



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE FILTROS PASOBAJO EN
TECNOLOGÍA GUIADA Y MICROSTRIP**

AUTOR: José Pérez Pujalte

DIRECTOR: Fernando Daniel Quesada Pereira

CODIRECTOR: Alejandro Álvarez Melcón

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, hermanos, y en general a mi familia por el apoyo recibido durante estos años y que gracias a ellos he conseguido lograr los objetivos que me he propuesto.

Agradecer también la confianza de Fernando en este proyecto, ya que ante cualquier duda siempre ha estado disponible en cualquier momento.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	8
Capítulo 2. Teoría filtros paso bajo	12
2.1. Síntesis mediante saltos de impedancia	12
2.2. Función de Zolotarev.....	17
Capítulo 3. Realización de filtros paso bajo.	18
3.1. Pasos a seguir para su diseño.....	18
3.2. Filtro basado en ventanas rectangulares mediante la función de Chebyshev	21
3.3. Filtro basado en ventanas rectangulares mediante la función de Zolotarev.....	27
3.4. Influencia del parámetro Θ_c	32
3.4.1. Variación parámetro Θ_c mediante la función de Chebyshev.....	32
3.4.2. Variación parámetro Θ_c mediante la función de Zolotarev.....	36
3.5. Variación anchura del iris filtro Chebyshev.....	39
3.6. Variación anchura del iris filtro Zolotarev.....	42
3.7. Influencia de las pérdidas de retorno (RL).....	45
3.7.1. Variación parámetro RL mediante la función de Chebyshev.....	45
3.7.2. Variación parámetro RL mediante la función de Zolotarev.	49
3.8. Influencia del espesor del iris.....	52
3.8.1. Variación espesor del iris mediante la función de Chebyshev.....	52
3.8.2. Variación espesor del iris mediante la función de Zolotarev.....	55
Capítulo 4. Línea microtira (microstrip)	59
4.1. Advanced Design System (ADS)	60
4.1.1. Cálculo de los valores de impedancia para un filtro prototipo.....	61
4.1.2. Cálculo de la longitud eléctrica ($\beta\ell$) de las líneas	63
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras.....	68
Bibliografía	69

ÍNDICE TABLAS

Tabla 3.1 Especificaciones del filtro tipo Chebyshev	21
Tabla 3.2 Valores de los inversores asociados al módulo de su S21.....	21
Tabla 3.3 Alturas de los iris (mm).....	23
Tabla 3.4 Longitudes teniendo en cuenta el desfase que añade el iris respecto al inversor ideal(mm).....	24
Tabla 3.5 Dimensiones filtro Chebyshev representado en la Figura 3.7.....	25
Tabla 3.6 Especificaciones del filtro función de Zolotarev.....	27
Tabla 3.7 Valores de los inversores asociados a al módulo del parámetro de transmisión para un filtro de tipo Zolotarev.....	27
Tabla 3.8 Alturas de los iris (mm) filtro Zolotarev.....	28
Tabla 3.9 Longitudes (mm) para un filtro de tipo Zolotarev.....	29
Tabla 3.10 Dimensiones filtro Zolotarev representado en la Figura 3.11.....	30
Tabla 3.11 Especificaciones del filtro tipo Chebyshev con variación de Θ_c	32
Tabla 3.12 Valores de los inversores de impedancia para los distintos Θ_c para un filtro de Chebyshev.....	32
Tabla 3.13 Valores de las alturas de los iris (mm) para los distintos Θ_c para un filtro de Chebyshev.....	33
Tabla 3.14 Valores longitud (mm) para los distintos Θ_c para un filtro de Chebyshev.....	33
Tabla 3.15 Especificaciones del filtro función de Zolotarev con variación de Θ_c	36
Tabla 3.16 Valores de los inversores de impedancia para los distintos Θ_c para un filtro de Zolotarev.....	36
Tabla 3.17 Valores de las alturas de los iris (mm) para los distintos Θ_c para un filtro de Zolotarev.....	36
Tabla 3.18 Valores de las longitudes (mm) para los distintos Θ_c para un filtro de Zolotarev.....	36
Tabla 3.19 Especificaciones del filtro de tipo de Chebyshev con variación de anchura.....	39
Tabla 3.20 Valores alturas de los iris (mm) de las distintas anchuras para un filtro de Chebyshev.....	39
Tabla 3.21 Valores longitud (mm) de las distintas anchuras para un filtro de Chebyshev.....	39
Tabla 3.22 Especificaciones del filtro función de Zolotarev con variación de anchura.....	42
Tabla 3.23 Valores de las alturas de los iris (mm) de las distintas anchuras para un filtro de Zolotarev.....	43
Tabla 3.24 Valores de las longitudes (mm) de las distintas anchuras para un filtro de Zolotarev.....	43
Tabla 3.25 Especificaciones del filtro función de tipo Chebyshev con variación de las pérdidas de retorno.....	45
Tabla 3.26 Valores de los inversores de impedancia para los distintos RL para un filtro de Chebyshev.....	46
Tabla 3.27 Valores las alturas de los iris (mm) para los distintos RL para un filtro de Chebyshev.....	46
Tabla 3.28 Valores de las longitudes (mm) para los distintos RL para un filtro de Chebyshev.....	46

Tabla 3.29 Especificaciones del filtro función de Zolotarev con variación de las pérdidas de retorno.	49
Tabla 3.30 Valores inversores de impedancia para los distintos RL para un filtro de Zolotarev.	49
Tabla 3.31 Valores alturas de los iris (mm) para los distintos RL para un filtro de Zolotarev. ..	49
Tabla 3.32 Valores longitud (mm) para los distintos RL para un filtro de Zolotarev.	50
Tabla 3.33 Especificaciones del filtro función de Chebyshev con variación espesor del iris.	52
Tabla 3.34 Valores inversores de impedancia para los distintos il para un filtro de Chebyshev.	53
Tabla 3.35 Valores alturas de los iris (mm) para los distintos il para un filtro de Chebyshev....	53
Tabla 3.36 Valores longitud (mm) para los distintos il para un filtro de Chebyshev.	53
Tabla 3.37 Especificaciones del filtro función de Zolotarev con variación espesor del iris.	55
Tabla 3.38 Valores inversores de impedancia para los distintos il para un filtro de Zolotarev.	56
Tabla 3.39 Valores alturas de los iris (mm) para los distintos il para un filtro de Zolotarev.....	56
Tabla 3.40 Valores longitud (mm) para los distintos il para un filtro de Zolotarev.....	56
Tabla 4.1 Valores unitarios prototipo para un filtro paso bajo.	61
Tabla 4.2 Valores L y C.....	62
Tabla 4.3 Valores filtro microstrip.....	65

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1 Espectro electromagnético	8
Figura 2.1 Introducción inversores de impedancia e impedancia escaladas	16
Figura 2.2 Respuesta tipo Zolotarev.....	17
Figura 3.1 Prototipo filtro paso bajo	18
Figura 3.2 Respuesta filtro paso bajo ideal Chebyshev orden 4	20
Figura 3.3 Respuesta filtro paso bajo ideal Zolotarev orden 4	20
Figura 3.4 Modelo iris capacitivo en guía de onda rectangular	22
Figura 3.5 Resultado análisis paramétrico W	22
Figura 3.6 Resultado análisis paramétrico l/2.....	23
Figura 3.7 Filtro paso bajo de orden 4 función de tipo Chebyshev.....	24
Figura 3.8 Respuesta filtro Chebyshev orden 4 representado en Figura 3.7.....	25
Figura 3.9 Resultado análisis paramétrico Zolotarev W	28
Figura 3.10 Resultado análisis paramétrico l/2 Zolotarev	29
Figura 3.11 Filtro paso bajo orden 4 función tipo Zolotarev.....	30
Figura 3.12 Respuesta filtro Zolotarev de orden 4 representado en la Figura 3.11	31
Figura 3.13 Respuesta filtro Chebyshev con $\Theta_c = 35^\circ$	33
Figura 3.14 Respuesta filtro Chebyshev con $\Theta_c = 30^\circ$	34
Figura 3.15 Respuesta filtro Chebyshev con $\Theta_c = 27^\circ$	35
Figura 3.16 Respuesta del filtro Zolotarev con $\Theta_c = 35^\circ$	37
Figura 3.17 Respuesta del filtro Zolotarev con $\Theta_c = 30^\circ$	37
Figura 3.18 Respuesta del filtro Zolotarev con $\Theta_c = 27^\circ$	38
Figura 3.19 Filtro paso bajo orden 4 reducción de anchura de los iris	40
Figura 3.20 Respuesta del filtro de tipo Chebyshev con anchura de los iris de 40mm	40
Figura 3.21 Respuesta del filtro de tipo Chebyshev con anchura de los iris de 35mm	41
Figura 3.22 Respuesta del filtro de tipo Chebyshev con anchura de los iris de 30mm	42
Figura 3.23 Respuesta del filtro Zolotarev con anchura de los iris de 40mm.....	43
Figura 3.24 Respuesta del filtro Zolotarev con anchura de los iris de 35mm.....	44
Figura 3.25 Respuesta del filtro Zolotarev con anchura de los iris de 30mm.....	44
Figura 3.26 Geometría filtro pasobajo mediante la influencia de las pérdidas de retorno.....	45
Figura 3.27 Respuesta del filtro Chebyshev con $R_L=20$ dB	47
Figura 3.28 Respuesta del filtro Chebyshev con $R_L=25$ dB	47
Figura 3.29 Respuesta del filtro Chebyshev con $R_L=30$ dB	48
Figura 3.30 Respuesta del filtro Zolotarev con $R_L=20$ dB	50
Figura 3.31 Respuesta del filtro Zolotarev con $R_L=25$ dB	51
Figura 3.32 Respuesta del filtro Zolotarev con $R_L=30$ dB	51
Figura 3.33 Respuesta filtro Chebyshev con $il = 2$ mm con especificaciones de la Tabla 3.33 ..	53
Figura 3.34 Respuesta filtro Chebyshev con $il = 3$ mm con especificaciones de la Tabla 3.33 ..	54
Figura 3.35 Respuesta filtro Chebyshev con $il = 4$ mm con especificaciones de la Tabla 3.33 ..	54
Figura 3.36 Respuesta filtro Zolotarev con $il = 2$ mm con especificaciones de la Tabla 3.37	56
Figura 3.37 Respuesta filtro Zolotarev con $il = 3$ mm con especificaciones de la Tabla 3.37	57
Figura 3.38 Respuesta filtro Zolotarev con $il = 4$ mm con especificaciones de la Tabla 3.37	57
Figura 4.1 Línea microtira.....	59
Figura 4.2 (a) Estructura general filtro paso bajo microstrip mediante salto de impedancia. (b) Estructura filtro paso bajo L-C.....	60
Figura 4.3 Modelo circuital ADS	62
Figura 4.4 Respuesta modelo circuital ADS.....	63
Figura 4.5 Filtro paso bajo usando microstrip.....	66
Figura 4.6 Layout 3D.....	66
Figura 4.7 Respuesta filtro paso bajo orden 2 usando microstrip	67

Capítulo 1. Introducción

En un primer lugar, definiremos el término de microondas como aquellas ondas electromagnéticas cuyo rango de frecuencia está comprendido entre los 300MHz y 300GHz, correspondiente en términos de longitud de onda entre 1m y 1mm. En la siguiente figura podemos observar los distintos rangos del espectro electromagnético, señalando el determinado para la región de microondas [1].

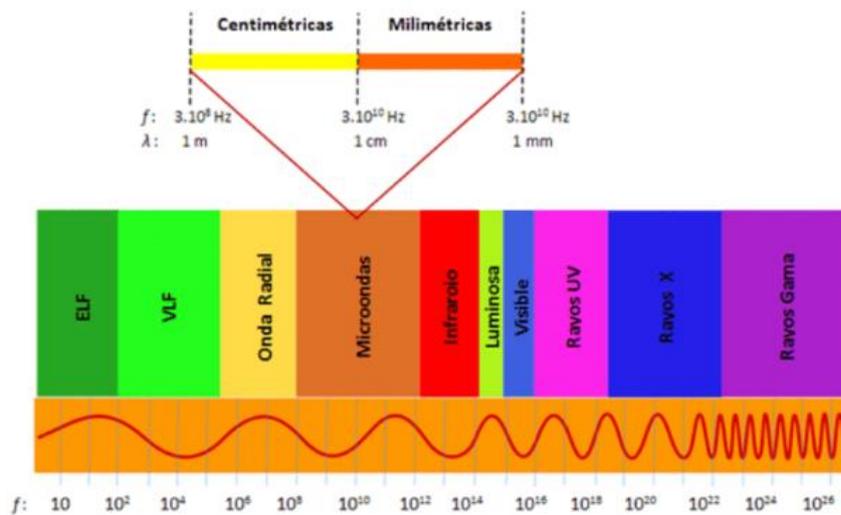


Figura 1.1 Espectro electromagnético [1]

La teoría sobre las microondas fue impulsada durante la Segunda Guerra Mundial debido a la necesidad de desarrollar el radar, por lo que a finales de esta contienda ya se habían establecido las bases sobre la teoría de campo de microondas. En los años posteriores, la guía de onda rectangular se convirtió en la guía de onda dominante. La tecnología empleada en los años 50 ha visto grandes cambios hasta llegar a la tecnología actual y esto es debido a los esfuerzos para la evolución de nuevos conceptos, optimización del hardware o emplear nuevas técnicas de fabricación. Por otro lado, influyó también en el desarrollo de los satélites de comunicaciones y la competencia armamentística, ya que usan ampliamente la tecnología de microondas [1].

En los años setenta y ochenta, las comunicaciones por satélite fueron el principal motor de I + D para las redes de filtros de microondas. Asimismo, se están llevando a cabo técnicas de producción para que los equipos de microondas espaciales tengan un coste más bajo. Además se están poniendo a disposición nuevas bandas de frecuencia que incluyen ondas milimétricas, ya que cada vez más servicios usan comunicaciones inalámbricas, ya sea por satélite o por sistemas celulares terrestres. Dicha demanda y las nuevas bandas de frecuencias continuarán alimentando la I + D para los filtros de microondas [2].

Estos avances provocaron el desarrollo de filtros de guía de onda de modo dual, filtros basados en resonadores dieléctricos o filtros microstrip entre otros. La evolución de los sistemas de comunicación inalámbricos en la década de 1990 impulsó el desarrollo de materiales y procesos para técnicas de producción a gran escala y rentables para filtros de microondas [2].

Un filtro de microondas es un dispositivo con una respuesta selectiva en frecuencia de modo que atenúa de forma selectiva señales de microondas en función de su frecuencia. Por lo que serán eliminadas o atenuadas aquellas frecuencias que se encuentren fuera de la banda de paso y se transmitirán aquellas que se encuentren dentro de ella. Existen diferentes tipos de filtros que son, paso bajo, paso alto, paso banda y elimina banda.

Filtro paso bajo: filtro que permite el paso de señales a baja frecuencia y bloquea o impide el paso de señales a alta frecuencia.

Filtro paso alto: filtro que permite el paso de señales a alta frecuencia y bloquea o impide el paso de señales a baja frecuencia.

Filtro paso banda: filtro que deja pasar determinadas frecuencias que se encuentran dentro de un ancho de banda determinado y atenúa las que se encuentran fuera de ese rango.

Filtro elimina banda: filtro que no permite el paso de señales que se encuentran comprendidas entre la frecuencia de corte superior y frecuencia de corte inferior.

Para la realización de este proyecto hemos usado el software matemático de uso comercial llamado MATLAB [3], así como los simuladores electromagnéticos de onda completa ANSYS HFSS [4] y ADS [5]. En un primer lugar, hemos programado unos *scripts* en MATLAB que son los que interactúan con ANSYS HFSS para la implementación y simulación del filtro. Uno de dichos *scripts* se ha programado para el diseño de filtros que serán mostrados en el proyecto y consta de una serie de parámetros de configuración como el orden del filtro, frecuencia de corte, dimensiones de la guía de onda, pérdidas de retorno, longitud eléctrica de las líneas de transmisión, espesor del iris y si el proyecto lo requiere también la permitividad del dieléctrico que rellena una determinada sección de guía de onda rectangular. En otros *scripts* establecemos el tipo de geometría, los diferentes análisis paramétricos y el barrido en frecuencia, por lo que con dichos parámetros definidos ya se puede implementar el proyecto en ANSYS HFSS para la creación de los filtros y su posterior análisis.

En el Capítulo 2, explicaremos la teoría sobre los filtros paso bajo, en la que hemos diferenciado entre la síntesis mediante saltos de impedancia, donde hemos ido desarrollando todos los pasos teóricos para poder obtener los valores de los inversores de impedancia. Por otro lado, explicamos las características de la función de transferencia de tipo Zolotarev [2].

En el Capítulo 3, realizaremos ejemplos de filtros paso bajo basados en ventanas rectangulares mediante la función de Chebyshev y Zolotarev [2], obteniendo la respuesta del filtro y observando las diferencias entre ambas funciones. Una vez realizado lo anterior, ejecutaremos varias simulaciones variando el parámetro asociado a la longitud eléctrica θ_c para ver su influencia con la banda de espurios. Hemos realizado simulaciones mediante la variación de anchura, para estudiar la

influencia de las pérdidas de retorno para controlar el nivel de rizado en la banda de paso y también hemos corrido simulaciones variando el espesor del iris para ver cómo afecta a los valores de síntesis y a la posición de la banda de espurios.

En el capítulo 4, realizamos mediante el programa ADS simulaciones de un filtro paso bajo microstrip a través de su modelo circuital en el que queremos observar el efecto que tiene realizar un filtro basado en microstrip y que también sirve como una línea futura de trabajo.

En el capítulo 5, se dedica para las conclusiones del proyecto y las posibles líneas futuras de trabajo.

Capítulo 2. Teoría filtros paso bajo

En Capítulo 2 explicaremos la teoría para el desarrollo de filtros paso bajo y dicha información ha sido obtenida de la fuente bibliográfica Richard J. Cameron [2].

2.1. Síntesis mediante saltos de impedancia

Para comenzar con la síntesis lo que hacemos en primer lugar es observar las funciones de transferencia

$$S_{12}(\omega) = S_{21}(\omega) = \frac{1}{\varepsilon E(\omega)} \quad , \quad (2.1)$$

$$S_{11}(\omega) = S_{22}(\omega) = \frac{F(\omega)}{E(\omega)} \quad . \quad (2.2)$$

Podemos observar que no existen ceros de transmisión al aparecer un numerador igual a 1 en la función de transferencia de la ecuación 2.1.

$E(\omega)$ y $F(\omega)$ son las funciones donde se encuentran los polos y ceros de reflexión respectivamente. Ambas contienen coeficientes reales y además en el polinomio $E(\omega)$ todas sus raíces deben estar contenidas en el semiplano izquierdo del plano complejo.

Los parámetros S_{11} y S_{21} pueden expresarse de la siguiente manera

$$S_{11}(s) = \frac{F(s)}{\varepsilon_r E(s)} \quad , \quad (2.3)$$

$$S_{21}(s) = \frac{P(s)}{\varepsilon E(s)} \quad . \quad (2.4)$$

$\varepsilon \rightarrow$ constante de rizado.

$\varepsilon_r \rightarrow$ permitividad del dieléctrico.

Las raíces de los polinomios de $E(s)$ y $F(s)$ para un polinomio de Chebyshev de grado N se obtienen a través de las siguientes ecuaciones:

$$\eta = \frac{1}{N} \ln \left(\varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon^2 + 1} \right) \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_1 = \sqrt{10^{\frac{R_L}{10}} - 1} \quad (2.6)$$

$$s_{pk} = j * \cosh(\eta + j * \theta_k) \quad (2.7)$$

$$s_{zk} = j * \cos j * \theta_k \quad (2.8)$$

$$\theta_k = \frac{(2k - 1) * \pi}{2N} \text{ con } k = 1, 2, \dots, N \quad (2.9)$$

$R_L \rightarrow$ pérdidas de retorno.

Tras haber obtenido los polos y los ceros de las funciones de transferencia y reflexión lo que hacemos es trasladarlos a un plano t auxiliar mediante la siguiente ecuación.

$$t = \frac{s * \text{sen}(\theta_c)}{\sqrt{1 + (s * \text{sen}(\theta_c))^2}} \quad (2.10)$$

$\theta_c \rightarrow$ frecuencia angular de corte del filtro.

A través de los coeficientes reales de los polinomios $E(t)$ y $F(t)$ ya podemos obtener los polinomios $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ y $D(t)$ que nos servirán para ir descomponiendo el filtro en segmentos de líneas de transmisión con una determinada impedancia característica

$$A(t) = (e_0 + f_0) + (e_2 + f_2)t^2 + (e_4 + f_4)t^4 + \dots \quad (2.11)$$

$$B(t) = (e_1 + f_1) + (e_3 + f_3)t^3 + (e_5 + f_5)t^5 + \dots \quad (2.12)$$

$$C(t) = (e_1 - f_1) + (e_3 - f_3)t^3 + (e_5 - f_5)t^5 + \dots \quad (2.13)$$

$$D(t) = (e_0 - f_0) + (e_2 - f_2)t^2 + (e_4 - f_4)t^4 + \dots, \quad (2.14)$$

donde e_i y f_i son los coeficientes de los polinomios $E(t)$ y $F(t)$ / ε_{Rt} .

