

Diseño de filtros en tecnología Microstrip

D. Cordobés, J.A. López Pérez,
J.A. López Fernández, J.A. Abad, G. Martínez

Informe Técnico IT - OAN 2007 - 10

CONTENIDO

I. Introducción	4
II. Diseño de un filtro paso bajo de 3GHz	5
2.1.- Cálculo del número de secciones	6
2.2.- Cálculo de los valores de impedancia de un filtro prototipo	7
2.3.- Cálculo de la longitud eléctrica (βl) de las líneas	8
2.4.- Cálculo de las dimensiones físicas de las líneas	9
2.5.- Simulación del filtro	11
2.6.- Estudio de la sensibilidad ante tolerancias de fabricación	13
2.6.1 – Modificando las anchuras	13
2.6.2 – Modificando las longitudes	15
2.7.- Construcción del filtro	16
2.7.1 – Diseño de la caja	16
2.7.2 – Cálculo de la frecuencia de resonancia de la caja	17
2.8.- Medida del filtro con el analizador vectorial de redes	17
III. Diseño de un filtro paso banda a 12GHz de líneas acopladas	19
IV. Diseño de un filtro paso banda a 5GHz de líneas acopladas	22
4.1.- Diseño	22
4.2.- Simulación	23
4.3.- Estudio de la sensibilidad ante tolerancias de fabricación	24
4.4.- Montaje y medida	25
V. Diseño de un filtro paso banda a 4GHz de líneas acopladas	28
5.1.- Diseño	28

<i>5.2.- Simulación</i>	<i>29</i>
<i>5.3.- Estudio de la sensibilidad ante tolerancias de fabricación</i>	<i>30</i>
<i>5.4.- Montaje y medida</i>	<i>30</i>
<i>VI. Diseño de un filtro paso banda a 920MHz con stubs</i>	<i>33</i>
<i>6.1.- Diseño</i>	<i>33</i>
<i>6.2.- Simulación</i>	<i>34</i>
<i>6.3.- Estudio de la sensibilidad ante tolerancias de fabricación</i>	<i>35</i>
<i>6.4.- Montaje y medida</i>	<i>35</i>
<i>VII. Tablas resumen</i>	<i>38</i>
<i>VIII. Bibliografía</i>	<i>40</i>

I. Introducción

En este informe se documenta el proceso de diseño, construcción y medida de cinco filtros en tecnología *microstrip* (microtira) diseñados empleando el programa ADS. Esta tecnología es muy adecuada cuando se requiere un filtro de pequeñas dimensiones a altas frecuencias.

Para obtener buenos resultados debe seleccionarse un substrato con las menores pérdidas posibles y constante dieléctrica homogénea. En el proceso de fabricación ha de tenerse especial cuidado ya que las dimensiones obtenidas en el programa de simulación han de ser redondeadas teniendo en cuenta el tamaño de la fresa que se emplee y su tolerancia, lo cual hace muy recomendable el realizar un estudio previo de sensibilidad para ver como afectaría a la respuesta del filtro una variación de las longitudes y anchuras de las líneas microstrip que lo integran.

II. Diseño de un filtro paso bajo de 3GHz

El filtro diseñado es del tipo *stepped-impedance* que consiste en alternar consecutivamente líneas de alta (anchas) y baja impedancia (estrechas). En la **Figura 1** se muestra el circuito equivalente de un filtro paso bajo de n secciones junto con su layout final. Las especificaciones deseadas se presentan en la **Tabla 1**.

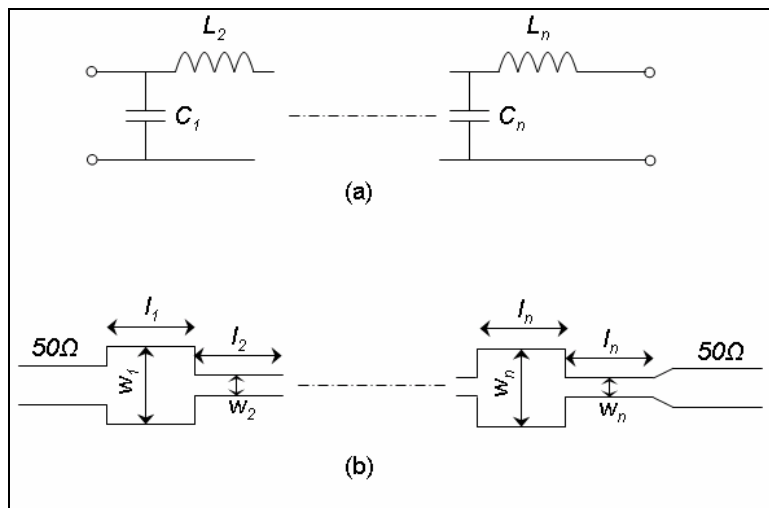


Figura 1. Filtro paso bajo microstrip *stepped-impedance*. (a) Circuito equivalente (b) Layout final empleando líneas microstrip

Parámetro	Valor
Frecuencia de corte	3GHz
Atenuación de 20dB	4.5GHz
Impedancia	50 Ω
Pérdidas inserción	<1dB
Pérdidas retorno	<-15dB

Tabla 1. Especificaciones del filtro a diseñar

El proceso de diseño se articula en los pasos que se describen a continuación.

2.1) Cálculo del número de secciones

El número de secciones determina lo abrupto que es el filtro y se estima a partir de unas curvas como las de la **Figura 2** [1], donde W_c es la frecuencia de corte del filtro y W es la frecuencia a la que se desea una atenuación determinada. En nuestro diseño se ha especificado que la atenuación a 4.5GHz sea de 20dB, por lo que

$$\frac{W}{W_c} - 1 = \frac{4.5}{3.0} - 1 = 0.5$$

y de la figura 2 se obtiene que son necesarias 6 secciones.

