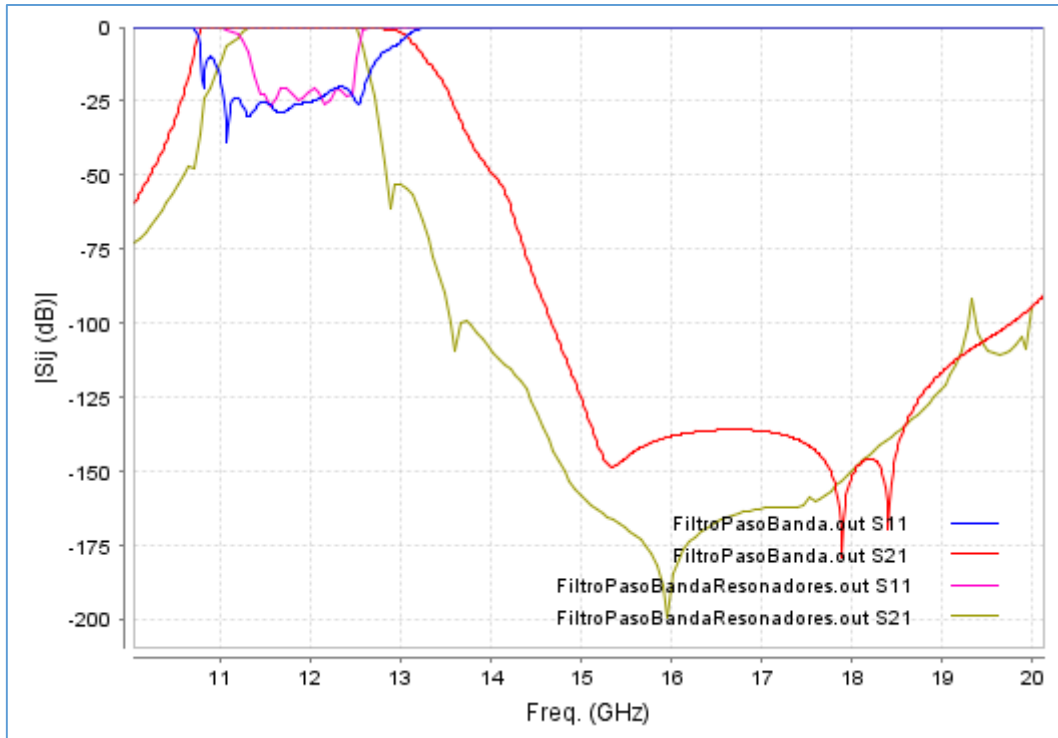


Figura 41. Aportación singlet que genera cero a la derecha(FiltroPaSoBanda.FEST3D) Y (FiltroPaSoBandaResonadores.FEST3D)



Comparación respuesta en frecuencia entre (FiltroPaSoBanda.FEST3D) Y (FiltroPaSoBandaResonadores.FEST3D)

Como se puede apreciar en la figura 41 con el cero de la izquierda conseguimos también una mayor pendiente, pero perdemos banda de paso, pero consiguiendo la banda de paso necesaria. Este sería un tema a trabajar en las líneas futuras a seguir ya que con una diferente colocación de los ceros se podría conseguir optimizar esta banda de paso.

A pesar de perder esta pequeña zona de banda de paso, en líneas generales podemos apreciar que el filtro con los singlets es más selectivo y hemos conseguido la banda de paso deseada.

4 Conclusiones y líneas futuras.

4.1 Conclusiones.

En este proyecto se han conseguido los siguientes objetivos:

- Diseñar un filtro paso banda en guía de onda rectangular combinando estructuras paso alto y paso bajo con buena banda de paso y muy buena banda de rechazo, mejorando la de los filtros de plano H.
- Disminuir el tamaño de las estructuras inductivas para conseguir respuestas similares.
- Diseño de singlets que resuenan en las frecuencias deseadas y generan ceros de transmisión en los lugares deseados.
- Mejora de la pendiente de los filtros paso banda mediante el empleo de singlets:
 - o Empleando singlets que generan ceros de transmisión a la derecha
 - o Empleando singlets que generan ceros de transmisión a la izquierda
 - o Empleando ambos singlets.
- Tras comparar diferentes técnicas, observar que empleando la técnica de combinar los filtros con los singlets los resultados son positivos.

4.2 Líneas Futuras.

Tras llegar a la conclusión que el empleo de singlets puede ser muy positivo para mejorar los filtros:

- o Realizar un análisis exhaustivo de esta nueva técnica, para alcanzar unas conclusiones más óptimas.
- o Variaciones del diseño actual, empleando diferentes resonadores para conseguir bandas similares pero pudiendo aumentarlas o disminuirlas si fuera necesario.
- o Optimización del diseño actual.

5 Bibliografía

5.1 Libros

[CAM 07] R. J. Cameron, C. M. Kudsia, and R. R. Mansour, *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Designs and Applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.

[MAT 80] G. Matthaei, L. Young y E.M.T. Jones, *Microwave filters, impedance matching networks, and coupling structures*, 2a Edición, New York, E.E.U.U.: Artech House, 1980.

[POZ 05] David. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Third Edition, New York, E.E.U.U.: John Wiley & Sons, 2005.

5.2 Artículos y conferencias.

[BAS 11] Bastioli, S. "Nonresonating mode waveguide filters" (2011) *IEEE Microwave Magazine*, 12 (6), art. no. 6012267, pp. 77-86.

[COH 48] S. B. Cohn, "A theoretical and experimental study of a waveguide filter Structure", office Naval Res., Cruft Lab., Harvard Univ., Cambridge, Mass., Rep. 39, 25 de Abril de 1948

[HAU 88] Wolfgang Hault, Reinhard Keller y Uwe Rosenberg, "The Corrugated Waveguide Band-Pass Filter – A new type of waveguide filter", *European Microwave Conference, 18th 945-949. 1988*.

[RO 03] Rosenberg, U., Amari, S., Bornemann, J. "Inline TM₁₁₀-mode filters with high-design flexibility by utilizing bypass couplings of nonresonating TE_{10/01} modes" (2003) *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 51 (6), pp. 1735-1742.

[TEB 15] Teberio, F., Arregui, I., Gomez-Torrent, A., Menargues, E., Arnedo, I., Chudzik, M., Zedler, M., Gortz, F.-J., Jost, R., Lopetegi, T., Laso, M.A.G. "Low-loss compact ku-band waveguide low-pass filter" (2015) *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, IMS 2015*.



Eloy Albizu Ciaurriz