Por tanto, los parámetros S ya pueden ser calculados con estas funciones y con dos constantes que se indican a continuación

$$\varepsilon_t = \frac{[1 - t^2]^{\frac{N}{2}}}{\left(\sqrt{1 - 10^{-\frac{RL}{w}}}\right) |E(t)|} \quad \text{con } t = t_c = j * \tan(\theta_c) \quad (2.15)$$

w → frecuencia normalizada.

$$\varepsilon_{Rt} = \frac{\varepsilon_t}{\sqrt{\varepsilon_t^2 - 1}} \quad (2.16)$$

Por lo que

$$S_{12}(t) = S_{21}(t) = \frac{\sqrt{\frac{P(t)}{\varepsilon_t}}}{E(t)} = \frac{2 * [1 - t^2]^{\frac{N}{2}}}{\varepsilon_t A(t) + B(t) + C(t) + D(t)} \quad (2.17)$$

$$S_{11}(t) = S_{22}(t) = \frac{F(t)/\varepsilon_{Rt}}{E(t)} = \frac{A(t) + B(t) - C(t) - D(t)}{A(t) + B(t) + C(t) + D(t)}. \quad (2.18)$$

De esta manera para realizar el filtro con segmentos de líneas de transmisión se irán extrayendo las impedancias características de cada uno de estos segmentos. Dicho procedimiento consiste en obtener el valor de la primera impedancia característica (Z_1) a partir de A(t), B(t), C(t) y D(t). Este proceso se repite N veces hasta obtener las impedancias características.

$$Z_1 = \frac{A(t)}{C(t)} = \frac{B(t)}{D(t)} \quad \text{con } t = 1 \quad (2.19)$$

Recalculamos los polinomios obtenidos anteriormente con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} & \frac{\varepsilon_t}{[1 - t^2]^{\frac{N}{2}}} * \begin{bmatrix} A(t) & B(t) \\ C(t) & D(t) \end{bmatrix} = \\ & = \frac{\varepsilon_t}{[1 - t^2]^{\frac{N}{2}}} * \begin{bmatrix} Arem(t) + t * Z_1 * Crem(t) & Brem(t) + t * Z_1 * Drem(t) \\ Crem(t) + \frac{t * Arem(t)}{Z_1} & Drem(t) + \frac{t * Brem(t)}{Z_1} \end{bmatrix} \quad (2.20) \end{aligned}$$

$$\frac{\varepsilon_t}{[1 - t^2]^{\frac{N-1}{2}}} * \begin{bmatrix} Arem(t) & Brem(t) \\ Crem(t) & Drem(t) \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{\varepsilon_t}{[1-t^2]^{\frac{N+1}{2}}} * \begin{bmatrix} A(t) - t * Z_1 * C(t) & B(t) - t * Z_1 * D(t) \\ C(t) - \frac{t * A(t)}{Z_1} & D(t) - \frac{t * B(t)}{Z_1} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$Arem(t) = \frac{A(t) - t * Z_1 * C(t)}{1 - t^2} \quad (2.22)$$

$$Brem(t) = \frac{B(t) - t * Z_1 * D(t)}{1 - t^2} \quad (2.23)$$

$$Crem(t) = \frac{C(t) - \frac{t * A(t)}{Z_1}}{1 - t^2} \quad (2.24)$$

$$Drem(t) = \frac{D(t) - \frac{t * B(t)}{Z_1}}{1 - t^2} \quad (2.25)$$

Una vez obtenidas las impedancias características lo que hacemos es obtener la impedancia de carga mediante la siguiente ecuación:

$$Z_L = \frac{E'(t) + \frac{F(t)}{\varepsilon_{Rt}}}{E'(t) - \frac{F(t)}{\varepsilon_{Rt}}} \quad \text{con } t = 0 \quad Z_L = \frac{e_0 + f_0}{e_0 - f_0} \quad (2.26)$$

Finalmente, para realizar el filtro con inversores de impedancia y una misma impedancia característica se necesita introducir en primer lugar inversores de impedancia con una constante unidad. Debemos de tomar una constante de escalado diferente para cada inversor para conseguir que las impedancias sean igual a Z_0 . La Figura 2.1 representa este procedimiento.

$$K_{i,i+1} = \frac{1}{\sqrt{Z'_i * Z'_{i+1}}} \quad \text{con } i = 0,1,2, \dots \quad (2.27)$$

$$Z'_i \begin{cases} Z_i & \text{con } i \text{ impar} \\ \frac{1}{Z'_i} & \text{con } i \text{ par} \end{cases}$$

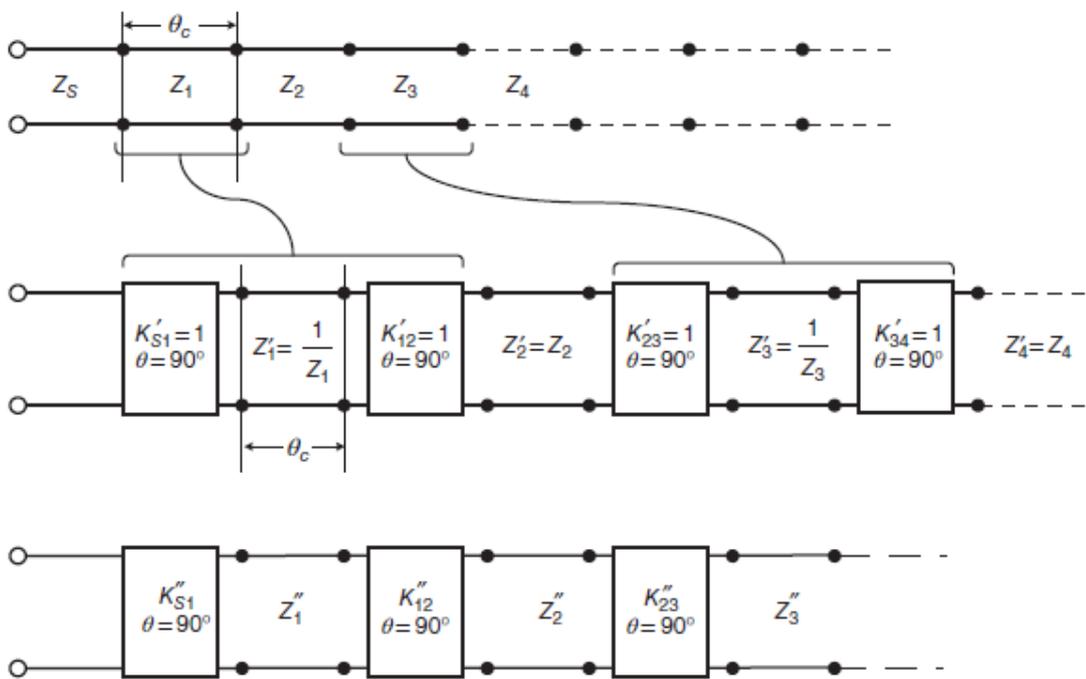


Figura 2.1 Introducción inversores de impedancia e impedancia escaladas [2].

2.2. Función de Zolotarev

Las funciones de Zolotarev son similares a los polinomios de Chebyshev de segundo orden. Sin embargo, las funciones de Zolotarev incluyen un parámetro adicional que permite que el pico más cercano al origen exceda el nivel preestablecido de rizado. La razón por la que la función de Zolotarev es útil en el diseño de filtros paso bajo se debe a que nos produce unos valores de elementos mejores con menos transiciones abruptas y unas mayores dimensiones de espacio interno que ayudan con el diseño de aplicaciones de alta potencia.

La función de Zolotarev solo con polos de grado par se genera mediante los ceros de la función de Chebyshev de primer tipo, del mismo grado y del nivel de pérdidas de retorno a través de la siguiente fórmula

$$s'_k = \pm \sqrt{s_k^2(1 - x_1^2) - x_1^2}, \quad (2.28)$$

donde s_k es la posición original de la singularidad del plano s complejo, s'_k es la posición transformada y x_1 es el punto de frecuencia en la banda en donde comienza el comportamiento de rizado. Cuando $x_1=0$, la función de Zolotarev de grado par pasa a ser una función de Chebyshev con solo polos (nos hemos ayudado del trabajo de Diego Correas, que se trata de un trabajo de fin de grado [6]). En la Figura 2.2 sacada de la fuente bibliográfica cameron [2], observamos la respuesta de tipo Zolotarev.

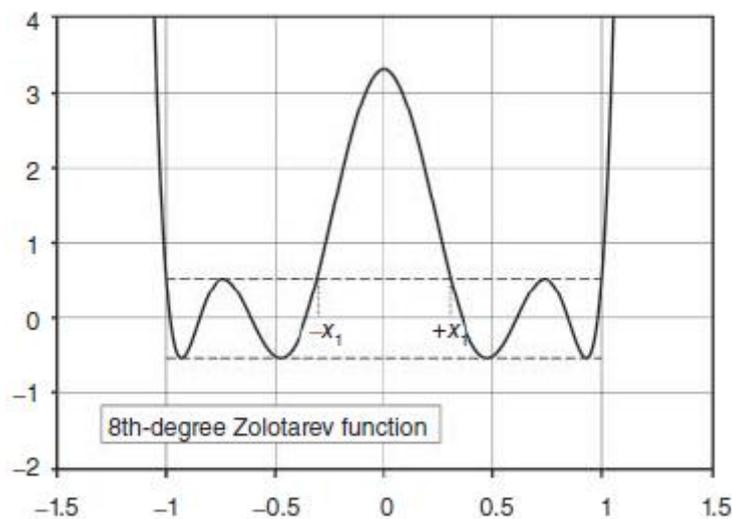


Figura 2.2 Respuesta tipo Zolotarev [2].

Capítulo 3. Realización de filtros paso bajo.

En el Capítulo 3, llamado realización de filtros paso bajo, lo que haremos en un primer punto será explicar los pasos a seguir para diseñar un filtro y los mostraremos mediante un ejemplo de filtro paso bajo de orden 4 sintetizado con la función de Chebyshev y la función de Zolotarev. Esto lo veremos en las secciones 3.2 y 3.3.

Tras realizar lo comentado anteriormente, lo que haremos será ejecutar las mismas simulaciones, pero variando el valor del parámetro de longitud eléctrica Θ_c , las pérdidas de retorno RI, anchura y espesor de los iris para ver su influencia en el diseño, según comprobaremos en las secciones 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.

Las simulaciones se han realizado mediante el programa de análisis electromagnético ANSYS HFSS. Por otro lado, los *scripts* se han programado en MATLAB para la automatización del diseño, ya que nos permite completar una síntesis de una manera más rápida y eficiente que si lo llevamos a cabo de forma manual. Para el desarrollo de estos apartados nos han servido de ayuda de las tesis doctorales de Antonio Romera [7], Pedro Vera [8] y Alejandro Pons [9].

3.1. Pasos a seguir para su diseño.

El proceso que se sigue en el apartado 3.1, es el que se llevara a cabo para analizar todos los filtros que se realicen.

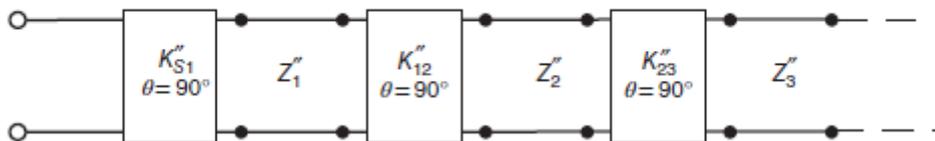


Figura 3.1 Prototipo filtro paso bajo [2].

Podemos ver en la Figura 3.1 la estructura de un filtro paso bajo, que se compone de inversores de impedancia y de tramos de línea de transmisión entre un inversor y otro. Cada sección será, en nuestro caso, caracterizada en guía de onda rectangular y está compuesta por dos secciones de guía y un iris con su determinada longitud.

En los *scripts* de MATLAB se ha trabajado con el parámetro de Scattering de transmisión S_{21} , por lo que para la implementación práctica de este diseño se han seguido los siguientes pasos:

1. Llevamos a cabo la realización de un diseño en el que implementamos la estructura de modelo de iris capacitivo en guía de onda rectangular.
2. Completamos un análisis paramétrico para encontrar W (altura de los iris) a la frecuencia de corte deseada para obtener el módulo de S_{21} necesario para el diseño.
3. Una vez obtenidas las alturas de los iris que dan el módulo de S_{21} , debemos realizar otro análisis paramétrico en función de la longitud, ya que queremos calcular las longitudes $l_{i/2}$ y así hallar la fase $\angle S_{21}$ en función de estas.
4. Para cada segmento, calculamos con la ecuación $\angle S_{21} = -90^\circ - \Theta$, le restamos Θ ya que la fase adicional que introduce el iris respecto a la ideal. Por tanto, una vez obtenido el valor de la fase $\angle S_{21}$, seleccionamos el valor con los datos obtenidos con anterioridad.

Como se ha comentado en la introducción del Capítulo 3, dichos *scripts* llevan a cabo estos pasos de forma automatizada, ejecutando el código y mostrando los resultados para realizar el diseño del filtro en ANSYS HFSS y su posterior simulación.

El objetivo es obtener la respuesta que se muestra en la Figura 3.2, en la que se representa la respuesta ideal del filtro prototipo de Chebyshev y la Figura 3.3 de Zolotarev. Es una respuesta ideal de un filtro prototipo, por lo que no se trata de una respuesta en frecuencia real. Buscamos que nuestras respuestas sean lo más parecidas al de la respuesta ideal, pero con los ordenadores en los que se han realizado las simulaciones no conseguiremos tanta exactitud y además los filtros que se van a diseñar no van a ser tan precisos como la respuesta ideal.

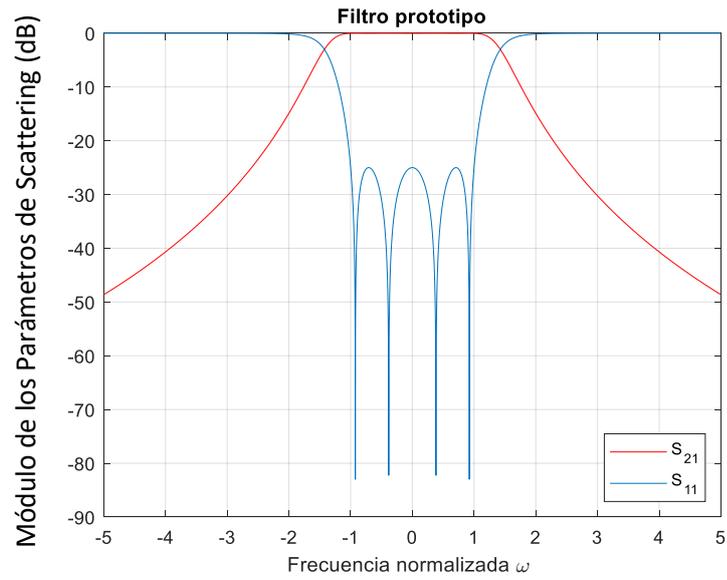


Figura 3. 2 Respuesta de un filtro paso bajo ideal Chebyshev orden 4.

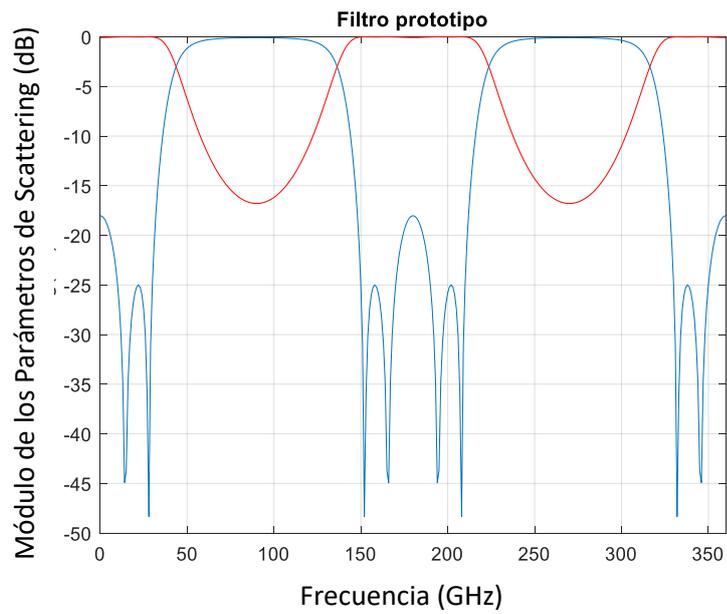


Figura 3.3 Respuesta de un filtro paso bajo ideal Zolotarev orden 4.

3.2. Filtro basado en ventanas rectangulares mediante la función de Chebyshev.

En este apartado llevamos a cabo un ejemplo basado en la implementación de un filtro paso bajo de orden 4 mediante la función de Chebyshev, en el que se mostrarán todos los pasos a seguir para obtener todos los parámetros necesarios para su realización. En la Tabla 3.1 mostramos las especificaciones.

Función	Chebyshev tipo I
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	25 dB
Θ_c	30°
Dimensiones de la guía	a = 47.54 mm, b = 22.14 mm
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz

Tabla 3.1 Especificaciones del filtro tipo Chebyshev

El primer paso que hemos seguido, ha sido obtener el valor de los inversores que constituyen el filtro. Por otro lado, también evaluamos los valores del parámetro S_{21} . Dichos valores han sido obtenidos mediante un *script* de MATLAB en el que hemos introducido las especificaciones del filtro, junto con los pasos a seguir mediante la función de Chebyshev. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.2.

K	$ S_{21} $ (dB)
0.7842	0.12702
0.5566	0.70607
0.4762	1.09911

Tabla 3.2 Valores de los inversores asociados al módulo de su S_{21}

Una vez que hemos ajustado el valor de cada inversor al módulo de su S_{21} correspondiente, lo que haremos será una simulación a la frecuencia de corte deseada mediante un análisis paramétrico en función de la variable W (altura del iris), para así obtener el valor de cada W_i correspondiente a cada inversor. La simulación se ha realizado siguiendo el modelo de iris capacitivo en guía de onda de la Figura 3.4.

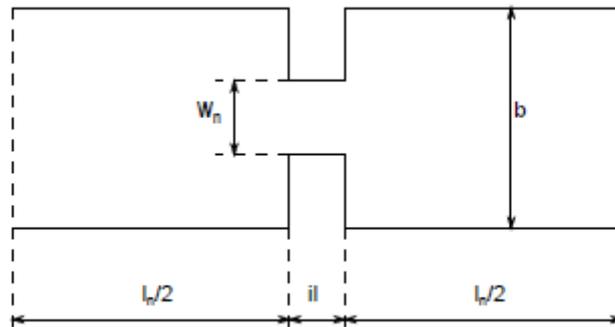


Figura 3.4. Modelo de iris capacitivo en guía de onda rectangular [7].

Los resultados los podemos ver en la Figura 3.5 y sus respectivos valores en la Tabla 3.3

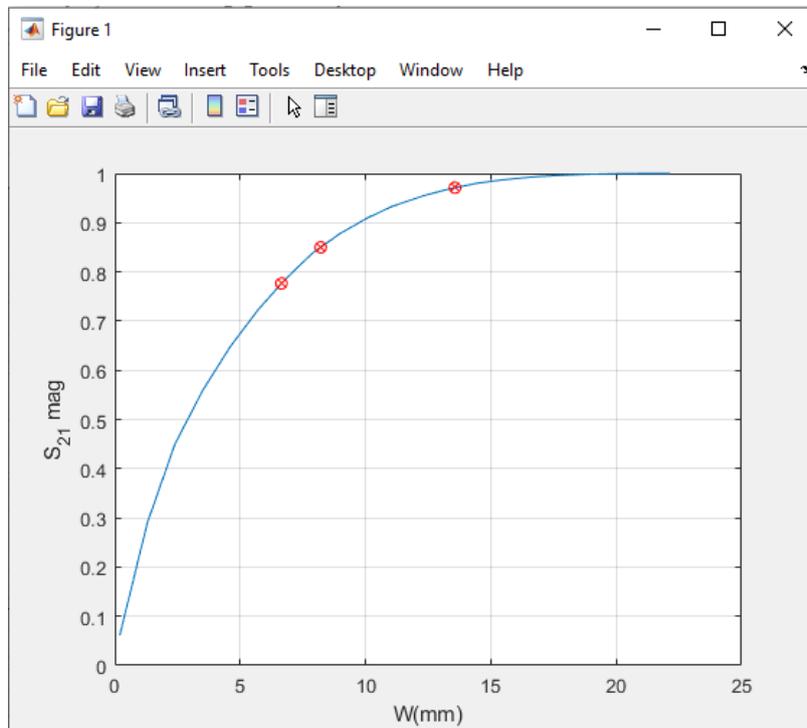


Figura 3.5 Resultado del análisis paramétrico de W .