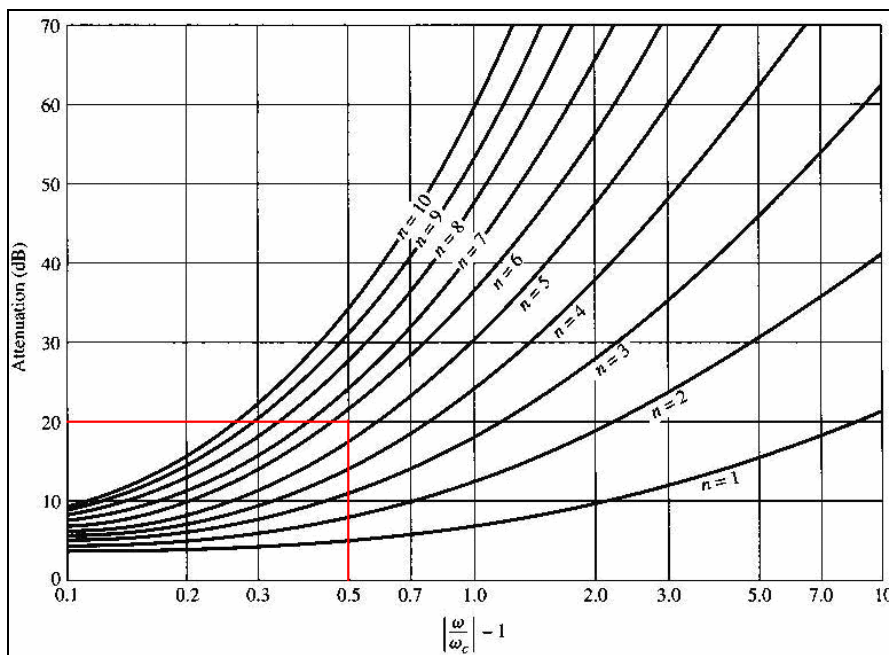


Figura 2. Curvas de atenuación-frecuencia normalizada para calcular el número de secciones del filtro

2.2) Cálculo de los valores de impedancia para un filtro prototipo

Los valores de impedancia para un filtro prototipo de frecuencia de corte e impedancias de salida y entradas unitarias se calculan a partir de la **Tabla 2** [1].

<i>N</i>	<i>g₁</i>	<i>g₂</i>	<i>g₃</i>	<i>g₄</i>	<i>g₅</i>	<i>g₆</i>	<i>g₇</i>	<i>g₈</i>	<i>g₉</i>	<i>g₁₀</i>	<i>g₁₁</i>
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 2. Valores unitarios prototipo para un filtro de frecuencia de corte e impedancia de las terminaciones unidad

donde g_i , dependiendo de la topología del filtro, puede representar indistintamente una inductancia o una capacidad.

De esta tabla se obtiene:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= 0.517 = C_1 \\
 g_2 &= 1.414 = L_2 \\
 g_3 &= 1.932 = C_3 \\
 g_4 &= 1.932 = L_4 \\
 g_5 &= 1.414 = C_5 \\
 g_6 &= 0.517 = L_6
 \end{aligned}$$

En la **Figura 3** se muestra el circuito equivalente del filtro junto con su layout final en tecnología microstrip.

2.3) Cálculo de la longitud eléctrica (βl) de las líneas

Las dimensiones físicas de las líneas microstrip se pueden determinar una vez que se conocen sus impedancias características y sus longitudes eléctricas.

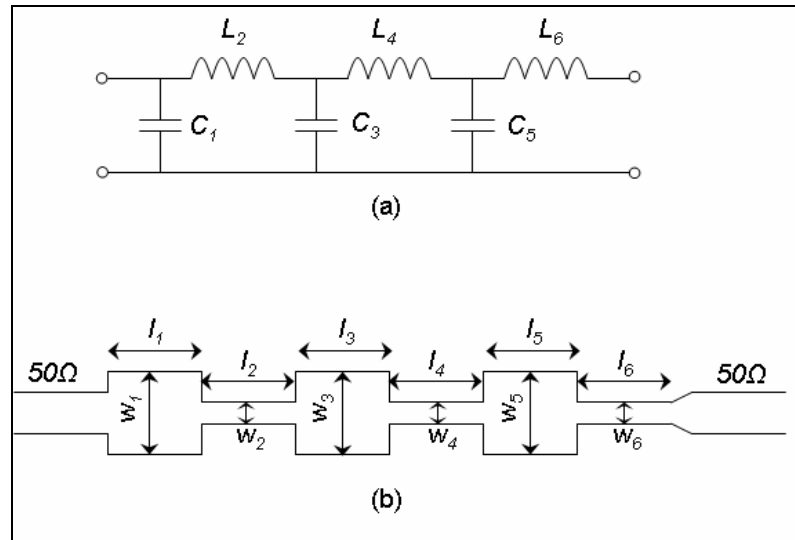


Figura 3. Filtro paso bajo microstrip *stepped-impedance* diseñado. (a) Circuito prototipo
 (b) Layout final empleando líneas microstrip

La longitud eléctrica de una línea microstrip asociada a una inductancia se calcula como

$$\beta l = g_L \frac{R_o}{Z_h} \quad 1a$$

donde g_L es el valor unitario prototipo asociado a una inductancia obtenido en el punto anterior, Z_h es el valor de alta impedancia asociado a la inductancia y R_o el valor de impedancia de entrada y salida del filtro.

La longitud eléctrica de una línea microstrip asociada a un condensador se calcula como

$$\beta l = g_C \frac{Z_\ell}{R_o} \quad 1b$$

donde g_C es el valor unitario prototipo asociado a una inductancia obtenido en el punto anterior, Z_ℓ es el valor de baja impedancia asociado al condensador y R_o el valor de impedancia de entrada y salida del filtro.