En la Figura 3.5 se representa el módulo del parámetro S_{21} en función de la altura de los iris. Con los valores de los inversores de impedancia obtenemos el valor del módulo de S_{21} , para la frecuencia de corte del filtro en cada uno de los inversores de impedancia. Dichos valores de S_{21} son los que insertamos en la Figura 3.5 y dan lugar a los valores de la alturas de los iris para cada inversor de impedancia recopilada en la Tabla 3.3.

W_1	13.5509	W_4	8.2724
W_2	8.2724	W_5	13.5509
W_3	6.6288		

Tabla 3.3. Alturas de los iris (mm).

Una vez que hemos obtenido las alturas de cada inversor, podemos obtener las longitudes mediante un análisis paramétrico por cada altura, obteniendo el valor de $l_i/2$ mediante la siguiente ecuación $\angle S_{21} = -90^\circ - \Theta_c = -90^\circ - 30^\circ = -120^\circ$. El valor de Θ_c es sacado de las especificaciones, por lo que el resultado de la simulación es el obtenido en la Figura 3.6.

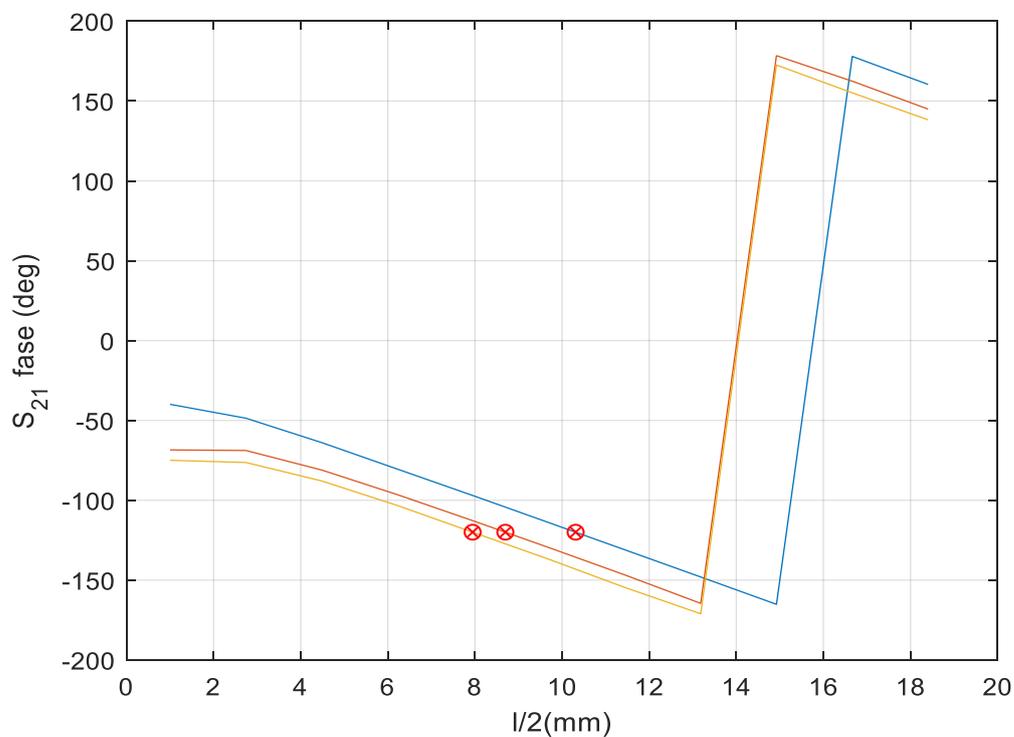


Figura 3.6 Resultado del análisis paramétrico de $l/2$

Este diseño tiene un valor de $\Theta_c = 30^\circ$, por lo que el desfase introducido por cada sección en la que se divide el circuito es de 120° . Por lo que, representamos la fase del parámetro S_{21} para cada una de las alturas, en función de la longitud de la estructura y en el que el valor de la fase es de -120° y es de signo negativo debido a que se trata de un inversor capacitivo. Por tanto, introduce una fase negativa y el resultado es el que mostramos en la Figura 3.6.

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados del análisis paramétrico.

$l_1/2$	10.3116	$l_4/2$	8.6983
$l_2/2$	8.6983	$l_5/2$	10.3116
$l_3/2$	7.9463		

Tabla 3.4 Longitudes teniendo en cuenta el desfase que añade el iris respecto al inversor ideal (mm).

Por lo que tras todas estas simulaciones ya tenemos todos parámetros (alturas de los iris y longitudes) para poder implementar el filtro y realizar la simulación, la estructura del filtro se muestra en la Figura 3.7.

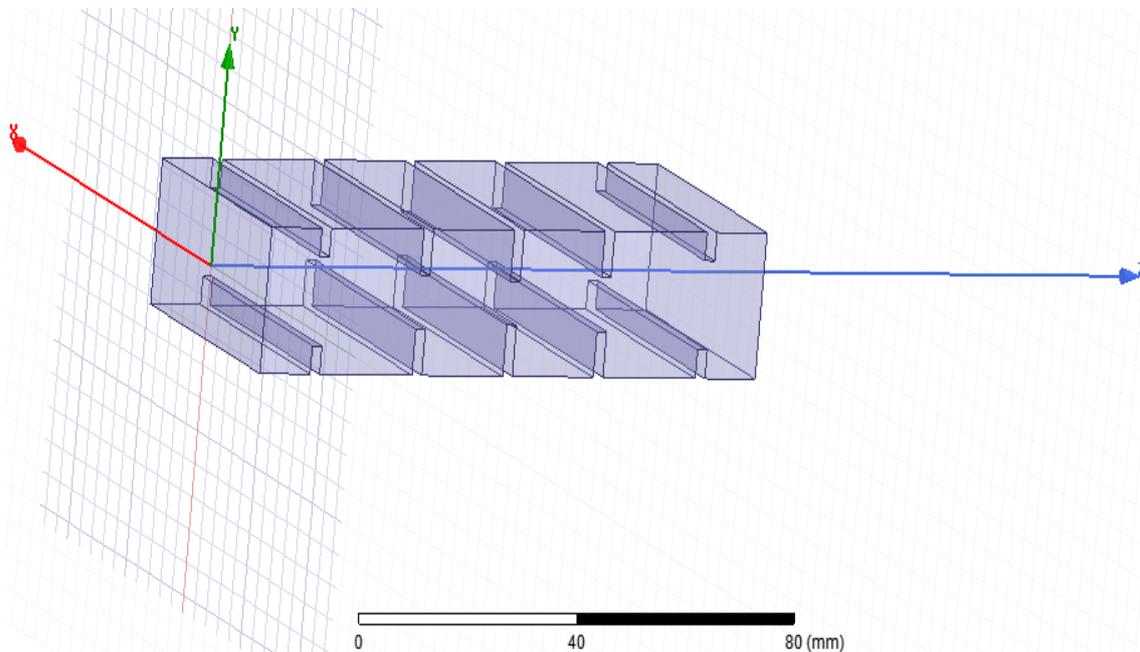


Figura 3.7 Filtro pasabajo de orden 4 tipo Chebyshev.

En la Tabla 3.5 mostramos las dimensiones que se han utilizado para implementar el filtro.

Parámetro	Valor(mm)
a	47.5488
b	22.1488
il	2
l_1	10.3116
W_1	13.5509
l_2	8.6983
W_2	8.2724
l_3	7.9463
W_3	6.6288
l_4	8.6983
W_4	8.2724
l_5	10.3116
W_5	13.5509

Tabla 3.5 Dimensiones filtro Chebyshev representado en la Figura 3.7.

Por lo tanto, tras realizar una simulación en ANSYS HFSS hemos obtenido la respuesta que se muestra en la Figura 3.8.

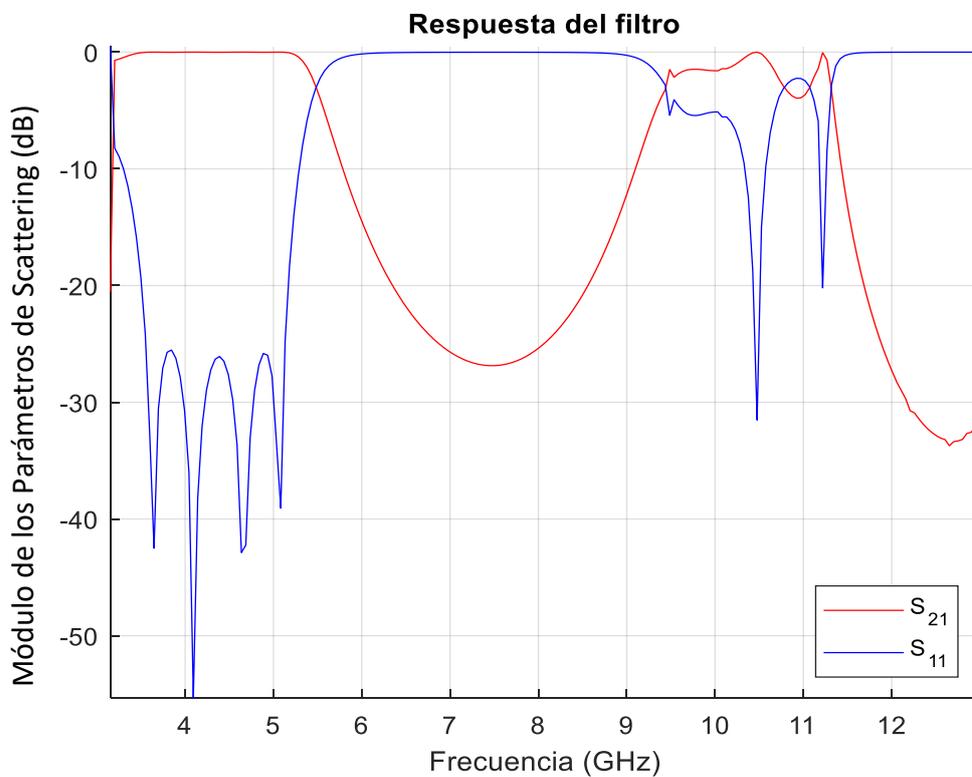


Figura 3.8 Respuesta filtro Chebyshev orden 4 representado en la Figura 3.7.

Esta simulación está realizada desde su frecuencia de corte hasta unos 12 GHz, ya que queremos observar a qué frecuencia aparece la banda espuria. En este caso se encuentra a partir de los 10 GHz, estando relacionada con el parámetro Θ_c , cuya influencia será explicada más adelante. Como podemos observar la frecuencia de corte de la guía coincide con la frecuencia de corte inferior del filtro, ya que solo permite la transmisión de señales a frecuencias a partir del corte de la guía rectangular.

3.3. Filtro basado en ventanas rectangulares mediante la función de Zolotarev.

En esta sección seguiremos los mismos pasos que en la sección 3.2, pero en este caso será un filtro de orden 4 mediante la función de Zolotarev. En la Tabla 3.6 se muestran las especificaciones del filtro.

Función	Zolotarev
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	25 dB
Θ_c	30°
Dimensiones de la guía	a = 47.54 mm, b = 22.14 mm
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz

Tabla 3.6 Especificaciones del filtro función de Zolotarev.

El primer paso que hemos concluido, ha sido obtener el valor de los inversores que componen el filtro, así como los valores del módulo del parámetro S_{21} . Dichos valores han sido obtenidos mediante un *script* de MATLAB en el que hemos introducido las especificaciones del filtro junto con los pasos que debemos seguir mediante la función de Zolotarev. Estos datos se muestran en la Tabla 3.7.

K	$ S_{21} $ (dB)
0.6001	1.0866
0.4979	1.9597
0.3307	4.4928

Tabla 3.7 Valores de los inversores asociados al módulo del parámetro de transmisión para un filtro de tipo Zolotarev.

Una vez que hemos ajustado el valor de cada inversor con el módulo de su S_{21} correspondiente, lo que haremos será una simulación a la frecuencia de corte deseada mediante un análisis paramétrico en función de la variable W(altura del iris) para

obtener el valor de cada W_i correspondiente a cada inversor. La simulación se ha realizado siguiendo el modelo de iris capacitivo en la guía de onda rectangular.

Los resultados lo podemos ver en la Figura 3.9 y sus respectivos valores en la Tabla 3.8.

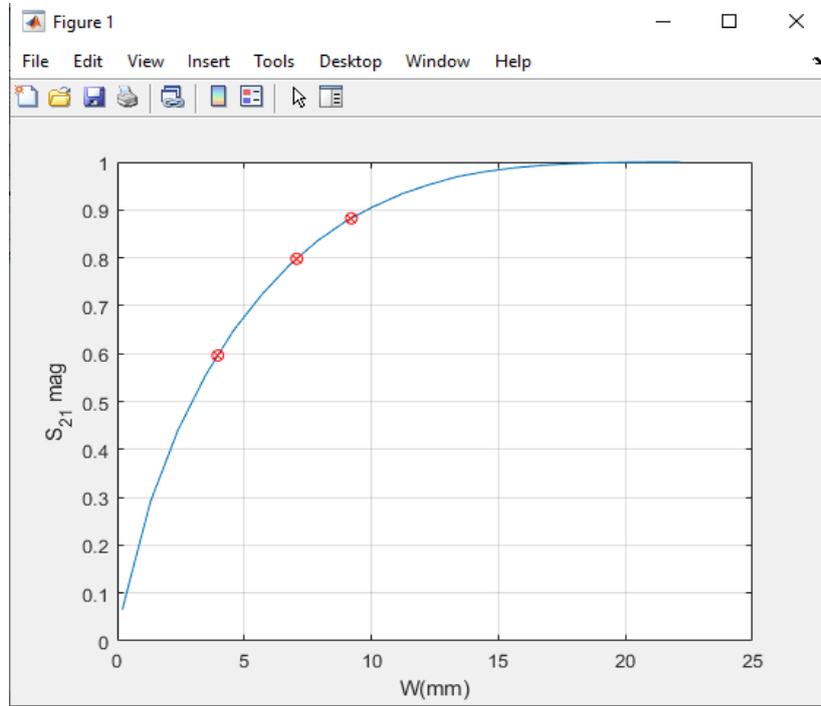


Figura 3.9. Resultado del análisis paramétrico de W .

En la Figura 3.9 se representa el módulo del parámetro S_{21} en función de la altura de los iris. Dichos valores de S_{21} son los que insertamos en la Figura 3.9 y dan lugar a los valores de la alturas de los iris para cada inversor de impedancia.

W_1	9.2094	W_4	7.0632
W_2	7.0632	W_5	9.2094
W_3	3.9598		

Tabla 3.8 Alturas de los iris (mm) filtro Zolotarev.

Una vez que hemos obtenido el valor de las alturas de los iris que dan el módulo de S_{21} llevamos a cabo un segundo análisis paramétrico para obtener el valor de las longitudes.

El resultado de la simulación es el obtenido en la Figura 3.10.

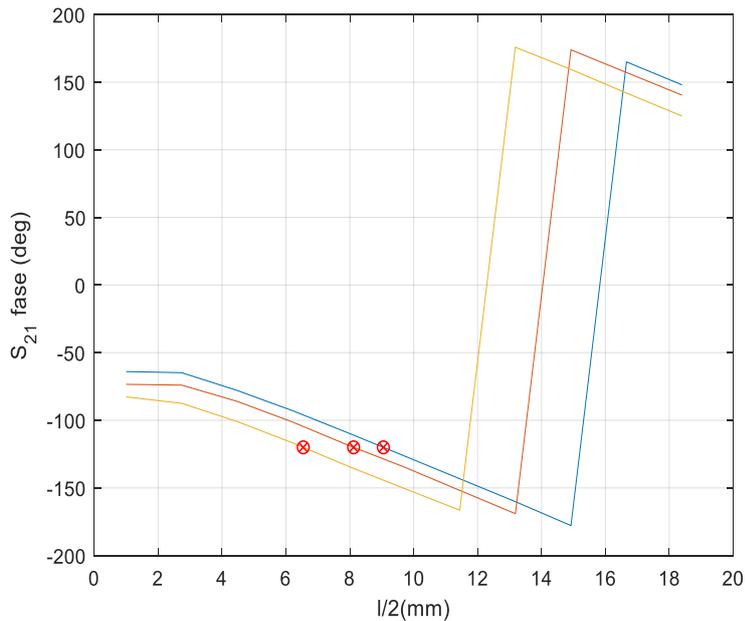


Figura 3.10. Resultado del análisis paramétrico de $l/2$.

En la Figura 3.10 representamos la fase del parámetro S_{21} para cada una de las alturas, en función de la longitud de la estructura y en el que el valor de la fase es de -120° y es de signo negativo debido a que se trata de un inversor capacitivo, por tanto introduce una fase negativa.

En la Tabla 3.9 se muestran los resultados del análisis paramétrico.

$l_1/2$	9.0499	$l_4/2$	8.1186
$l_2/2$	8.1186	$l_5/2$	9.0499
$l_3/2$	6.5424		

Tabla 3.9 Longitudes (mm) para un filtro de tipo Zolotarev.

Por lo que, tras todas estas simulaciones, ya tenemos todos los parámetros (alturas de los iris y longitudes) para poder implementar el filtro y realizar la simulación.

La estructura del filtro se muestra en la siguiente Figura 3.11.

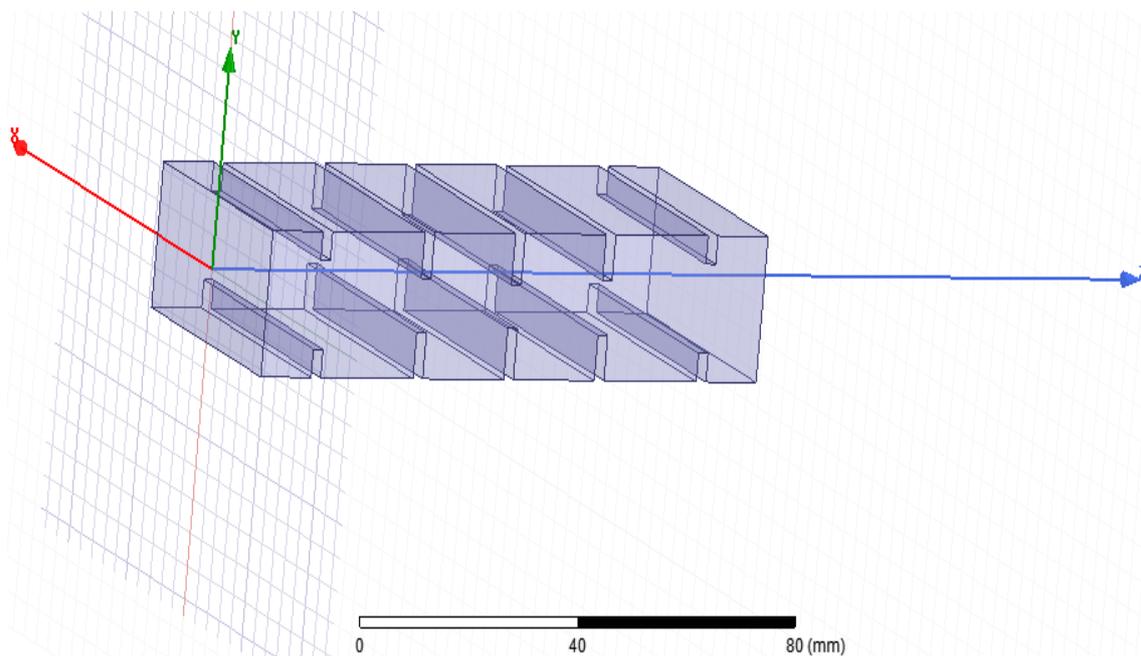


Figura 3.11 Filtro paso bajo de orden 4 tipo Zolotarev.

En la Tabla 3.10 mostramos las dimensiones que se han utilizado para implementar el filtro.

Parámetro	Valor(mm)
a	47.5488
b	22.1488
il	2
l_1	9.0499
W_1	9.2094
l_2	8.1186
W_2	7.0632
l_3	6.5424
W_3	3.9598
l_4	8.1186
W_4	7.0632
l_5	9.0499
W_5	9.2094

Tabla 3.10 Dimensiones filtro Zolotarev representado en la Figura 3.11.

Por lo tanto, tras realizar una simulación en ANSYS HFSS hemos obtenido la respuesta que se muestra en la Figura 3.12.