En el diseño de este filtro se han empleado líneas de alta y baja impedancia de 150Ω y 10Ω respectivamente. La impedancia de entrada y salida del filtro es de 50Ω , por lo que aplicando (1a) y (1b) se obtiene

$$\beta l_1 = g_1 \frac{Z_\ell}{R_o} = 5.9^\circ$$

$$\beta l_2 = g_2 \frac{R_o}{Z_h} = 27^\circ$$

$$\beta l_3 = g_3 \frac{Z_\ell}{R_o} = 22.1^\circ$$

$$\beta l_4 = g_4 \frac{R_o}{Z_h} = 36.9^\circ$$

$$\beta l_5 = g_5 \frac{Z_\ell}{R_o} = 16.2^\circ$$

$$\beta l_6 = g_6 \frac{R_o}{Z_h} = 9.9^\circ$$

2.4) Cálculo de las dimensiones físicas de las líneas microstrip

Las dimensiones de una línea microstrip se puede calcular a partir de su impedancia característica y de su longitud eléctrica. Para ello se ha empleado la herramienta *LineCalc* presente en el entorno del programa *Advanced Design System* (**Figura 4**).

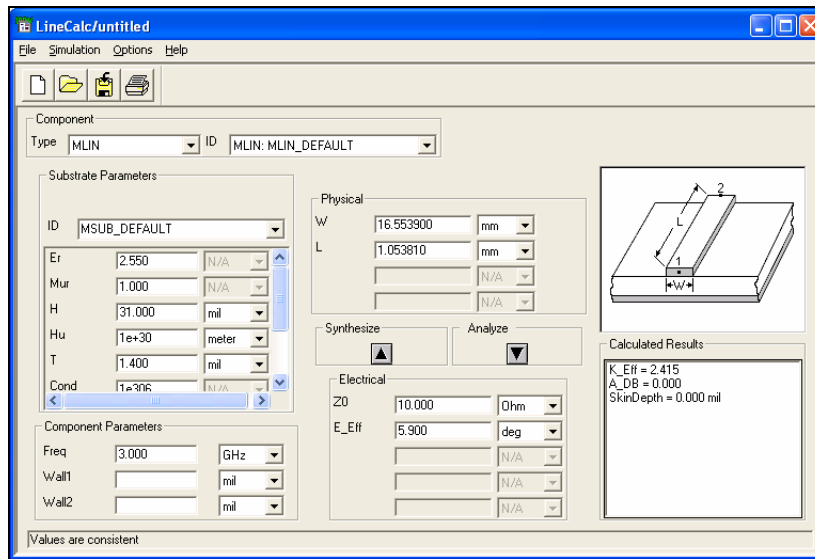


Figura 4. Herramienta *LineCalc* del programa ADS para calcular las dimensiones de las líneas microstrip

Lo primero que hay que hacer es introducir los parámetros del sustrato sobre el que se va a fabricar las líneas microstrip. El sustrato que se ha empleado para construir el filtro es un Taconic TLX-8 y tiene estas características:

- **H** (Grosor del sustrato) = 0.787mm (31 mil)
- **Er** (Permitividad relativa) = 2.55
- **Mur** (Permeabilidad relativa) = 1
- **Cond** (Conductividad del metal) = 1e306
- **Hu** (Altura superior de la armadura) = 1e30 m
- **T** (Grosor de la capa conductora) = 0.036mm (1.4 mil)
- **TanD** (Tangente de pérdidas del dieléctrico) = 0 (suponemos despreciable)
- **Rough** (Aspereza de la superficie del conductor) = 0mm (suponemos despreciable)

La frecuencia de referencia introducida es la frecuencia de corte del filtro.

Las dimensiones de cada línea se obtienen introduciendo la impedancia y longitud eléctrica y presionando el botón de sintetizar. Los valores calculados se muestran en la **Tabla 3**.

Componente	Impedancia característica (Z_0)	Longitud eléctrica (E Eff)	Anchura microstrip	Longitud microstrip
Línea 1	10	5.9°	16.6mm	1.05mm
Línea 2	150	27.0°	0.2mm	5.5mm
Línea 3	10	22.1°	16.6mm	3.9mm
Línea 4	150	36.9°	0.2mm	7.6mm
Línea 5	10	16.2°	16.6mm	2.9mm
Línea 6	150	9.9°	0.2mm	2.0mm

Tabla 3. Dimensiones de las líneas microstrip diseñadas

2.5) Simulación del filtro

El filtro se ha simulado con el programa *Advanced Design System* y el circuito se muestra en la **Figura 5**. Se han añadido dos tramos de líneas de 50Ω en la entrada y la salida para poder soldar los conectores SMA del filtro. Debido a esto, los resultados de la simulación diferían ligeramente de lo esperado por lo que se realizó un ajuste de las dimensiones de las líneas.

El circuito se simuló (**Figura 6**) con el método de los momentos que es más preciso que el método de simulación estándar del ADS ya que tiene en cuenta efectos parásitos en las interconexiones y pérdidas de radiación. El resultado es bastante bueno ya que se cumplen las especificaciones impuestas en el diseño:

Parámetro	Simulación	Especificaciones
Frecuencia de corte	3.05GHz	3GHz
Atenuación de 20dB	4.43GHz	4.5GHz
Pérdidas inserción	<1dB	<1dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB

Tabla 4. Resultado de la simulación del filtro con el método de los momentos

El layout se presenta en la **Figura 7**.