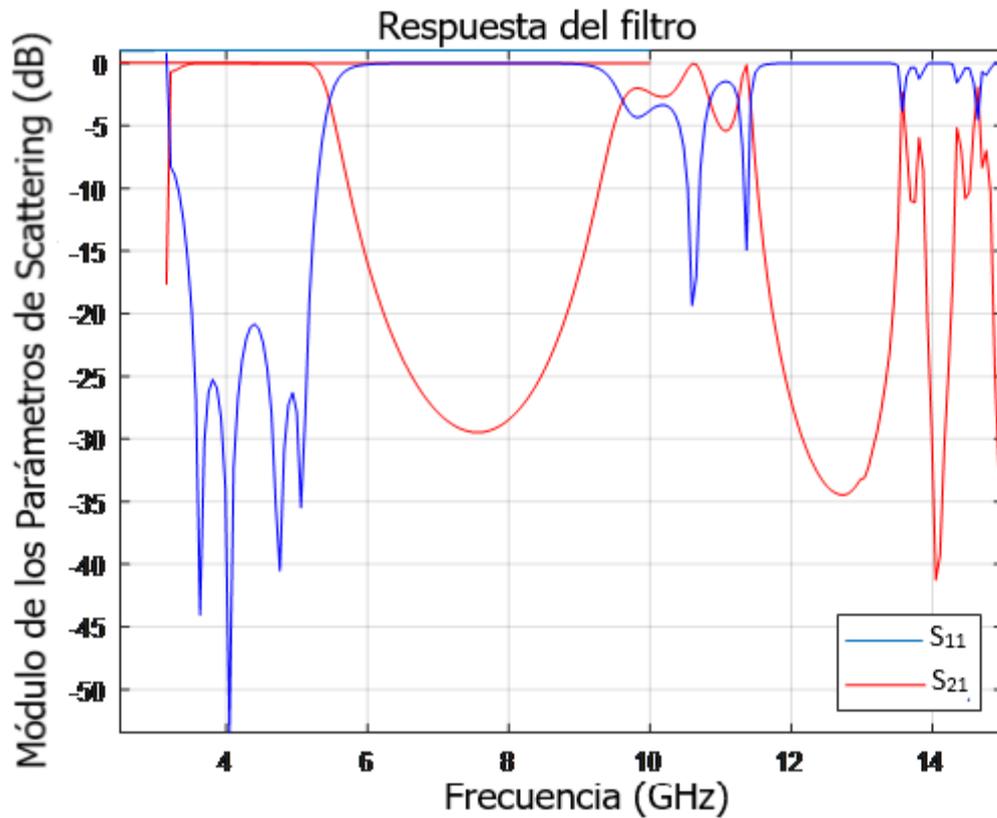


Figura 3.12 Respuesta filtro Zolotarev de orden 4 representada en la Figura 3.11.

En esta gráfica podemos observar el lóbulo más alto en el centro de la banda de paso. El ancho de banda de este lóbulo está controlado por el parámetro x_1 (si $x_1=0$ obtenemos una respuesta de Chebyshev como hemos comentado anteriormente). También podemos observar cómo al aumentar el valor de x_1 , el rechazo mejora, con la desventaja de que perdemos ancho de banda utilizable.

3.4. Influencia del parámetro Θ_c .

Este parámetro afecta directamente a la posición de la banda de espurios, estando en frecuencias más alejadas para un valor de Θ_c menor y en frecuencias menores para un valor de Θ_c mayor. Por tanto, en este apartado realizaremos varias simulaciones variando dicho parámetro para ver el comportamiento del filtro tanto para la función de Chebyshev como Zolotarev.

3.4.1. Variación parámetro Θ_c mediante la función de Chebyshev.

En la Tabla 3.11 mostramos las especificaciones del filtro.

Función	Chebyshev tipo I
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	25 dB
Θ_c	35°,30°,27°
Dimensiones de la guía	a = 47.54 mm, b = 22.14 mm
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz

Tabla 3.11 Especificaciones del filtro tipo Chebyshev con variación de Θ_c .

En este apartado realizaremos varias simulaciones en las que usaremos los valores de $\Theta_c=35^\circ$, $\Theta_c=30^\circ$, $\Theta_c=27^\circ$ para comprobar el efecto de la banda de espurios como hemos explicado en la sección 3.4. En las siguientes tablas mostramos los valores de cada inversor (Tabla 3.12), la altura de los iris (Tabla 3.13) y sus longitudes (Tabla 3.14).

	$\Theta_c = 35^\circ$	$\Theta_c = 30^\circ$	$\Theta_c = 27^\circ$
$K_{1,5}$	0.8312	0.7842	0.7518
$K_{2,4}$	0.6516	0.5566	0.4994
K_3	0.5808	0.4762	0.4170

Tabla 3.12 Valores de los inversores de impedancia para los distintos Θ_c para un filtro de Chebyshev.

	$\Theta_c = 35^\circ$	$\Theta_c = 30^\circ$	$\Theta_c = 27^\circ$
$W_{1,5}$	14.9274	13.5509	12.7926
$W_{2,4}$	10.4118	8.2724	7.0931
W_3	8.7806	6.6288	5.4996

Tabla 3.13 Valores de las alturas de los iris (mm) para los distintos Θ_c para un filtro de Chebyshev.

	$\Theta_c = 35^\circ$	$\Theta_c = 30^\circ$	$\Theta_c = 27^\circ$
$l_{1,5/2}$	11.0703	10.3116	9.8281
$l_{2,4/2}$	9.9701	8.6983	7.8173
$l_{3/2}$	9.4097	7.9463	7.0849

Tabla 3.14 Valores longitud (mm) para los distintos Θ_c para un filtro de Chebyshev.

En las siguientes gráficas mostramos la respuesta del filtro a los diferentes Θ_c .

$\Theta_c = 35^\circ$

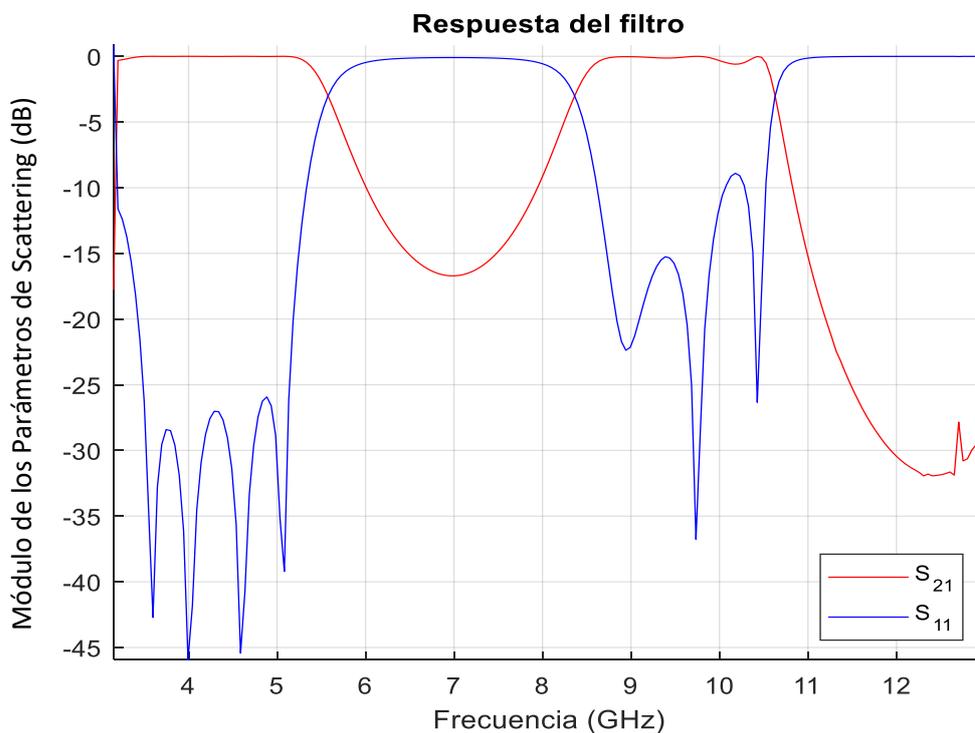


Figura 3.13. Respuesta filtro Chebyshev con $\Theta_c = 35^\circ$.

Observamos en la Figura 3.13 como para $\Theta_c = 35^\circ$ la banda de espurios aparece en torno a los 9 GHz.

$$\Theta_c = 30^\circ$$

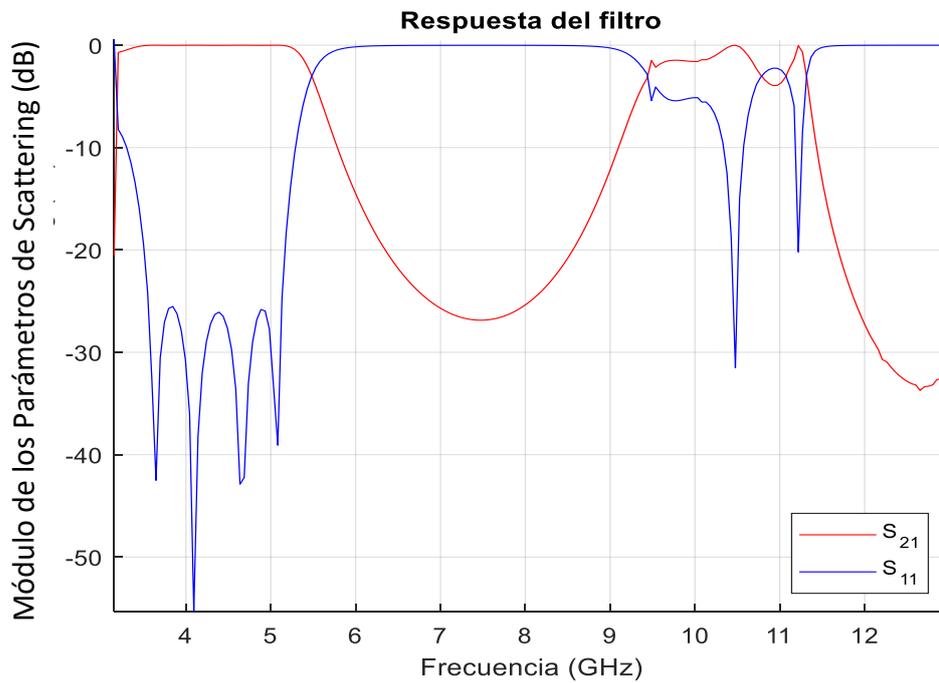


Figura 3.14. Respuesta filtro Chebyshev con $\Theta_c = 30^\circ$.

Quando disminuimos el valor de $\Theta_c = 30^\circ$, que se corresponde con la Figura 3.14, la banda de espurios como podemos ver se encuentra sobre los 10 GHz.

$$\Theta_c = 27^\circ$$

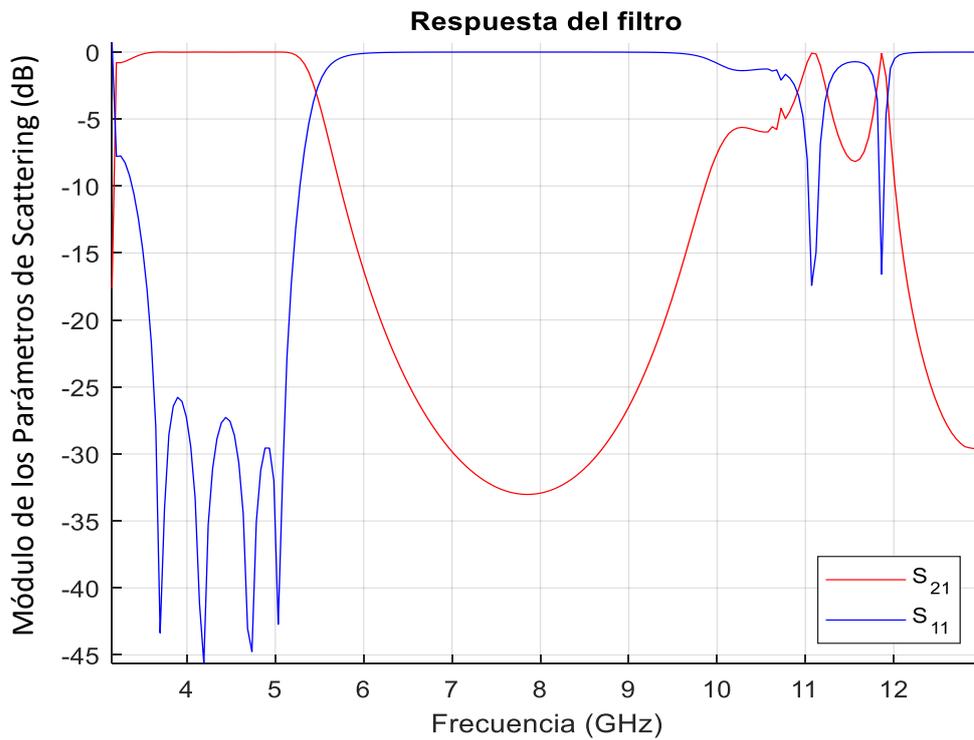


Figura 3.15. Respuesta filtro Chebyshev con $\Theta_c = 27^\circ$.

En la Figura 3.15 podemos ver como para un valor de $\Theta_c = 27^\circ$ obtenemos que la banda de espurios aparece a los 11GHz.

Podemos observar entre las tres gráficas como para un valor de Θ_c grande la banda de espurios aparece a frecuencias más bajas, mientras que si tenemos un valor de Θ más pequeño la posición de la banda de espurios aparece a frecuencias más altas. Por este motivo, lo que nos interesa que este valor sea pequeño para que la posición de la banda espuria como hemos dicho anteriormente esté lo más alejada posible. Aunque el valor de Θ_c más pequeño conlleva que los inversores se encuentren situados más cercanos entre sí y que la respuesta de estos filtros se aleje de la respuesta ideal por los efectos de acoplamiento de orden superior entre los distintos inversores próximos.

3.4.2. Variación parámetro Θ_c mediante la función de Zolotarev.

Función	Zolotarev
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	25 dB
Θ_c	35°, 30°, 27°
Dimensiones de la guía	a = 47.54 mm, b = 22.14 mm
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz

Tabla 3.15 Especificaciones del filtro función de Zolotarev con variación de Θ_c .

En la Sección 3.4.2 llevaremos a cabo los mismos pasos que en el filtro de Chebyshev, pero en este caso será con un filtro de Zolotarev para ver también el comportamiento de la banda de espurios en función de los distintos valores de Θ_c . En la Tabla 3.16 mostramos los valores de los inversores de impedancia, en la Tabla 3.17 los valores de las alturas de los iris y en la Tabla 3.18 los valores de las longitudes.

	$\Theta_c = 35^\circ$	$\Theta_c = 30^\circ$	$\Theta_c = 27^\circ$
$K_{1,5}$	0.7108	0.6001	0.5068
$K_{2,4}$	0.5972	0.4979	0.4464
K_3	0.4597	0.3307	0.2453

Tabla 3.16 Valores de los inversores de impedancia para los distintos Θ_c para un filtro de Zolotarev.

	$\Theta_c = 35^\circ$	$\Theta_c = 30^\circ$	$\Theta_c = 27^\circ$
$W_{1,5}$	11.8	9.2094	7.2473
$W_{2,4}$	9.1374	7.0632	6.0655
W_3	6.3222	3.9598	2.6013

Tabla 3.17 Valores de las alturas de los iris (mm) para los distintos Θ_c para un filtro de Zolotarev.

	$\Theta_c = 35^\circ$	$\Theta_c = 30^\circ$	$\Theta_c = 27^\circ$
$l_{1,5/2}$	10.3473	9.0499	7.8954
$l_{2,4/2}$	9.54	8.1186	7.3954
$l_{3/2}$	8.3255	6.5424	11.7344

Tabla 3.18 Valores de las longitudes (mm) para los distintos Θ_c para un filtro de Zolotarev.

En las siguientes gráficas mostramos la respuesta del filtro a los diferentes Θ_c .

$\Theta_c = 35^\circ$

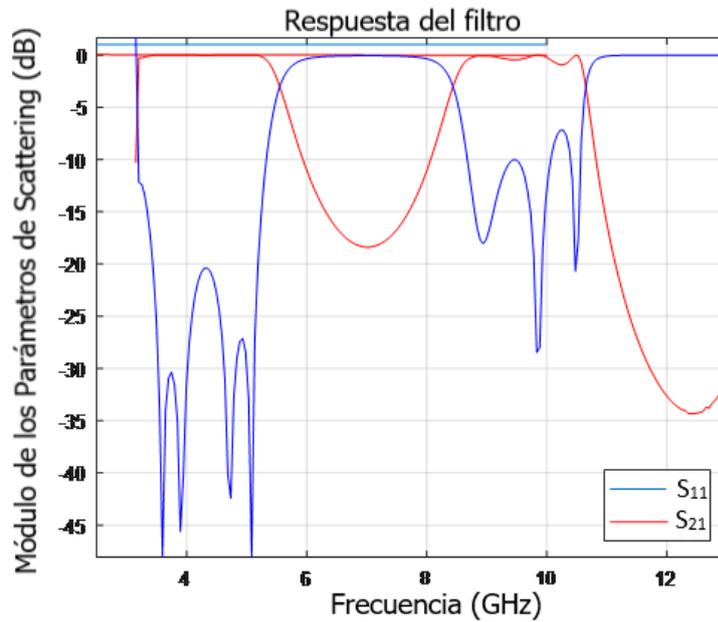


Figura 3.16. Respuesta del filtro Zolotarev con $\Theta_c = 35^\circ$.

Observamos como en la Figura 3.16, para un valor de $\Theta_c = 35^\circ$ la banda de espurios se encuentra sobre los 9 GHz.

$\Theta_c = 30^\circ$

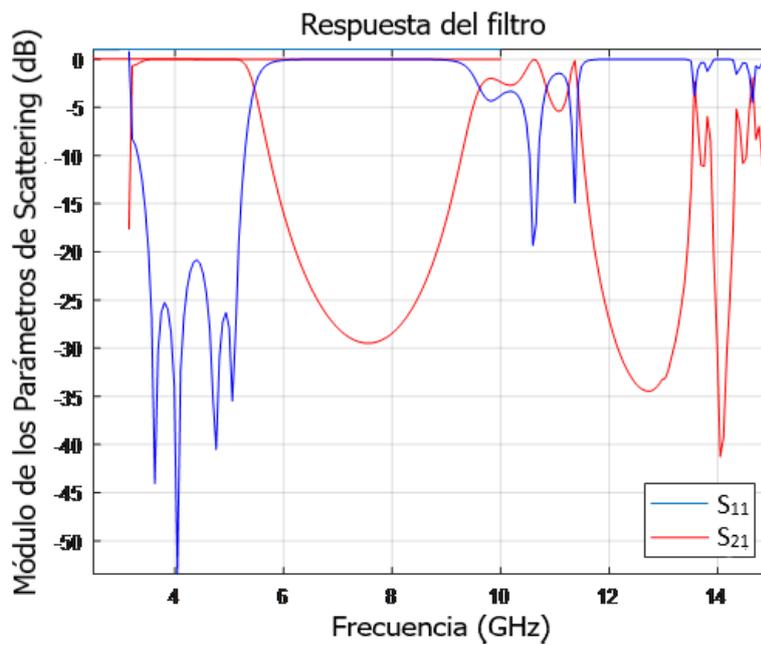


Figura 3.17. Respuesta del filtro Zolotarev con $\Theta_c = 30^\circ$.

Como podemos ver en la Figura 3.17 para un valor de $\Theta_c = 30^\circ$, la banda de espurios aparece en torno a los 10 GHz.

$$\Theta_c = 27^\circ$$

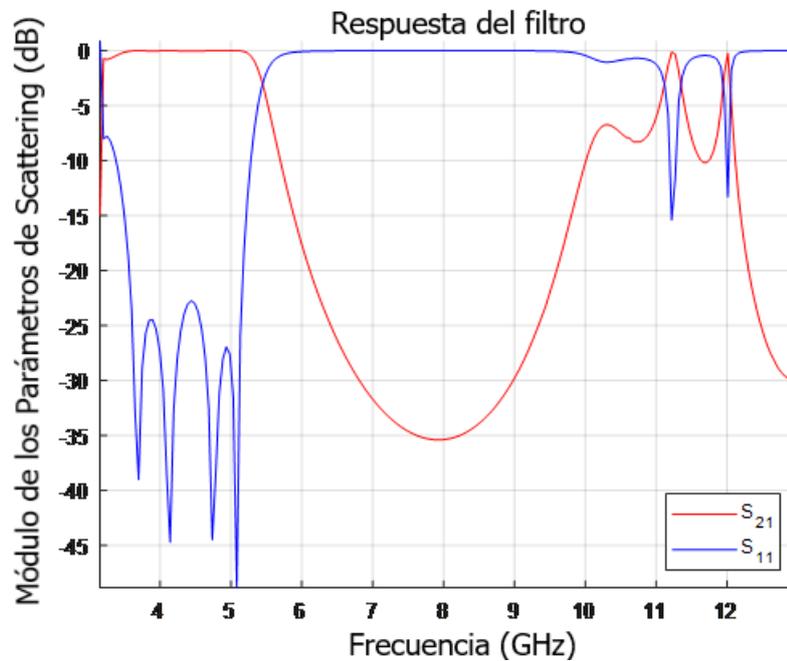


Figura 3.18. Respuesta del filtro Zolotarev con $\Theta_c = 27^\circ$.

En la Figura 3.18 observamos que para un valor de $\Theta_c = 27^\circ$ la banda de espurios se encuentra sobre los 11 GHz.

Podemos ver que tanto para Chebyshev como Zolotarev cuanto más pequeño es el valor de Θ_c menores son los valores de los inversores y por tanto, esto conlleva a una reducción en la altura de los iris. Esto puede ser un problema en aplicaciones de comunicaciones espaciales que requieran mucha potencia, debido a fenómenos no lineales de ruptura como Multipactor. Además, también se ven reducidas las longitudes $l/2$ por lo que implica que el filtro es más compacto, siendo necesario optimizar el resultado original del proceso de síntesis al alejarse de la respuesta ideal.

3.5. Variación anchura del iris filtro Chebyshev

Función	Chebyshev tipo I
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	25 dB
Θ_c	30°
Dimensiones de la guía	a = 47.5488 mm, b = 22.1488 mm
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz
Anchura	40,35,30 mm

Tabla 3.19 Especificaciones del filtro de tipo de Chebyshev con variación de anchura.

En la Sección 3.5 lo que haremos será variar la anchura del iris para observar el efecto que produce con la frecuencia de corte inferior. Debemos modificar el *script* de MATLAB al que le añadiremos una nueva variable de anchura. Por lo tanto, ahora tendremos una variable que será la anchura del filtro y otra variable que será la anchura del iris, la cual será menor a la anchura del filtro. Se han realizado simulaciones para una anchura de iris de 40mm, 35mm y 30mm. En la Tabla 3.19 se muestran las especificaciones del filtro.

	40mm	35mm	30mm
$W_{1,5}$	11.0959	7.7662	10.1417
$W_{2,4}$	6.5324	4.1257	0.9118
W_3	5.1027	3.1151	0.6803

Tabla 3.20 Valores alturas de los iris (mm) de las distintas anchuras para un filtro de Chebyshev.

	40mm	35mm	30mm
$l_{1,5/2}$	10.3987	10.5414	13.2719
$l_{2,4/2}$	8.7489	8.8487	10.3987
$l_{3/2}$	7.9942	8.0467	9.7695

Tabla 3.21 Valores longitud (mm) de las distintas anchuras para un filtro de Chebyshev.

La estructura del filtro que se ha realizado en este apartado se muestra en la siguiente Figura 3.19, que ha sido obtenida con los datos que se muestran en la Tabla 3.20 y Tabla 3.21.

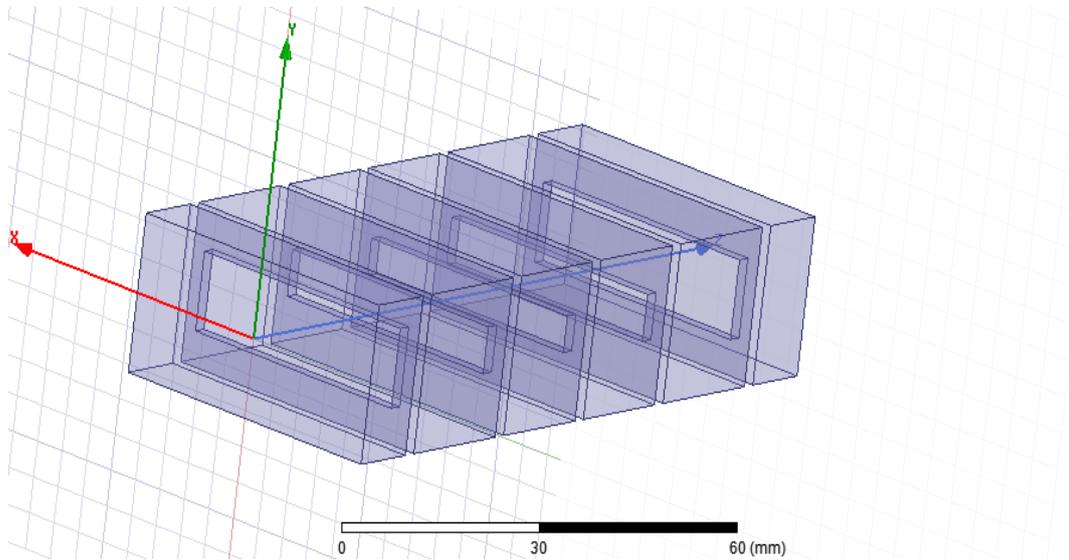


Figura 3.19 Filtro paso bajo orden 4 con reducción de anchura de los iris.

En las siguientes figuras mostramos las simulaciones:

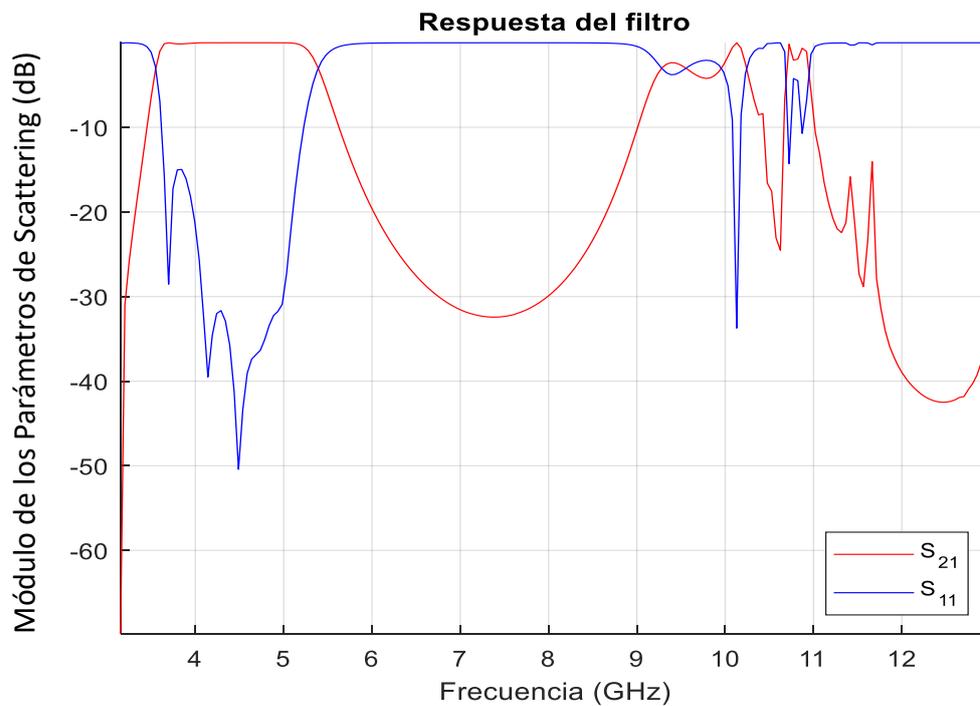


Figura 3.20 Respuesta del filtro de tipo Chebyshev con anchura de los iris de 40mm

En la Figura 3.20 vemos que la frecuencia de corte de la guía se sitúa sobre los 3.5 GHz que la frecuencia de corte inferior del filtro se sitúa sobre los 5.5 GHz.

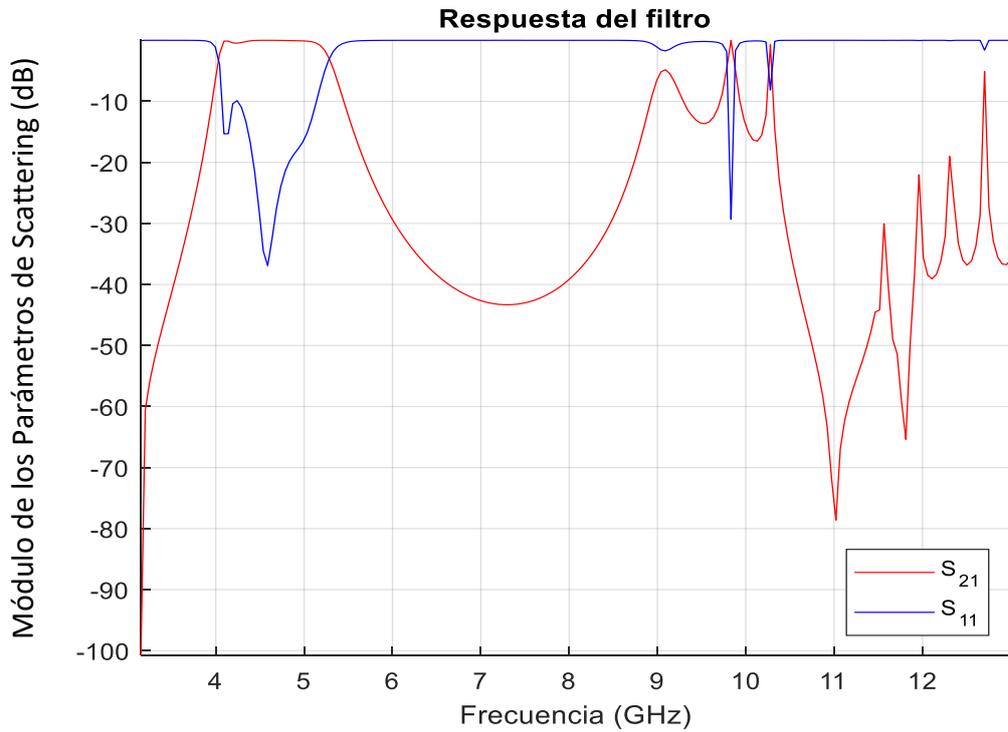


Figura 3.21 Respuesta del filtro de tipo Chebyshev con anchura de los iris de 35mm

En la Figura 3.21 observamos como la frecuencia de corte inferior del filtro se sitúa sobre los 5.15 GHz aproximadamente.

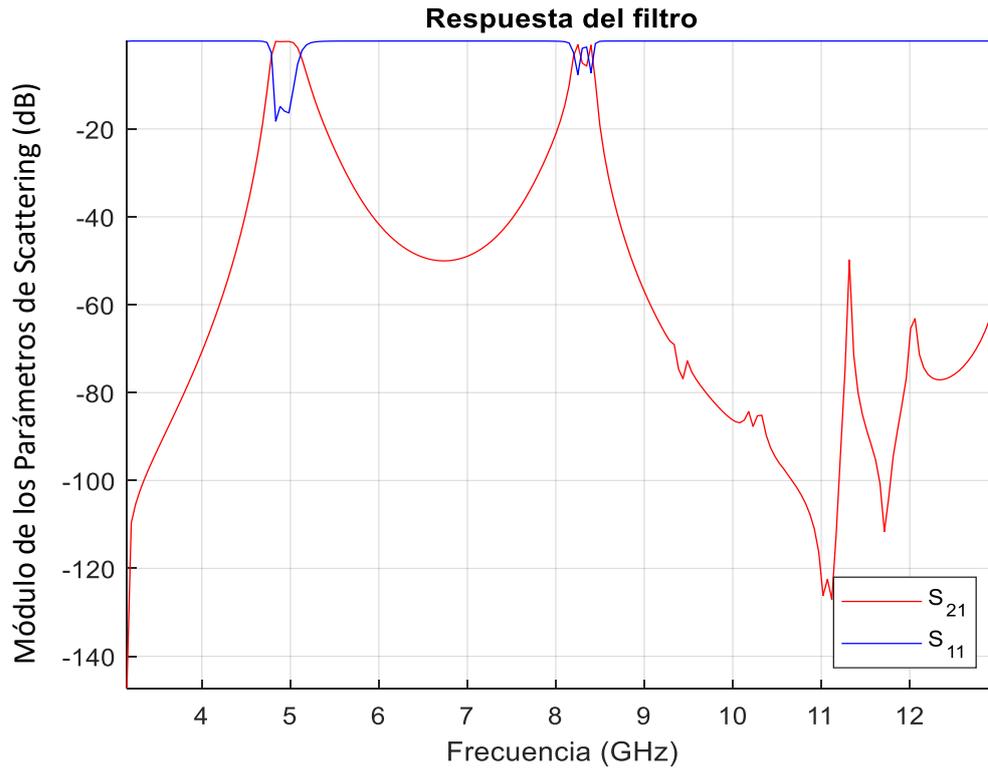


Figura 3.22 Respuesta del filtro de tipo Chebyshev con anchura de los iris de 30mm

En la Figura 3.22 vemos tras la simulación que la frecuencia de corte de la guía está sobre los 4.8 GHz y la frecuencia de corte inferior del filtro sobre los 5.15 GHz.

3.6. Variación anchura del iris filtro Zolotarev

Las especificaciones del filtro se muestran en la Tabla 3.22.

Función	Zolotarev
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	25 dB
Θ_c	30°
Dimensiones de la guía	$a = 47.54 \text{ mm}$, $b = 22.14 \text{ mm}$
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz
Anchura	40,35,30 mm

Tabla 3.22 Especificaciones del filtro función de Zolotarev con variación de anchura.

En este apartado realizaremos las mismas comprobaciones que en la sección 3.5, pero ahora usaremos la función de Zolotarev. En la Tabla 3.23 y Tabla 3.24 detallamos las dimensiones del filtro.

	40mm	35mm	30mm
$W_{1,5}$	5.604	7.1336	12.0405
$W_{2,4}$	4.5742	3.8313	0.8577
W_3	1.8653	2.81	0.5872

Tabla 3.23 Valores de las alturas de los iris (mm) de las distintas anchuras para un filtro de Zolotarev.

	40mm	35mm	30mm
$l_{1,5/2}$	7.9431	10.292	13.4435
$l_{2,4/2}$	7.3412	8.705	10.2593
$l_{3/2}$	5.4515	7.9641	9.67

Tabla 3.24 Valores de las longitudes (mm) de las distintas anchuras para un filtro de Zolotarev.

Respuestas obtenidas:

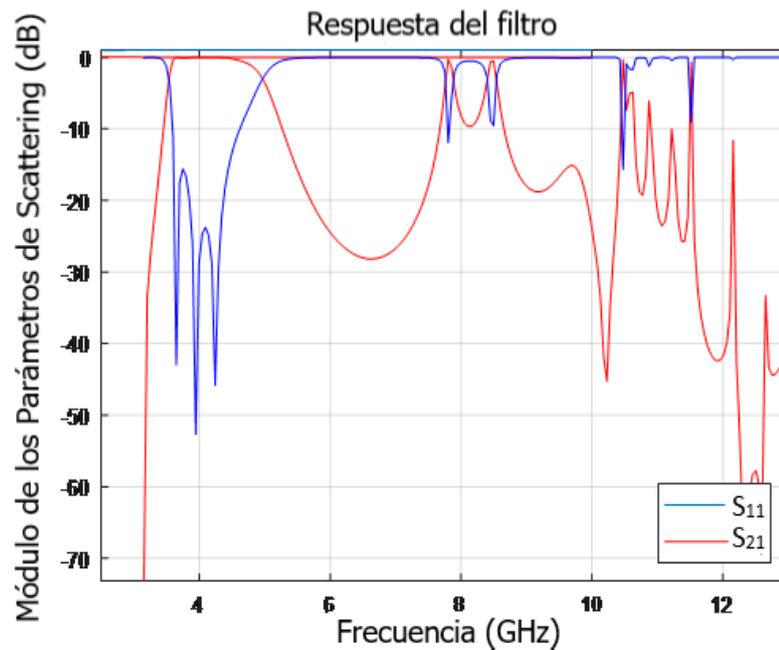


Figura 3.23 Respuesta del filtro Zolotarev con anchura de los iris de 40mm

En la Figura 3.23 observamos que la frecuencia de corte de la guía se encuentra sobre los 3.8 GHz aproximadamente y que la frecuencia de corte inferior del filtro aparece sobre los 5 GHz aproximadamente.

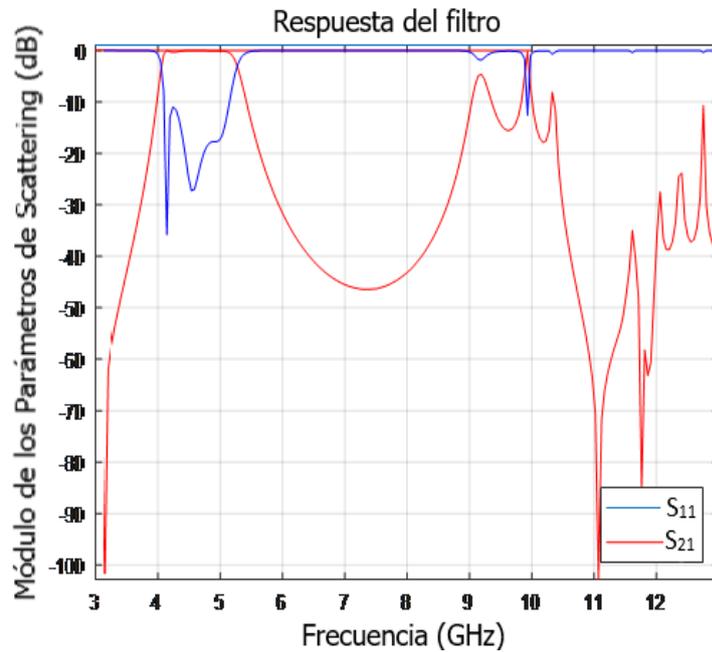


Figura 3.24 Respuesta del filtro Zolotarev con anchura de los iris de 35mm

En la Figura 3.24 vemos que la frecuencia de corte de la guía está sobre los 4 GHz y que la frecuencia de corte inferior del filtro está sobre los 5.15 GHz.

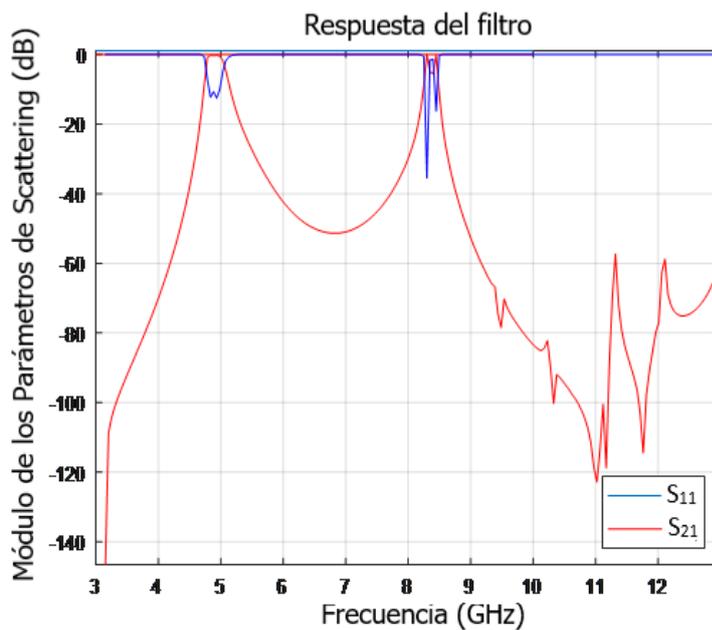


Figura 3.25 Respuesta del filtro Zolotarev con anchura de los iris de 30mm.

En la Figura 3.25 vemos que la frecuencia de corte de la guía se encuentra sobre los 4.8 GHz y la frecuencia de corte del filtro aparece sobre los 5.15 GHz.

3.7. Influencia de las pérdidas de retorno (R_L)

Con este parámetro se controla el nivel de rizado en la banda de paso. Por lo tanto, para valores mayores este parámetro de rizado será menor en la banda de paso, pero en la banda eliminada su respuesta será peor. Realizaremos simulaciones variando este parámetro tanto para un filtro de Chebyshev como un filtro de Zolotarev. En la Figura 3.26 se muestra la geometría del filtro que se llevará a cabo en esta sección.

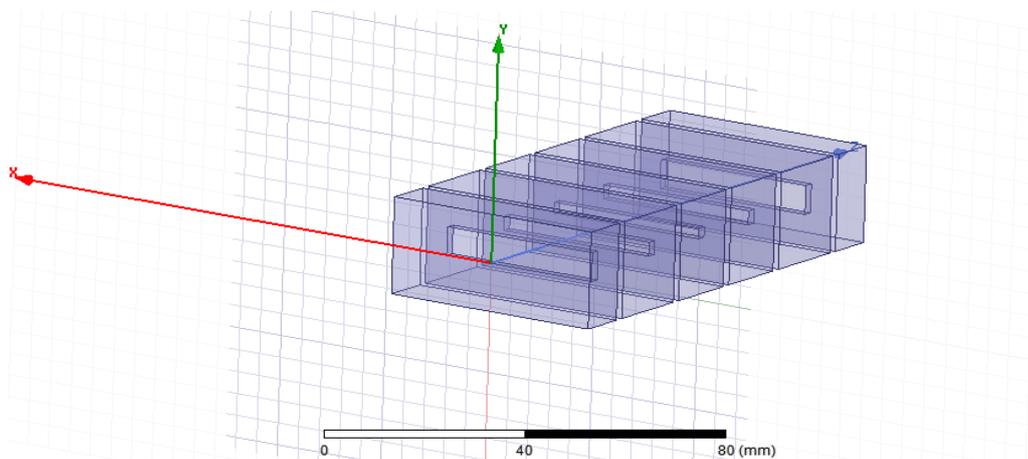


Figura 3.26 Geometría filtro paso bajo usada para estudiar la influencia de las pérdidas de retorno.

3.7.1. Variación parámetro R_L mediante la función de Chebyshev.

Función	Chebyshev tipo I
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	20,25,30 dB
Θ_c	30°
Dimensiones de la guía	a = 47.5488 mm, b = 22.1488 mm
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz
Anchura	35 mm

Tabla 3.25 Especificaciones del filtro función de tipo Chebyshev con variación de las pérdidas de retorno.