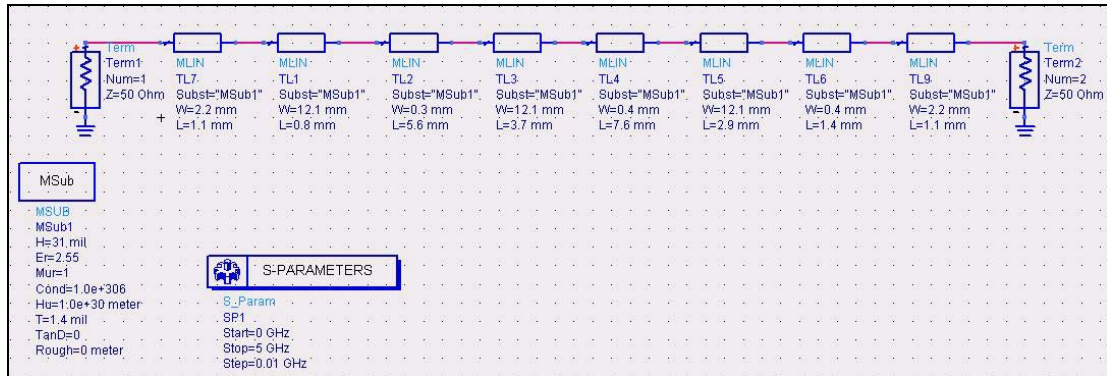


Figura 5. Filtro paso bajo microstrip *stepped-impedance* diseñado en el entorno ADS

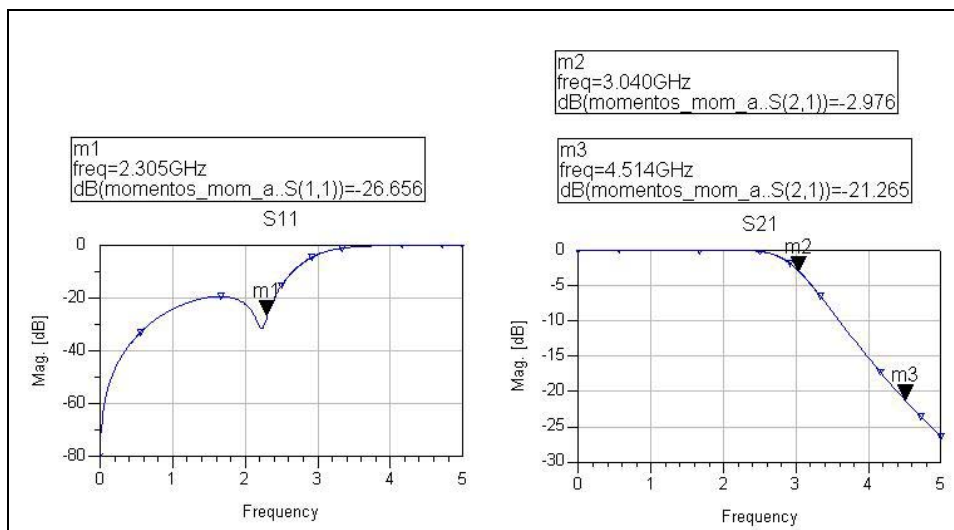


Figura 6. Resultado de la simulación del filtro paso bajo microstrip empleando el método de los momentos

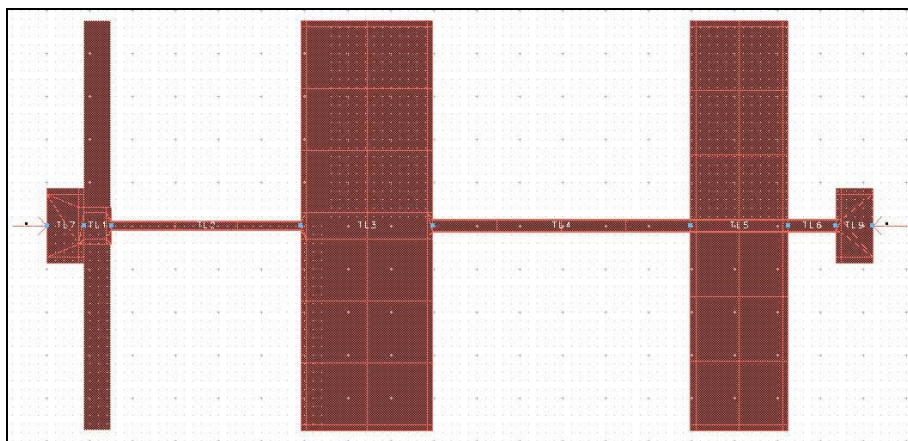


Figura 7. Layout del filtro

2.6) Estudio de la sensibilidad ante tolerancias de fabricación

Se ha realizado un estudio para determinar cómo afectan errores en el proceso de fresado de las líneas microstrip a las características del filtro. La fresa que se va a emplear es de 0.1mm de diámetro, por lo que se han realizado simulaciones variando las dimensiones de cada línea microstrip en $\pm 0.1\text{mm}$. El objetivo es el de identificar las dimensiones de las líneas que más impacto podrían producir en la respuesta del filtro en caso de un fresado impreciso.

Las dimensiones finales del filtro que se va a implementar son $W_7 = 2.2\text{mm}$, $L_7 = 1.1\text{mm}$, $W_1 = 12.1\text{mm}$, $L_1 = 0.8\text{mm}$, $W_2 = 0.2\text{mm}$, $L_2 = 5.6\text{mm}$, $W_3 = 12.1\text{mm}$, $L_3 = 3.7\text{mm}$, $W_4 = 0.4\text{mm}$, $L_4 = 7.6\text{mm}$, $W_5 = 12.1\text{mm}$, $L_5 = 2.9\text{mm}$, $W_6 = 0.4\text{mm}$, $L_6 = 1.4\text{mm}$, $W_9 = 2.2\text{mm}$ y $L_9 = 1.1\text{mm}$. El análisis que se va a realizar consiste en determinar el efecto que se produce en la respuesta del filtro al variar una de las dimensiones de cada línea dejando el resto sin modificar.