En este apartado realizaremos varias simulaciones en las que usaremos los valores de $R_L=20$ dB, $R_L=25$ dB, $R_L=30$ dB para comprobar el efecto del rizado sobre la banda de paso. En la Tabla 3.25 se muestran las especificaciones. Por otro lado, en la Tabla 3.26 mostramos los valores de cada inversor, en la Tabla 3.27 la altura de los iris y en la Tabla 3.28 los valores de sus longitudes.

	$R_L=20$ dB	$R_L=25$ dB	$R_L=30$ dB
$K_{1,5}$	0.7193	0.7842	0.8415
$K_{2,4}$	0.4877	0.5567	0.6363
K_3	0.4158	0.4763	0.5540

Tabla 3.26 Valores de los inversores de impedancia para los distintos R_L para un filtro de Chebyshev.

	$R_L=20$ dB	$R_L=25$ dB	$R_L=30$ dB
$W_{1,5}$	6.5782	7.7662	8.9244
$W_{2,4}$	3.2342	4.1257	5.3267
W_3	2.4196	3.1151	4.0891

Tabla 3.27 Valores las alturas de los iris (mm) para los distintos R_L para un filtro de Chebyshev.

	$R_L=20$ dB	$R_L=25$ dB	$R_L=30$ dB
$l_{1,5/2}$	10.106	10.5414	10.9248
$l_{2,4/2}$	8.3006	8.8487	9.395
$l_{3/2}$	7.5475	8.0467	8.8165

Tabla 3.28 Valores de las longitudes (mm) para los distintos R_L para un filtro de Chebyshev.

Podemos observar cómo al variar el nivel de pérdidas de retorno esto afecta al valor de los inversores de impedancia obtenidos de la síntesis, obteniendo unos valores más elevados conforme vamos aumentando dicho parámetro.

En las siguientes gráficas mostramos las simulaciones

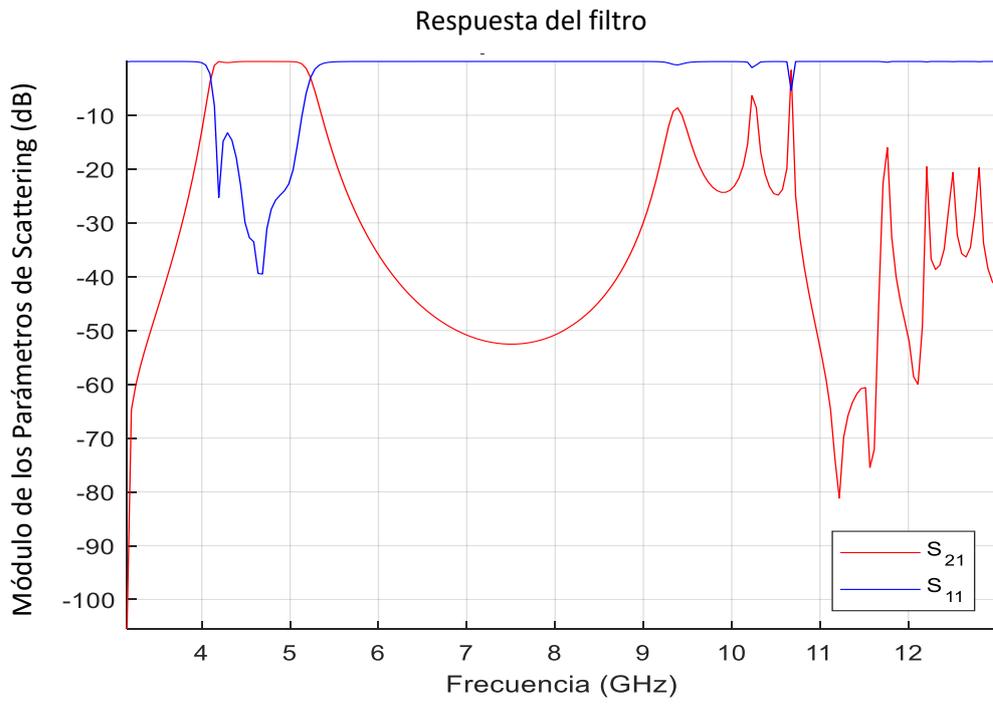


Figura 3.27 Respuesta del filtro Chebyshev con $R_L=20$ dB

En la Figura 3.27 vemos que las pérdidas de retorno se encuentran por encima de 20 dB.

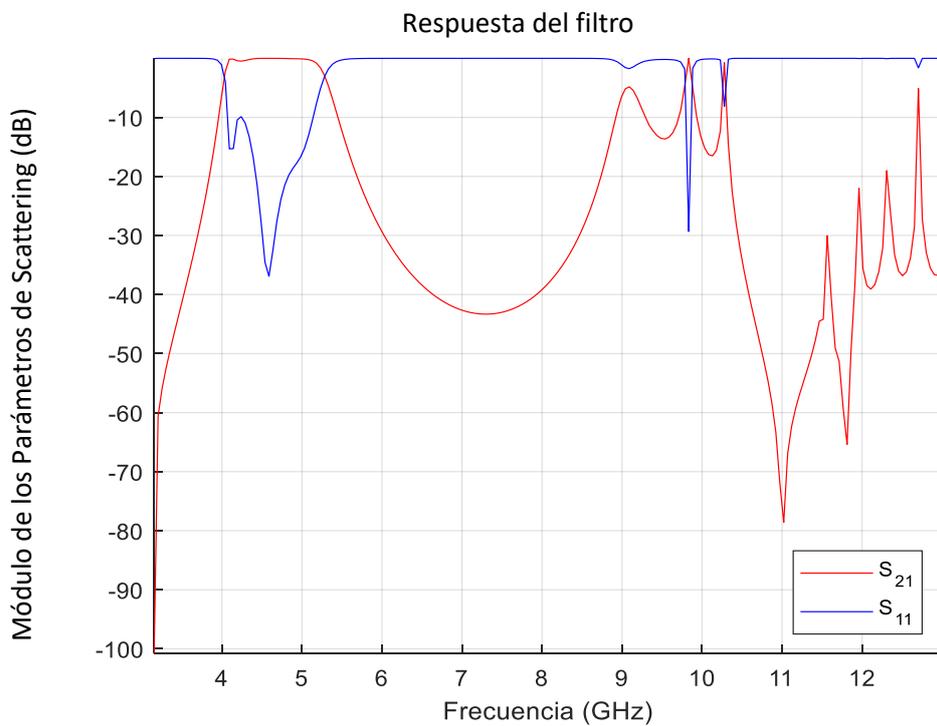


Figura 3.28 Respuesta del filtro Chebyshev con $R_L=25$ dB

En la Figura 3.28 vemos que las pérdidas de retorno se encuentran por encima de 25 dB.

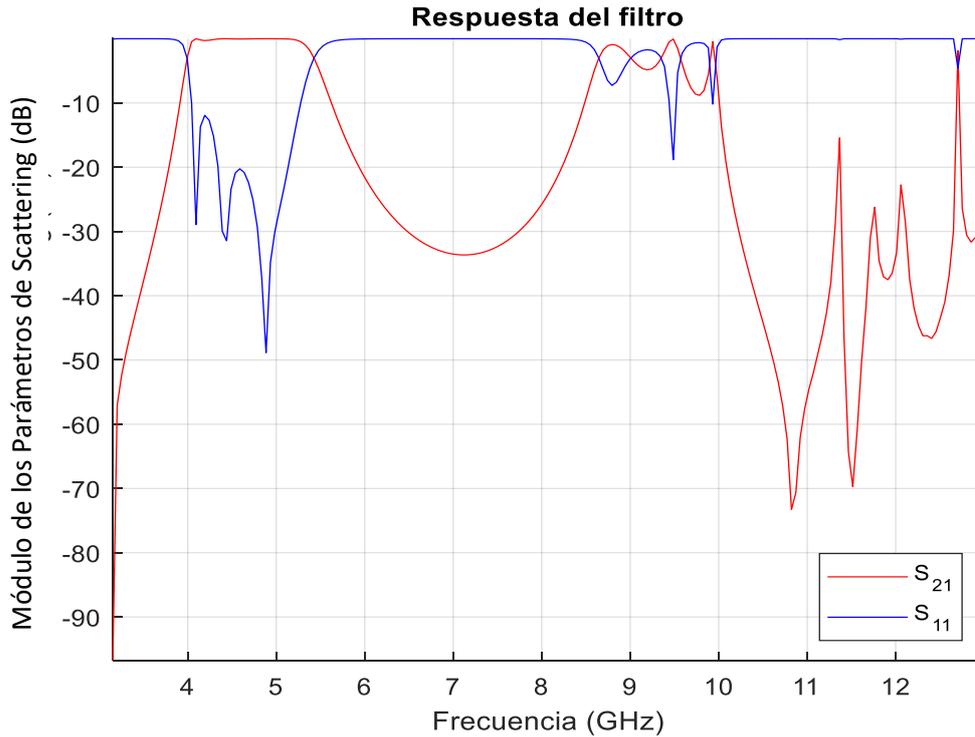


Figura 3.29 Respuesta del filtro Chebyshev con $R_L=30$ dB

En la Figura 3.29 vemos que las pérdidas de retorno se encuentran por encima de los 30 dB.

En estas gráficas correspondientes a la Figura 3.27, la Figura 3.28 y la Figura 3.29 podemos ver los filtros diseñados, en los que vemos cómo en la banda de paso cuando aumentamos R_L el parámetro S_{11} es menor. Esto se debe a que estos parámetros están relacionados entre sí debido a que son lo mismo pero cambiado de signo, pero en la banda eliminada aumenta el nivel de la banda espuria. No se consigue el valor de pérdidas de retorno establecido debido a la atenuación.

3.7.2. Variación parámetro R_L mediante la función de Zolotarev.

Función	Zolotarev
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	20,25,30 dB
Θ_c	30°
Dimensiones de la guía	a = 47.5488 mm, b = 22.1488 mm
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz
Anchura	40 mm

Tabla 3.29 Especificaciones del filtro función de Zolotarev con variación de las pérdidas de retorno.

En este apartado realizaremos varias simulaciones en las que usaremos los valores de $R_L=20$ dB, $R_L=25$ dB, $R_L=30$ dB para comprobar el efecto del rizado sobre la banda de paso, en la Tabla 3.29 se muestran las especificaciones. Las dimensiones del filtro se muestran en la Tabla 3.30, Tabla 3.31 y Tabla 3.32.

	$R_L=20$ dB	$R_L=25$ dB	$R_L=30$ dB
$K_{1,5}$	0.6805	0.7513	0.8139
$K_{2,4}$	0.4756	0.5360	0.6089
K_3	0.3904	0.4486	0.5213

Tabla 3.30 Valores inversores de impedancia para los distintos R_L para un filtro de Zolotarev.

	$R_L=20$ dB	$R_L=25$ dB	$R_L=30$ dB
$W_{1,5}$	8.9077	10.4664	11.8435
$W_{2,4}$	5.0923	6.1546	7.5353
W_3	3.6773	4.6098	5.8715

Tabla 3.31 Valores alturas de los iris (mm) para los distintos R_L para un filtro de Zolotarev.

	$R_L=20$ dB	$R_L=25$ dB	$R_L=30$ dB
$l_{1,5/2}$	9.7171	10.2064	10.5716
$l_{2,4/2}$	7.9784	8.5823	9.2035
$l_{3/2}$	7.1345	13.4489	8.4203

Tabla 3.32 Valores longitud (mm) para los distintos R_L para un filtro de Zolotarev.

En las siguientes gráficas mostramos las simulaciones

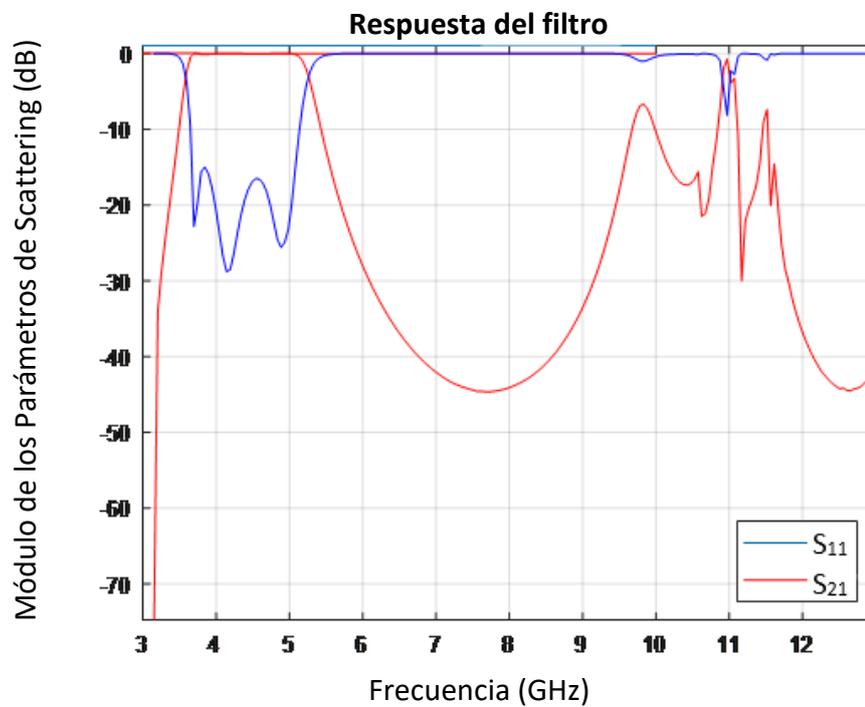


Figura 3.30 Respuesta del filtro Zolotarev con $R_L=20$ dB

Vemos como las pérdidas de retorno en la Figura 3.30 se encuentran por encima de los 20 dB.

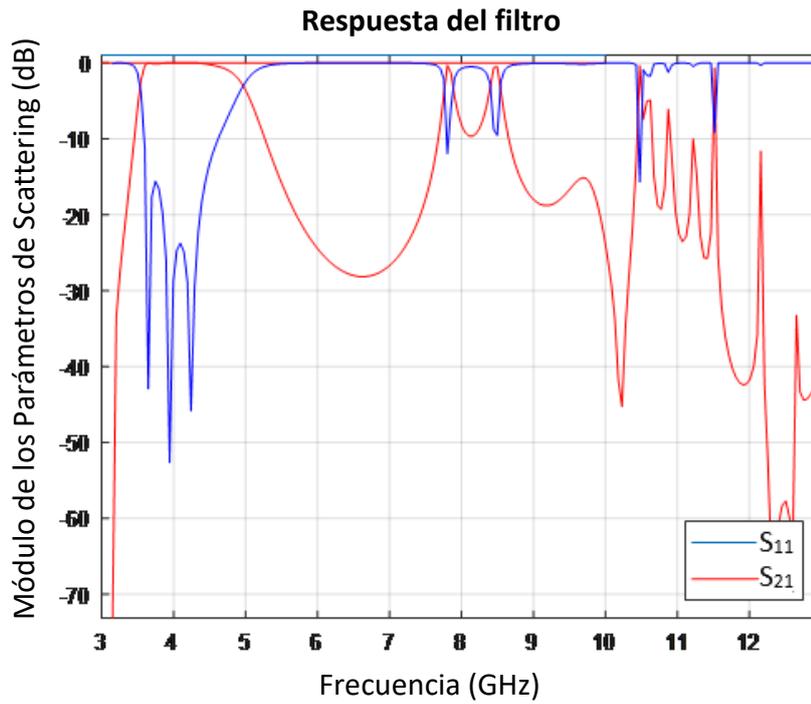


Figura 3.31 Respuesta del filtro Zolotarev con $R_L=25$ dB

En la Figura 3.31 vemos como las pérdidas de retorno se sitúan por encima de los 20 dB.

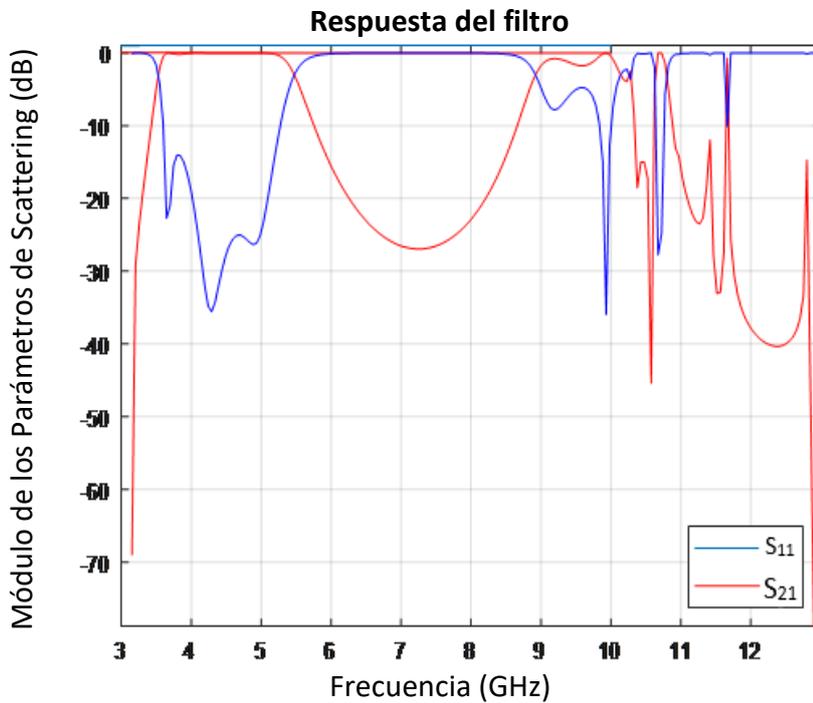


Figura 3.32 Respuesta del filtro Zolotarev con $R_L=30$ dB

En la Figura 3.32 observamos como las pérdidas de retorno se encuentran por encima de los 30 dB.

Viendo el resultado obtenido en la Figura 3.30, en la Figura 3.31 y en la Figura 3.32 observamos como el parámetro de reflexión de la tensión del puerto de entrada va disminuyendo su valor conforme se aumenta el valor de RL, mientras que el rechazo en la banda eliminada aumenta.

Observamos tanto para Chebyshev como para Zolotarev como el valor de S_{11} en la banda de paso no llega al valor de pérdidas de retorno establecidas ,ya que no está lo suficientemente atenuado, y que a frecuencias mayores S_{11} tiene unos valores más elevados, por lo que es más complicado obtener dichos valores de RL.

3.8. Influencia del espesor del iris

Este parámetro no afecta a los valores de la síntesis, pero influye en la posición de la banda de espurios, aunque no influirá tanto como el parámetro Θ_c . Realizaremos simulaciones variando este parámetro tanto para un filtro de Chebyshev como un filtro de Zolotarev.

3.8.1. Variación espesor del iris mediante la función de Chebyshev.

En la Tabla 3.33 se muestran las especificaciones del filtro que se realizará.

Función	Chebyshev tipo I
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	25 dB
Θ_c	30°
Dimensiones de la guía	a = 47.5488 mm, b = 22.1488 mm
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85 GHz
Espesor del iris (il)	2, 3 y 4 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz
Anchura	40 mm

Tabla 3.33 Especificaciones del filtro función de Chebyshev con variación espesor del iris.

En este apartado realizaremos varias simulaciones en las que usaremos los valores de $il=2\text{mm}$, $il = 3\text{mm}$, $il = 4\text{mm}$ para comprobar el efecto en la banda de espurios. En la Tabla 3.34 mostramos los valores de cada inversor, en la Tabla 3.35 la altura de los iris y en la Tabla 3.36 los valores de sus longitudes.

	$il = 2\text{mm}$	$il = 3\text{mm}$	$il = 4\text{mm}$
$K_{1,5}$	0.7842	0.7842	0.7842
$K_{2,4}$	0.5567	0.5567	0.5567
K_3	0.4763	0.4763	0.4763

Tabla 3.34 Valores inversores de impedancia para los distintos il para un filtro de Chebyshev.

	$il = 2\text{mm}$	$il = 3\text{mm}$	$il = 4\text{mm}$
$W_{1,5}$	11.0959	11.8381	12.3752
$W_{2,4}$	6.5324	7.2382	7.8309
W_3	5.1027	5.7778	6.4235

Tabla 3.35 Valores alturas de los iris (mm) para los distintos il para un filtro de Chebyshev.

	$il = 2\text{mm}$	$il = 3\text{mm}$	$il = 4\text{mm}$
$l_{1,5/2}$	10.3987	10.1169	9.782
$l_{2,4/2}$	8.7489	8.5257	8.3094
$l_{3/2}$	7.9942	7.8	7.6089

Tabla 3.36 Valores longitud (mm) para los distintos il para un filtro de Chebyshev.