1) Modificando las anchuras

	Valores medidos			Especificaciones		
	S ₁₁	S ₂₁ @4.5GHz	Frecuencia de corte	S ₁₁	S ₂₁ @4.5GHz	Frecuencia de corte
W ₇ = 2.1mm	< -15dB	-21.3dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₇ = 2.3mm	< -15dB	-21.4dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₁ = 12.2mm	< -15dB	-21.3dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₁ = 12mm	< -15dB	-21.3dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₂ = 0.3mm	< -15dB	-20dB	3.1GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₂ = 0.1mm	< -15dB	-23.2dB	2.9GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₃ = 12mm	< -15dB	-21dB	3.1GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₃ = 12.2mm	< -15dB	-21.3dB	3.1GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₄ = 0.3mm	< -15dB	-22.1dB	2.9GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₄ = 0.5mm	< -15dB	-20dB	3.1GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₅ = 12mm	< -15dB	-21dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₅ = 12.2mm	< -15dB	-21.1dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₆ = 0.3mm	< -15dB	-21.1dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₆ = 0.5mm	< -15dB	-21.2dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₉ = 2.1mm	< -15dB	-21.1dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
W ₉ = 2.3mm	< -15dB	-21.1dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz

Tabla 5. Análisis de sensibilidad modificando las anchuras de las líneas

2) **Modificando las longitudes**

	Valores medidos			Especificaciones		
	S ₁₁	S ₂₁ @4.5GHz	Frecuencia de corte	S ₁₁	S ₂₁ @4.5GHz	Frecuencia de corte
L ₇ = 1mm	< -15dB	-21dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₇ = 1.2mm	< -15dB	-21.4dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₁ = 0.7mm	< -15dB	-20.9dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₁ = 0.9mm	< -15dB	-21.3dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₂ = 5.5mm	< -15dB	-21dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₂ = 5.7mm	< -15dB	-21.2dB	2.9GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₃ = 3.8mm	< -15dB	-20.9dB	3.1GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₃ = 4mm	< -15dB	-20.9dB	3.1GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₄ = 7.5mm	< -15dB	-21.2dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₄ = 7.7mm	< -15dB	-21dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₅ = 2.8mm	< -15dB	-21.5dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₅ = 3mm	< -15dB	-21dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₆ = 1.3mm	< -15dB	-21.1dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₆ = 1.5mm	< -15dB	-21.dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₉ = 1mm	< -15dB	-21dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz
L ₉ = 1.2mm	< -15dB	-21.2dB	3GHz	< -15dB	-20dB	3GHz

Tabla 6. Análisis de sensibilidad modificando las longitudes de las líneas

A la vista de estos resultados se concluye el filtro es bastante insensible ante tolerancias de fabricación.

2.7) Construcción del filtro

2.7.1 Diseño de la caja

El filtro tiene una longitud total de 24.2mm y una anchura de 12.1mm. Se va a montar dentro de una caja de dimensiones 25mm(largo), 15mm(ancho) y 10mm(alto). El diseño en Autocad se muestra en la **Figura 8**. En la **Figura 9** se puede ver el aspecto final del filtro. El material empleado para fabricar la caja fue latón, lo que permitió soldar el plano de masa del filtro al suelo de la caja.

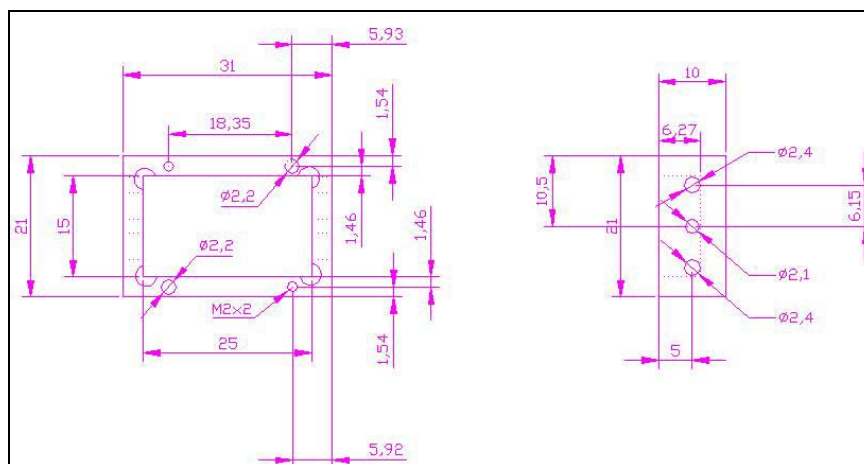


Figura 8. Plano en Autocad de la caja del filtro

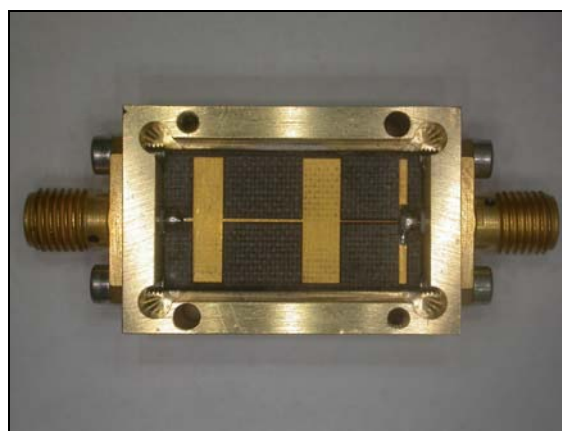


Figura 9. Aspecto final del filtro

2.7.2 Cálculo de la frecuencia de resonancia de la caja

La frecuencia de resonancia para el modo TE₁₀, que es el dominante en una cavidad rectangular tiene la expresión [1]

$$f = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2}$$

donde a es la anchura de la caja y d el largo. Para la caja que nos ocupa se obtiene una frecuencia de resonancia de 7.3GHz, bastante mayor que las frecuencias de paso del filtro, por lo que su efecto se espera sea despreciable.

2.8) Medida del filtro con el analizador de redes

Se han fabricado dos filtros cuya respuesta es muy parecida y se muestra en la **Figura 10**. La comparación entre las medidas con un analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz ZVK y la simulación con el método de los momentos del programa ADS se presentan en la **Figura 11**. Como se puede apreciar, los resultados de la simulación y las medidas con el analizador de redes son muy parecidos.