Respuestas obtenidas:

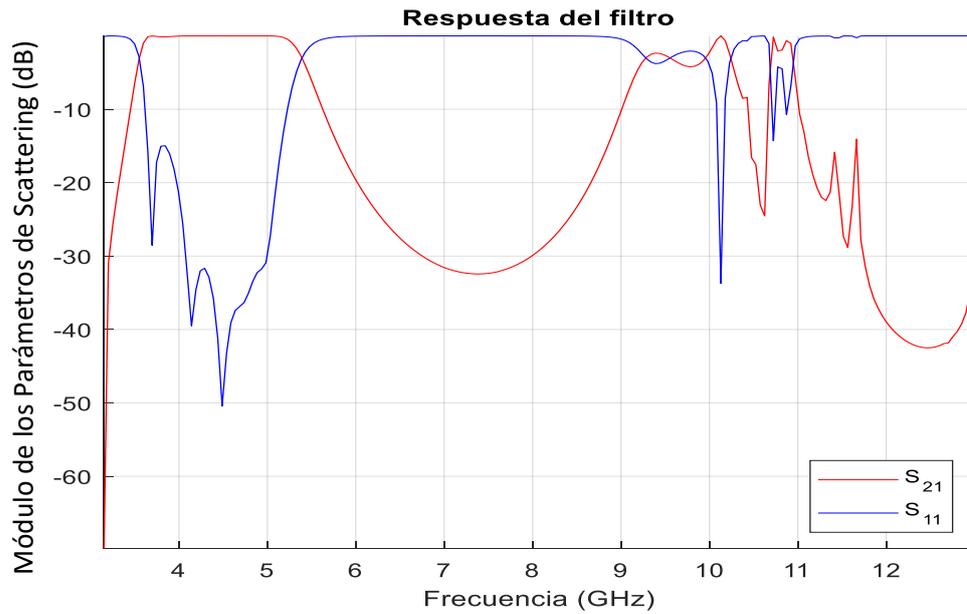


Figura 3.33 Respuesta del filtro Chebyshev con $il = 2\text{mm}$ con las especificaciones indicadas en la Tabla 3.33.

En la Figura 3.33 observamos que nos conviene trabajar con un rango de frecuencias desde los 3.5 GHz hasta los 9 GHz, ya que a partir de esa frecuencia comienza la banda espuria.

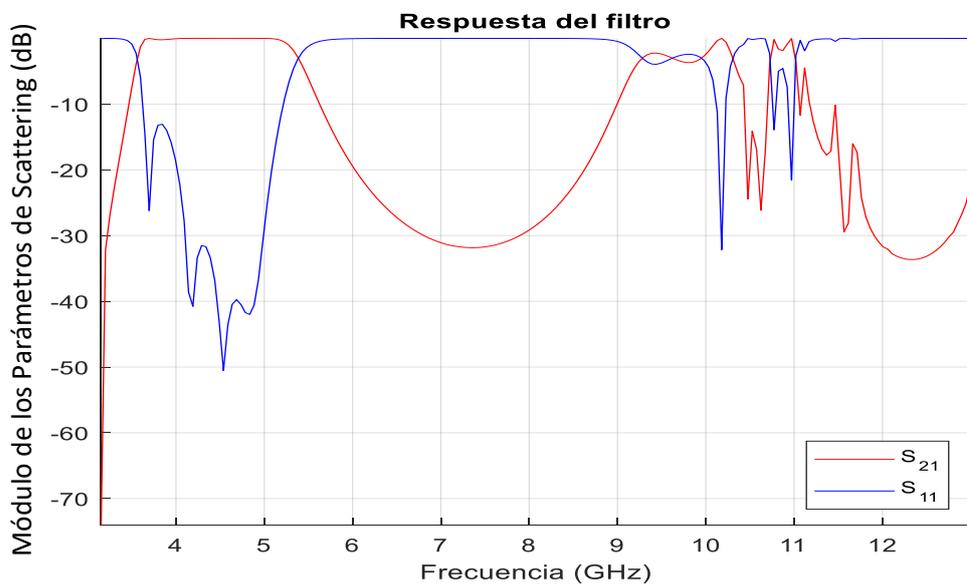


Figura 3.34 Respuesta del filtro Chebyshev con $il = 3\text{mm}$ con las especificaciones indicadas en la Tabla 3.33.

En la Figura 3.34 ocurre prácticamente lo mismo que en la Figura 3.33 en el que la banda espuria comienza a partir de los 9 GHz.

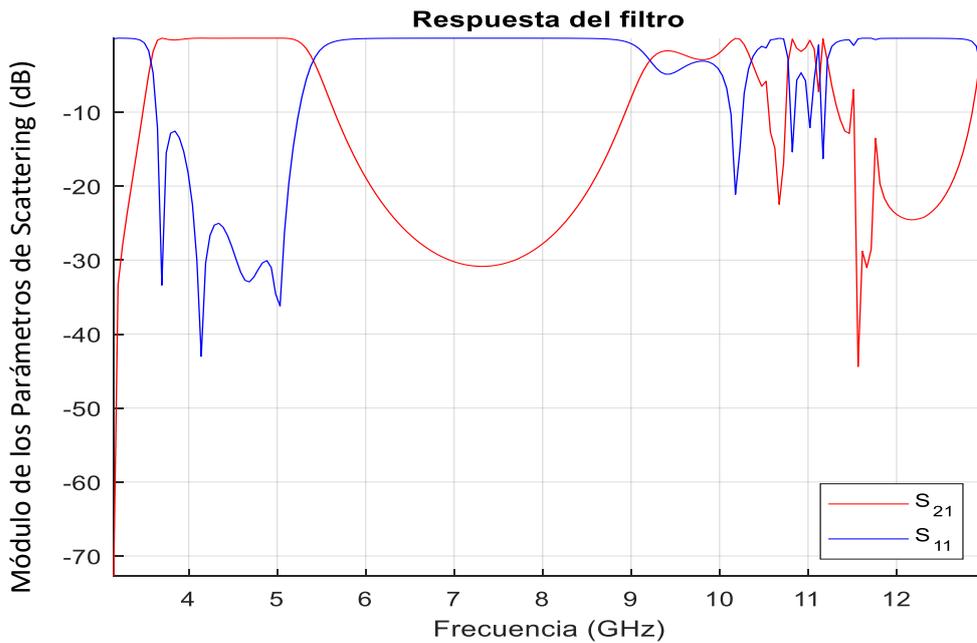


Figura 3.35 Respuesta del filtro Chebyshev con $il = 4\text{mm}$ con las especificaciones indicadas en la Tabla 3.33.

En la Figura 3.35 vemos que la frecuencia a la que comienzan los espurios es a partir de los 9 GHz.

Como podemos ver en la Figura 3.33, en la Figura 3.34 y en la Figura 3.35, se muestran las respuestas del filtro para los diferentes valores de espesor del iris, en el que podemos deducir que dicho valor debe ser el menor posible. También vemos en la Tabla 3.34, Tabla 3.35 y Tabla 3.36 como se obtiene unas dimensiones parecidas.

3.8.2. Variación espesor del iris mediante la función de Zolotarev.

Las especificaciones del filtro las mostramos en la Tabla 3.37.

Función	Zolotarev
Orden del filtro	4
Pérdidas de retorno	25 dB
Θ_c	30°
Dimensiones de la guía	$a = 47.5488\text{ mm}$, $b = 22.1488\text{ mm}$
Rango de frecuencias de uso	3.95-5.85GHz
Espesor del iris (il)	2, 3 y 4 mm
Frecuencia de corte	5.15 GHz
Anchura	40 mm

Tabla 3.37 Especificaciones del filtro función de Zolotarev con variación espesor del iris.

En las siguientes tablas mostraremos los valores de los inversores de impedancia correspondiente a la Tabla 3.38, los valores de las alturas de los iris, mostrados en la Tabla 3.39 y los valores de las longitudes en la Tabla 3.40. Se han realizado para los diferentes espesores de iris que se analizan en este apartado.

	il = 2mm	il = 3mm	il = 4mm
$K_{1,5}$	0.7513	0.7513	0.7513
$K_{2,4}$	0.5360	0.5360	0.5360
K_3	0.4486	0.4486	0.4486

Tabla 3.38 Valores inversores de impedancia para los distintos **il** para un filtro de Zolotarev.

	il = 2mm	il = 3mm	il = 4mm
$W_{1,5}$	10.4664	11.1037	11.7062
$W_{2,4}$	6.1546	6.8473	7.4856
W_3	4.6098	5.3254	5.9249

Tabla 3.39 Valores alturas de los iris (mm) para los distintos **il** para un filtro de Zolotarev.

	il = 2mm	il = 3mm	il = 4mm
$l_{1,5/2}$	10.2064	9.9207	15.187
$l_{2,4/2}$	8.5823	8.3034	8.0916
$l_{3/2}$	13.4489	7.5517	7.4159

Tabla 3.40 Valores longitud (mm) para los distintos **il** para un filtro de Zolotarev.

Respuestas obtenidas:

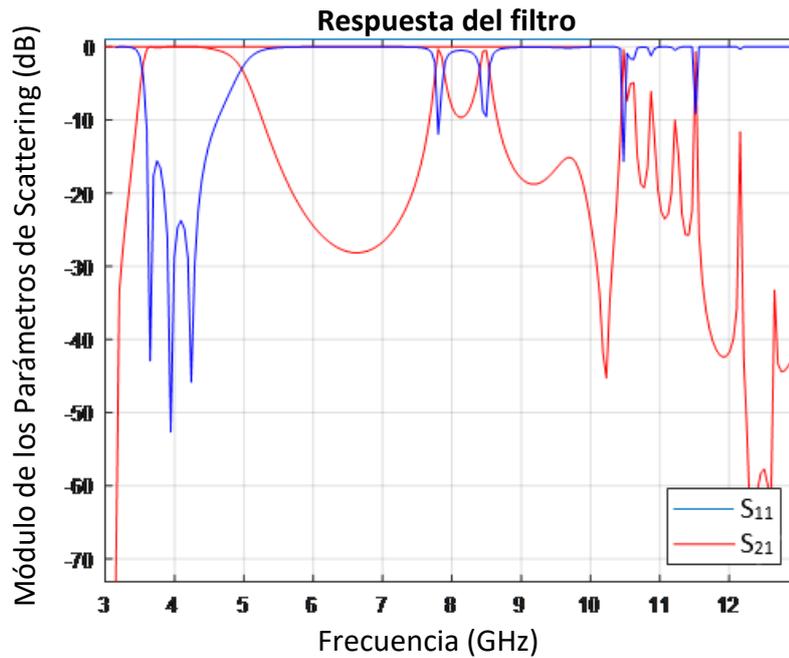


Figura 3.36 Respuesta del filtro Zolotarev con $il = 2\text{mm}$ con especificaciones de la Tabla 3.37.

En la Figura 3.36 vemos que desde los 3.5 GHz hasta los casi los 5 GHz se encuentra la banda de paso y a partir de los 7.8 GHz aproximadamente comienza la banda espuria, por tanto conviene usar un rango de frecuencias de trabajo desde los 3.5 GHz hasta los 7.8 GHz.

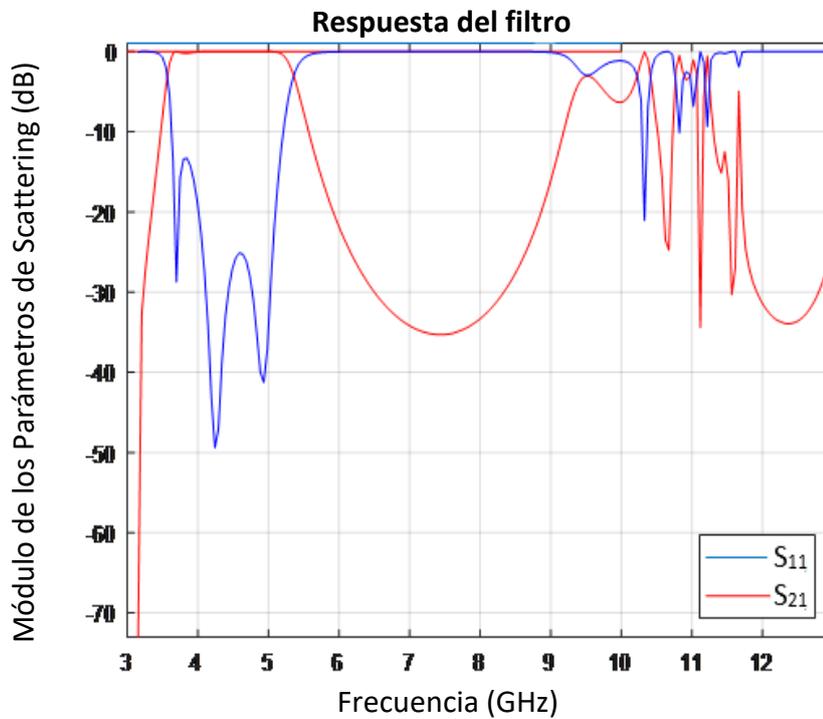


Figura 3.37 Respuesta del filtro Zolotarev con $il = 3\text{mm}$ con especificaciones de la Tabla 3.37.

En la Figura 3.37 conviene usar un rango de frecuencias de trabajo desde los 3.5 GHz hasta los 9 GHz, ya que a partir de los 9 GHz comienzan los espurios.

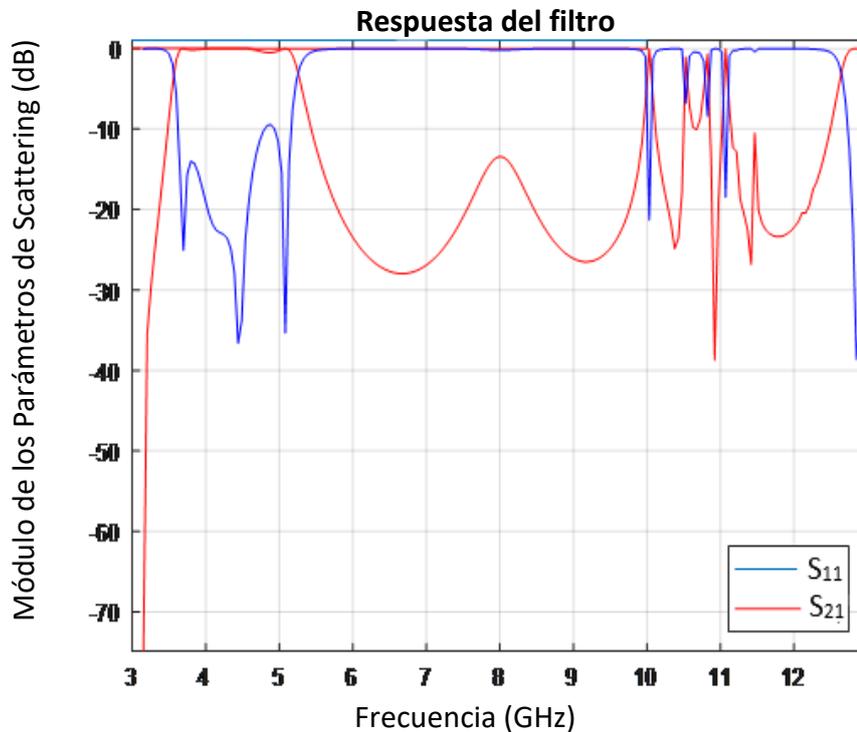


Figura 3.38 Respuesta del filtro Zolotarev con $il = 4\text{mm}$ con especificaciones de la Tabla 3.37.

En la Figura 3.38 conviene usar un rango de frecuencias de trabajo desde los 3.5 GHz hasta los 9 GHz, ya que a partir de los 10 GHz comienzan los espurios.

Como podemos ver en la Figura 3.36, Figura 3.37 y Figura 3.38, para los distintos valores del espesor del iris cuanto menor es el valor de il la banda de espurios se encuentra a frecuencias menores y conforme se va aumentando el valor de dicho parámetro, la banda espuria se encuentra a frecuencias mayores, por tanto nos interesa que este parámetro sea lo menor posible. Este efecto es diferente para Zolotarev que para Chebyshev, ya que observamos en sus gráficas que no cambia la banda de espurios.

Capítulo 4. Línea microtira (microstrip)

La línea microtira, más conocida como microstrip, es una evolución de la línea triplaca a la que se le ha eliminado la placa conductora superior (Figura 4.1, obtenida del libro Líneas de transmisión, guías de onda y cavidades resonantes [10]), por lo que nos permite introducir elementos concentrados como diodos y transistores y, por tanto, la realización de elementos activos y es de fabricación sencilla [10].

Sus ventajas la convierten en la línea de transmisión más utilizada para la realización de filtros de microondas. La desventaja principal es su carácter abierto, con la consiguiente radiación al exterior y la captación de señales interferentes [10].

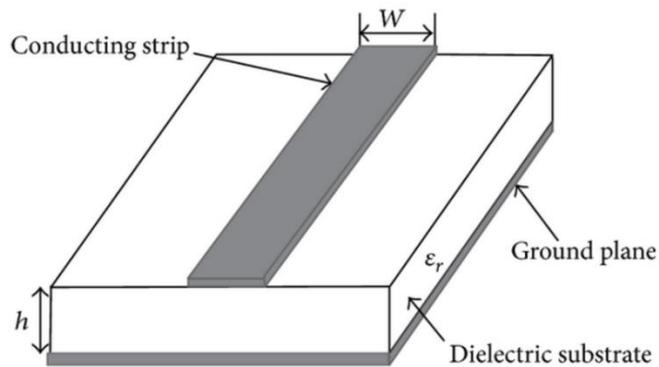


Figura 4.1 Línea microtira [10].

En la línea microstrip el modo fundamental que se propaga se denomina Cuasi-TEM, ya que dicha línea presenta dos dieléctricos que son el material del sustrato que separa los dos conductores y el aire. Aunque la mayor parte de la energía se transmite por el sustrato, una pequeña parte lo hará por el aire, en las cercanías de la tira conductora. Por esta razón no se puede hablar de un modo TEM puro, solo posible en dieléctricos homogéneos.

En general, el diseño de filtros paso bajo mediante microstrip se basa en dos pasos principalmente. El primero de ellos consiste en seleccionar el prototipo de filtro apropiado con unas especificaciones requeridas. Los valores de los elementos del filtro

se transforman en elementos L-C para una frecuencia de corte y una impedancia de 50 ohmios, por lo que una vez obtenido el diseño el siguiente paso es llevar a cabo un diseño del filtro mediante microstrip.

En la siguiente figura sacada del libro *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications* [11] se muestra una estructura general de un filtro paso bajo microstrip mediante salto de impedancia.

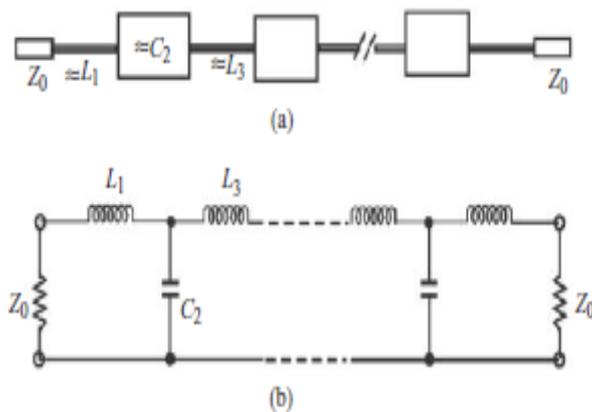


Figura 4.2. (a) Estructura general filtro paso bajo microstrip mediante salto de impedancia. (b) Estructura filtro paso bajo equivalente L-C [11].

4.1. Advanced Design System (ADS)

Es un programa de simulación para el diseño de una gran variedad de dispositivos de telecomunicaciones. La idea del software es realizar simulaciones con gran precisión sobre modelos circuitales, ya que ADS contiene algoritmos de simulación y rutinas de optimización avanzadas que reducen los tiempos de simulación. Para la realización de estas secciones nos ha servido de ayuda la lectura de artículos sobre Diseños de filtros en tecnología Microstrip [12] y Design and Analysis of Stepped Impedance Microstrip Low Pass Filter Usign ADS Simulation Tool for Wireless Applications [13].

4.1.1. Cálculo de los valores de impedancia para un filtro prototipo

En primer lugar, lo que haremos será obtener los valores de impedancia para nuestro filtro prototipo. ($Z_0 = 50$ ohmios, $f_c = 1$ GHz)

Comenzamos obteniendo los valores unitarios para un filtro de frecuencia de corte e impedancias de salida y de entrada unitarias mediante la Tabla 4.1.

N	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}	g_{11}
1	2.0000	1.0000									
2	1.4142	1.4142	1.0000								
3	1.0000	2.0000	1.0000	1.0000							
4	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654	1.0000						
5	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180	1.0000					
6	0.5176	1.4142	1.9318	1.9318	1.4142	0.5176	1.0000				
7	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450	1.0000			
8	0.3902	1.1111	1.6629	1.9615	1.9615	1.6629	1.1111	0.3902	1.0000		
9	0.3473	1.0000	1.5321	1.8794	2.0000	1.8794	1.5321	1.0000	0.3473	1.0000	
10	0.3129	0.9080	1.4142	1.7820	1.9754	1.9754	1.7820	1.4142	0.9080	0.3129	1.0000

Tabla 4.1 Valores unitarios prototipo para un filtro paso bajo [12].

En dicha tabla el valor de g_i puede representar indistintamente el valor de una inductancia o de una capacidad.