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Frecuencia de corte	3.16GHz	3GHz
Atenuación de 20dB	4.56GHz	4.5GHz
Pérdidas inserción	<1dB	<1dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB

Tabla 7. Comparación entre los resultados de la medida y las especificaciones

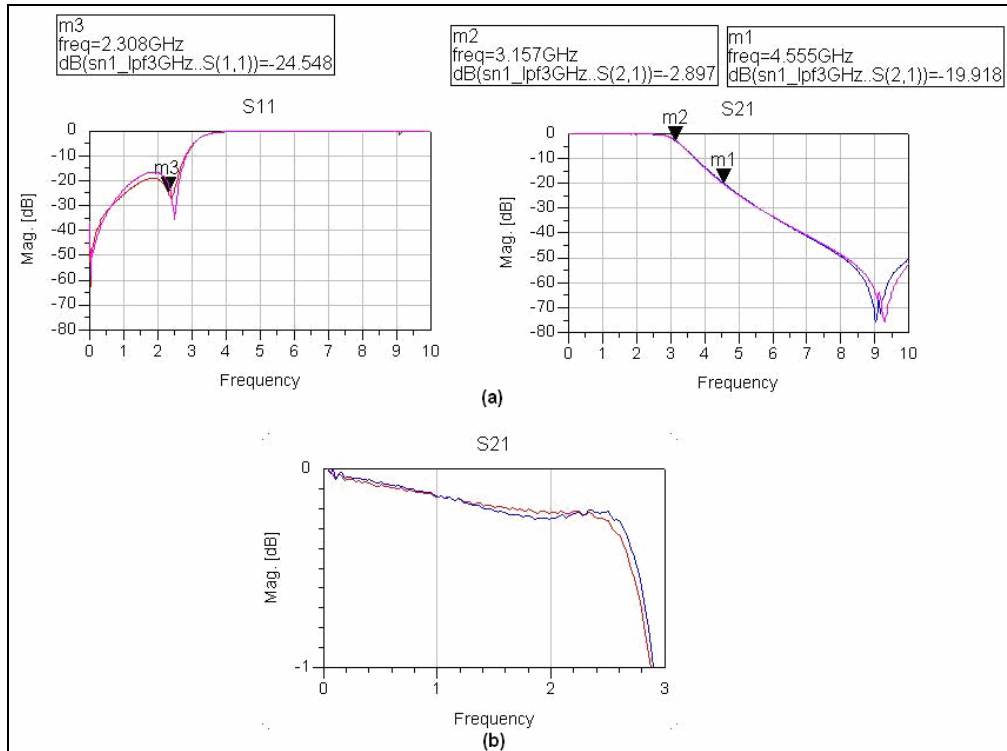


Figura 10. Resultados de la medida de los filtros SN#1 (azul) y SN#2 (rojo) con el analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz ZVK (a) reflexión y transmisión y (b) rizado en la banda pasante

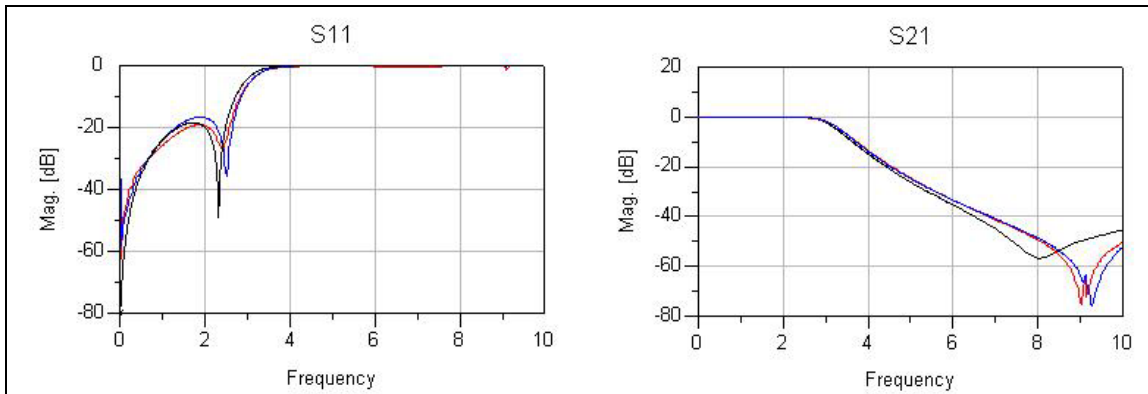


Figura 11. Comparación entre los resultados de la simulación con el método de los momentos (negro) y las medidas con el analizador vectorial de los filtros SN#1 (azul) y SN#2 (rojo)

III. Diseño de un filtro paso banda a 12GHz de líneas acopladas empleando tecnología microstrip

En este caso se hizo uso de la herramienta de ayuda al diseño de filtros de ADS “Passive Circuit DG – Filters”. El esquemático del circuito se presenta en la **Figura 12** y el layout asociado en la **Figura 13**. Cuando se generó el layout, la herramienta dispuso las líneas de forma incorrecta, por lo que se tuvieron que redistribuir y posteriormente unir empleando la instrucción Edit -> Modify -> Join. Las especificaciones de diseño del filtro son:

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Banda de paso 3dB	10.9- 12.75GHz
Pérdidas de inserción	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	10-14GHz
Impedancia	50Ω

Tabla 8. Especificaciones del filtro a diseñar

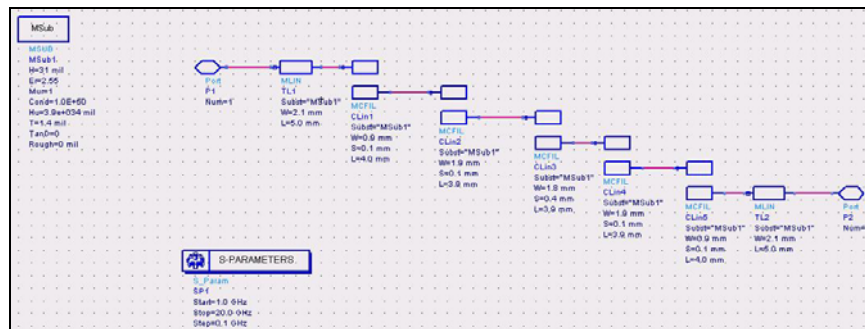


Figura 12. Filtro paso banda de 12 GHz microstrip diseñado en el entorno ADS

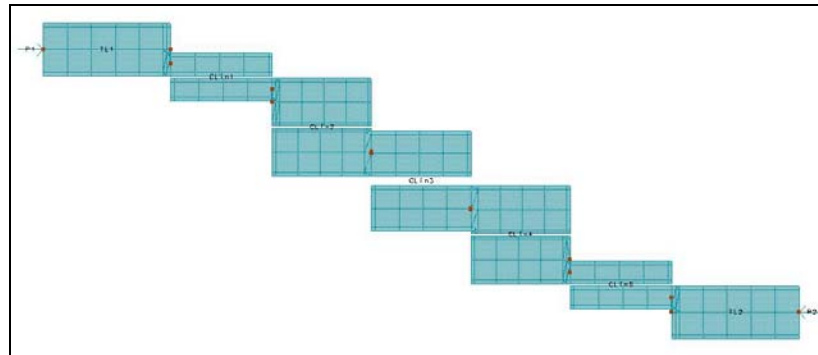


Figura 13. Layout del filtro

Se han montado dos filtros (**Figura 14**) en sendas cajas aisladas con ferrita, ya que la frecuencia de resonancia de las cajas perturbaba la respuesta del filtro. Se construyó una caja de aluminio y el plano de masa quedó pegado con epoxy conductor. El sustrato empleado fue también Taconic TLX-8.

Se llevó a cabo un estudio de sensibilidad similar al descrito en el apartado 2.6 para el filtro paso bajo de 3GHz y se concluyó que las separaciones entre las líneas acopladas son las dimensiones más críticas. El proceso de fabricación fue suficientemente preciso y no influyó significativamente en la respuesta del filtro.

La comparación entre los resultados de la simulación con el método de los momentos y las medidas hechas con el analizador de redes se presenta en la **Figura 15**. Como se puede observar, la respuesta para los dos filtros es muy similar.

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Banda de paso 3dB	10.8 – 13.5GHz	10.9- 12.75GHz
Pérdidas de inserción	<1.5dB	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	10-14.5GHz	10-14GHz

Tabla 9. Comparación entre los resultados de la medida y las especificaciones

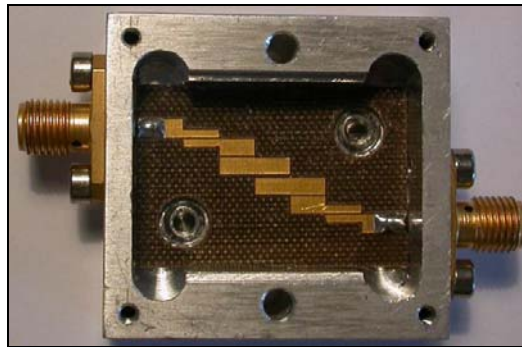


Figura 14. Aspecto final del filtro

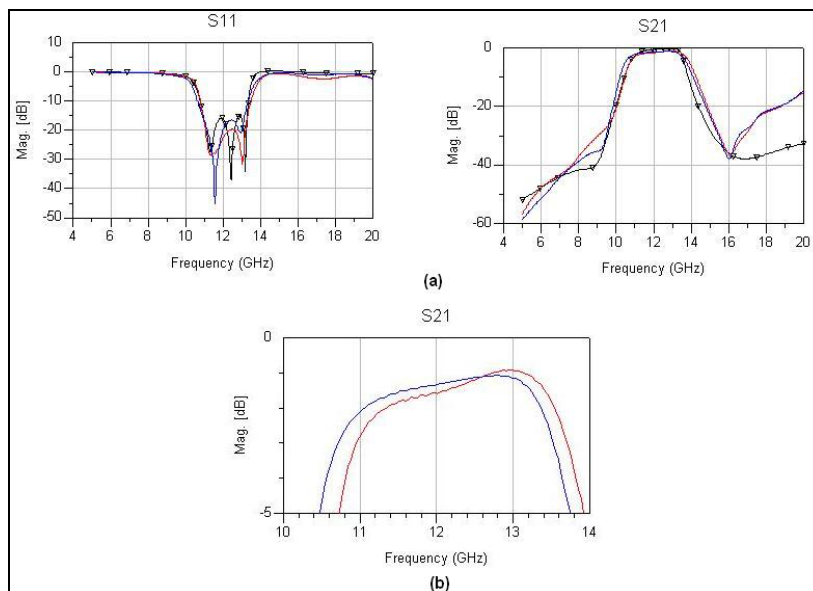


Figura 15. Comparación de los resultados de la medida de los filtros SN#1 (azul) y SN#2 (rojo) con el analizador vectorial de redes y la simulación con el método de los momentos (a) reflexión y transmisión y (b) rizado en la banda pasante

IV. Diseño de un filtro paso banda a 5GHz de líneas acopladas empleando tecnología microstrip

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Banda de paso 3dB	5.2- 6GHz
Pérdidas de inserción	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	4.7-6.5GHz
Impedancia	50Ω

Tabla 10. Especificaciones del filtro a diseñar

4.1) Diseño

El diseño de los filtros se ha hecho con el programa ADS empleando *SmartComponents* de forma análoga a los diseños expuestos previamente.

El filtro finalmente diseñado se muestra en la **Figura 16**. Las líneas TL1 y TL2 son de 50Ω. El sustrato empleado fue Taconic TLX-8.