Por tanto, escogemos $N=5$ para obtener un filtro con 5 secciones y obtenemos los siguientes valores:

$$g_1 = g_5 = 0.6180 \quad (4.1)$$

$$g_2 = g_4 = 1.6180 \quad (4.2)$$

$$g_3 = 2 \quad (4.3)$$

Usando las siguientes expresiones obtenemos sus correspondientes valores de L y C mostrados en la Tabla 4.2.

$$L_n = \frac{g_n * Z_0}{\omega_c} \quad (4.4)$$

$$C_n = \frac{g_n}{\omega_c * Z_0} \quad (4.5)$$

Valores elementos	Valores L y C
$g_1 = g_5 = 0.6180$	$L_1 = L_5 = 5 \text{ nH}$
$g_2 = g_4 = 1.6180$	$C_2 = C_4 = 5 \text{ pF}$
$g_3 = 2$	$L_3 = 15 \text{ nH}$

Tabla 4.2 Valores L y C.

Con los valores obtenidos en la tabla anterior realizamos un esquemático correspondiente a un filtro paso bajo en ADS, mostrado en la Figura 4.3.

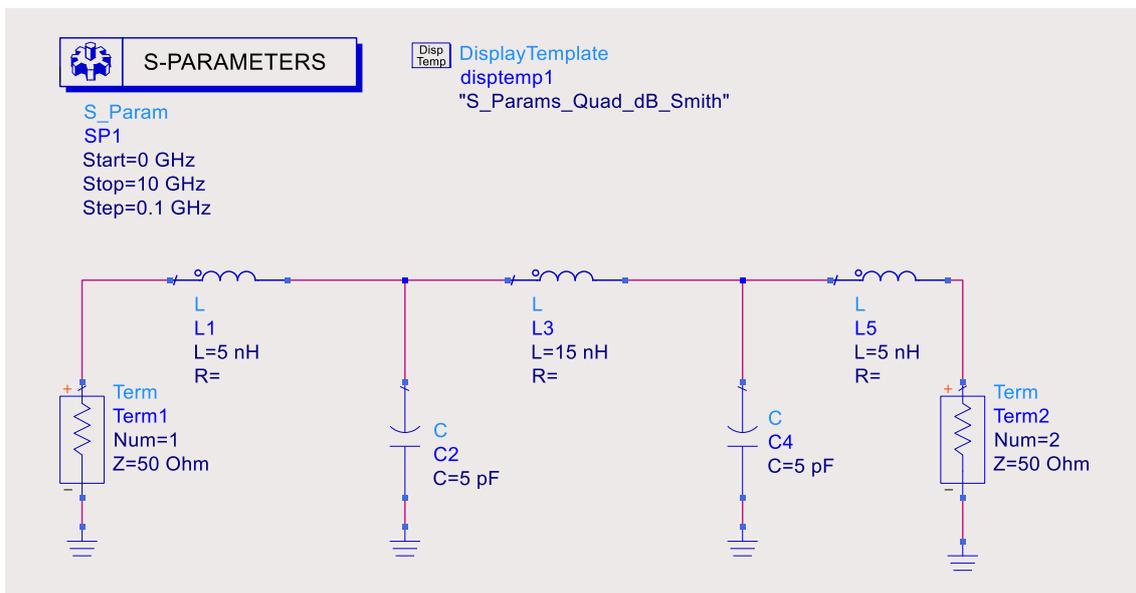


Figura 4.3. Modelo circuital en ADS.

Realizando la simulación del circuito obtenemos su respuesta como podemos ver en la Figura 4.4.

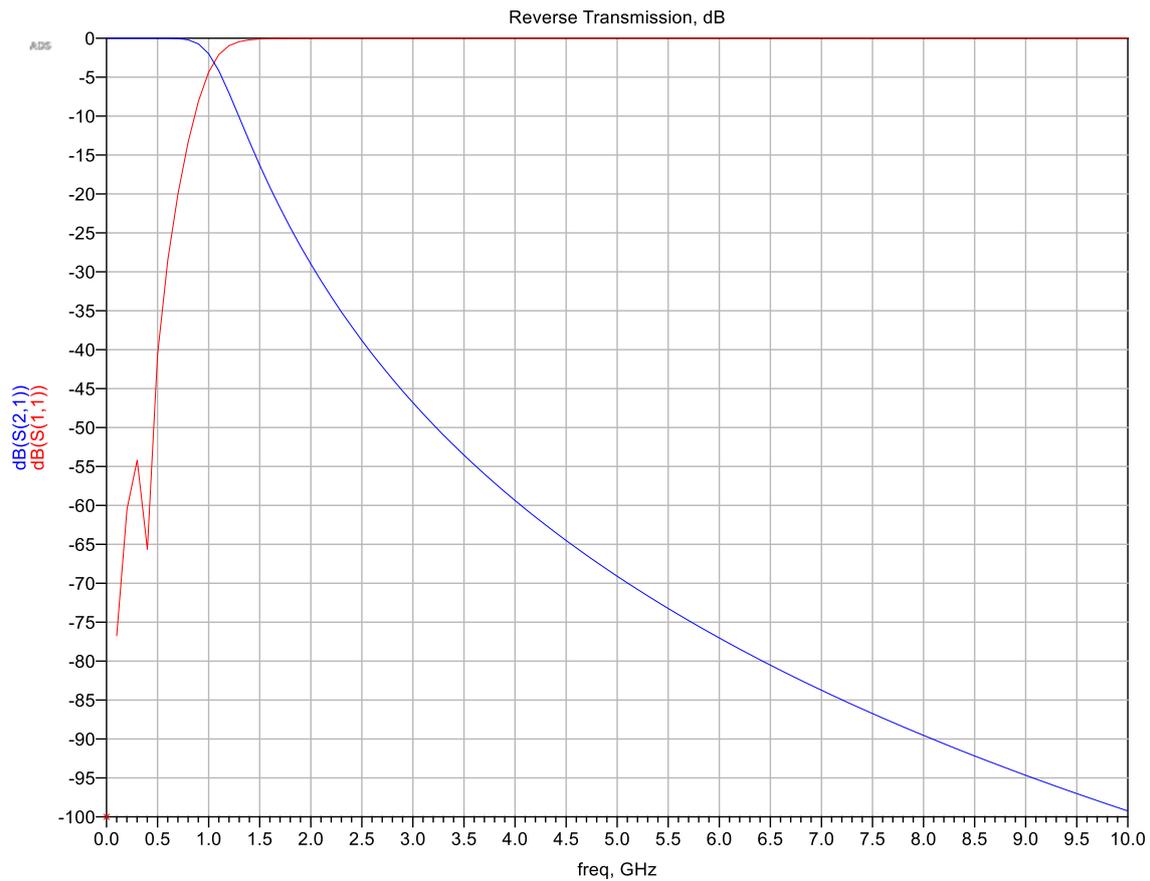


Figura 4.4. Respuesta modelo circuital en ADS.

En esta respuesta podemos observar que no se satisface la atenuación. Por lo tanto, optamos por realizar un filtro paso bajo mediante la implementación de microstrip. Para dicha implementación en microstrip realizaremos en un primer lugar el cálculo de la longitud eléctrica y posteriormente mediante la ayuda de la herramienta de lineCalc de ADS obtendremos las anchuras y longitudes para nuestro filtro.

4.1.2. Cálculo de la longitud eléctrica ($\beta\ell$) de las líneas

Las dimensiones físicas de la línea microstrip se pueden obtener una vez conocidos sus valores de impedancia y sus longitudes eléctricas.

La longitud eléctrica de una línea microstrip asociada a una inductancia se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\beta l = g_l * \frac{R_o}{Z_h} \quad (4.6)$$

$g_l \rightarrow$ valor unitario asociado a una inductancia.

$Z_h \rightarrow$ valor alta impedancia asociado a la inductancia.

$R_o \rightarrow$ valor impedancia de entrada y salida del filtro.

La longitud eléctrica de una línea microstrip asociada a un condensador se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\beta l = g_c * \frac{Z_l}{R_o} \quad (4.7)$$

$g_c \rightarrow$ valor unitario asociado a un condensador.

$Z_l \rightarrow$ valor baja impedancia asociado al condensador.

$R_o \rightarrow$ valor impedancia de entrada y salida del filtro.

Por tanto, introduciendo los valores en las ecuaciones (4.3) y (4.4) obtenemos que:

$$\beta l_1 = g_1 * \frac{R_o}{Z_h} = 0.6180 * \frac{50}{72.25} = 24.50^\circ \quad (4.8)$$

$$\beta l_2 = g_2 * \frac{Z_l}{R_o} = 1.6180 * \frac{40.095}{50} = 74.33^\circ \quad (4.9)$$

$$\beta l_3 = g_3 * \frac{R_o}{Z_h} = 2 * \frac{50}{162.35} = 35.29^\circ \quad (4.10)$$

$$\beta l_4 = g_4 * \frac{Z_l}{R_o} = 1.6180 * \frac{40.095}{50} = 74.33^\circ \quad (4.11)$$

$$\beta l_5 = g_5 * \frac{R_o}{Z_h} = 0.6180 * \frac{50}{72.25} = 24.50^\circ \quad (4.12)$$

Por tanto, una vez obtenidas las longitudes eléctricas mediante la herramienta lineCalc de ADS calculamos las dimensiones de una línea microstrip.

H (Grosor del sustrato) = 0.63mm

Er (Permitividad relativa) = 9.6

Mur (Permeabilidad relativa) = 1

Cond (Conductividad del metal) = 1e50

Hu (Altura superior de la armadura) = 3.9e034 mil

T (Grosor de la capa conductora) = 0.01mm

TanD (Tangente de pérdidas del dieléctrico) = 0

Rough (Aspereza de la superficie del conductor) = 0 mil

Metiendo todos los datos en la herramienta de ADS obtenemos los siguientes valores

Componente	Impedancia característica (Zo)	Longitud eléctrica	Anchura microstrip (mil)	Longitud microstrip (mil)
Línea 1	72.25	24.50 °	9.925354	32.280669
Línea 2	40.095	74.33 °	37.539055	91.743307
Línea 3	162.35	35.29 °	0.115530	51.506299
Línea 4	40.095	74.33 °	37.539055	91.743307
Línea 5	72.25	24.50 °	9.925354	32.280669

Tabla 4.3 Valores filtro microstrip.

Con los resultados obtenidos en la Tabla 4.3 realizamos el esquemático correspondiente a un filtro paso bajo microstrip en ADS como vemos en la Figura 4.5 y su respectivo layout en la Figura 4.6.

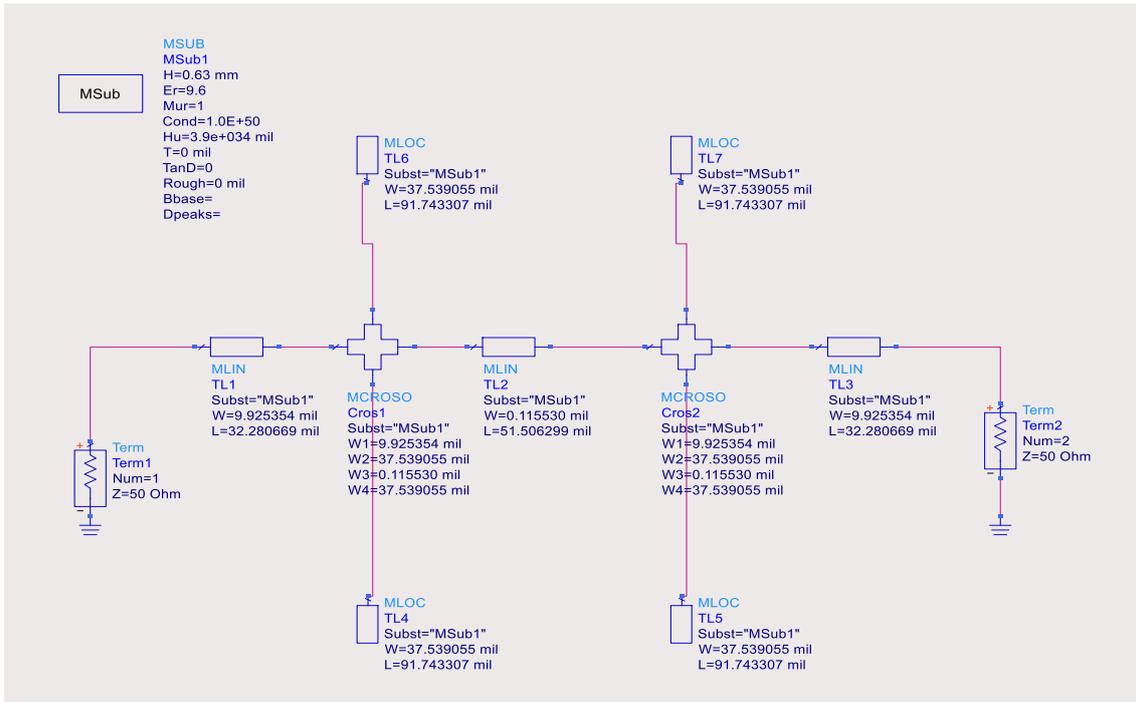


Figura 4.5. Filtro paso bajo usando microstrip

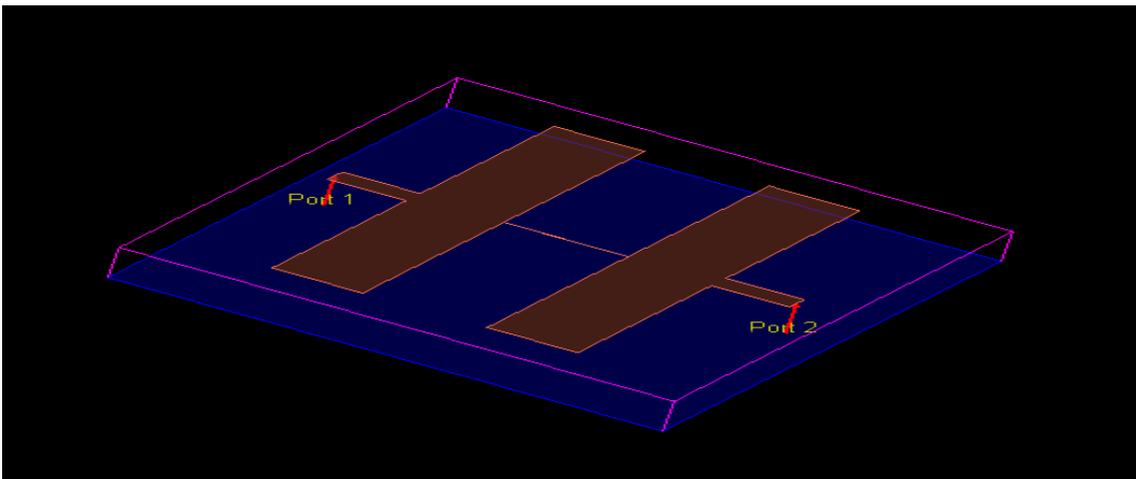


Figura 4.6. Layout 3D

Llevando a cabo la simulación de dicho filtro paso bajo usando microstrip obtenemos el siguiente resultado:

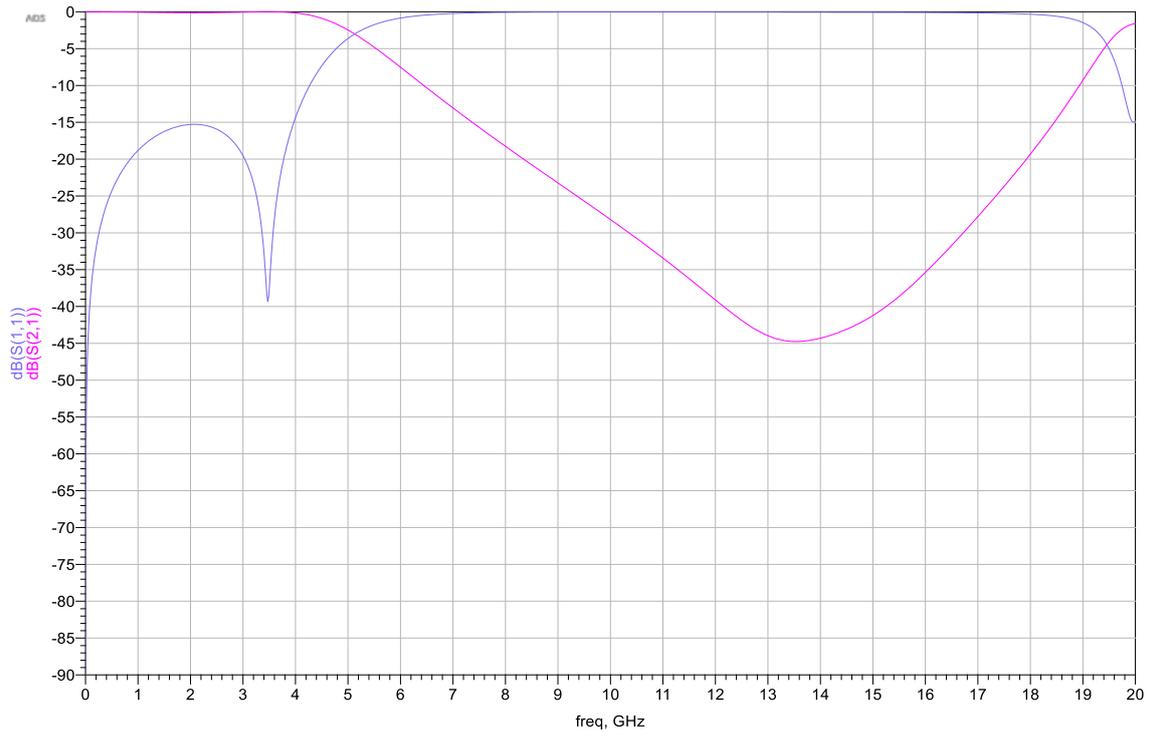


Figura 4.7. Respuesta filtro paso bajo orden 2 usando microstrip.

En la Figura 4.7 podemos observar que obtenemos unas pérdidas de inserción 45 dB en la banda eliminada. Podemos ver como al ser un filtro microstrip deja pasar señal a partir de los 0 GHz ya que dichos filtros se caracterizan por tener una frecuencia de corte en 0 GHz al trabajar con un modo quasi-TEM. En esta gráfica también podemos ver como las pérdidas de retorno se encuentran en 15 dB, la banda espuria se encuentra en frecuencias superiores a los 19 GHz.

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

En este trabajo se han llevado a cabo e implementado filtros de microondas paso bajo en guía de onda con la función de tipo Chebyshev y la función de Zolotarev, cuya geometría se ha basado en ventanas rectangulares. Los resultados obtenidos con las diferentes variaciones de los parámetros que se han realizado en los filtros paso bajo han sido satisfactorios, aunque se podrían mejorar dichos resultados. Tanto para los resultados que nos han proporcionado las simulaciones para la función de tipo Chebyshev y de Zolotarev han sido muy similares, obteniendo unas especificaciones de anchura y de altura muy parecidas y obteniendo según si se ha variado el valor de Θ_c , R_L , el espesor del iris y la anchura del iris, una respuesta del filtro esperada para cada una de las funciones, aunque como se ha comentado anteriormente, dichos resultados pueden mejorarse.

Con respecto al último capítulo de este trabajo, se introduce en el desarrollo de filtros paso bajo basados en microstrip para ver su comportamiento mediante su modelo circuital. Dicho apartado puede ser una línea futura para seguir con la investigación de este tipo de filtros.

Bibliografía

- [1] Aplicaciones y Teoría de Ingeniería de Microondas; Ebert Gabriel San Román Castillo, Patricia Raquel Castillo Aranibar, Manuel Gustavo Sotomayor Polar, Lee Victoria Gonzales Fuentes, Efraín Zenteno Bolaños.
- [2] Richard J. Cameron, Chandra M. Kudsia, Raafat R. Mansour - Microwave Filters for Communication Systems_ Fundamentals, Design, and Applications (2018, Wiley).
- [3] MATLAB 2019 <https://www.mathworks.com>
- [4] ANSYS HFSS 2019
- [5] ADS 2016 [https:// www.keysight.com](https://www.keysight.com)
- [6] Lowpass filter design for space applications in waveguide technology using alternative topologies; Diego Correas Serrano.
- [7] Diseño de filtros alternativos en tecnología guía de onda para aplicaciones de alta potencia en comunicaciones espaciales; Antonio Romera Pérez.
- [8] Análisis de Circuitos en guía y de Antenas en cavidad con independencia del encapsulado; Pedro Vera Castejón.
- [9] Design and Implementation of Novel Microwave Filter Structures Using Additive Manufacturing Techniques; Alejandro Pons Abenza.
- [10] Líneas de transmisión, guías de onda y cavidades resonantes; Alejandro Díaz Morcillo, José Fayos Fernández, Juan Monzó Cabrera.
- [11] Microstrip Filters for RF/Microwave Applications; Jia-Sheng Hong
- [12] Diseños de filtros en tecnología Microstrip; D. Cordobés, J.A. López Pérez, J.A. López Fernández, J.A. Abad, G. Martínez.
- [13] Design and Analysis of Stepped Impedance Microstrip Low Pass Filter Usign ADS Simulation Tool for Wireless Applications; K.Rajasekaran, J.Jayalakshmi, T.Jayasankar.