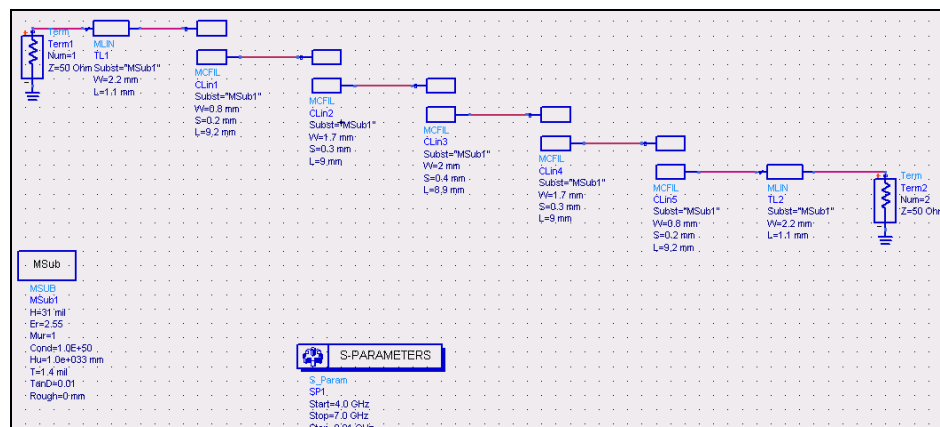


Figura 16. Filtro paso banda diseñado de 5.2GHz – 6GHz

4.2) Simulación

El resultado de la simulación del filtro empleando el método de los momentos se presenta en la **Figura 17**. Como se puede apreciar, los coeficientes de reflexión para toda la banda de paso están por de debajo de -15dB. Para conseguir esto se tuvo que ampliar ligeramente el ancho de banda 3dB del filtro, que es ahora de 5GHz a 6.1GHz.

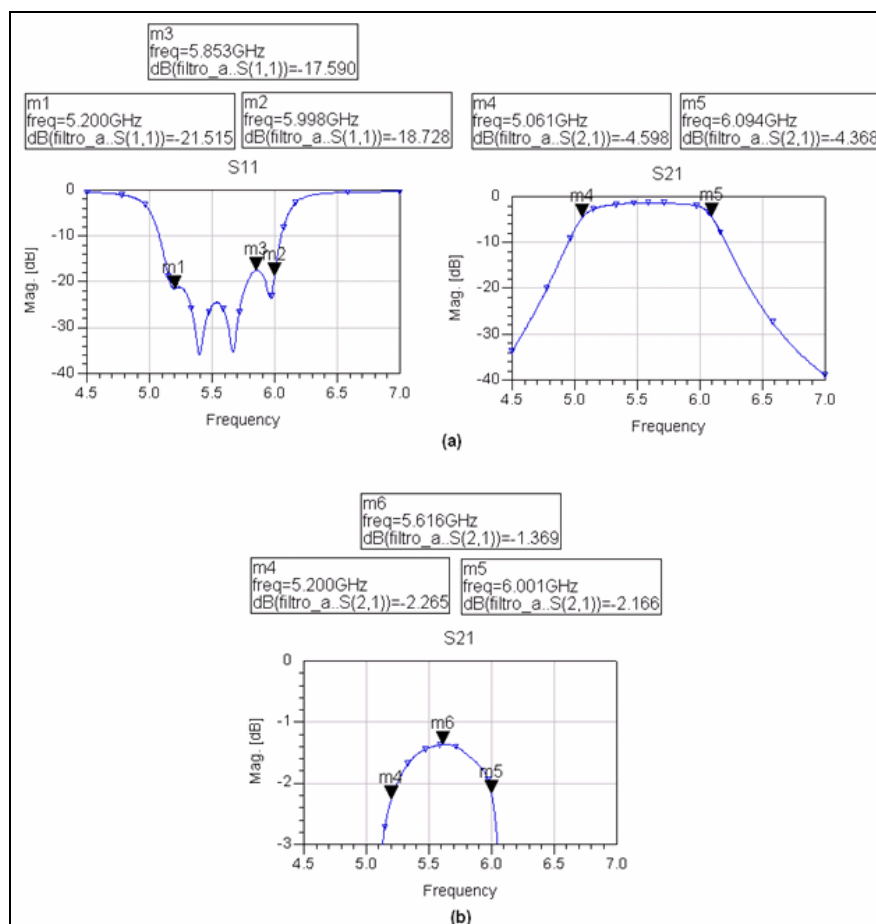


Figura 17. Resultado de la simulación del filtro con el método de los momentos.

(a) Adaptación y transmisión (b) Rizado en la banda pasante

Los filtros paso banda microstrip empleando la tecnología de líneas acopladas se caracterizan por presentar otras bandas de paso a múltiplos de la frecuencia central del

filtro, que habrán de tenerse en cuenta al integrarlos en un sistema de radiofrecuencia (Figura 18).

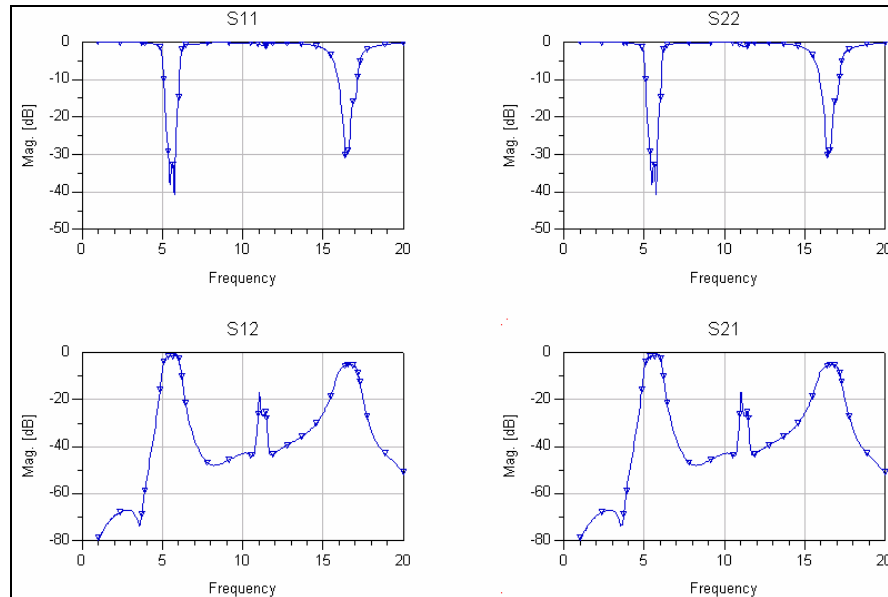


Figura 18. Bandas pasantes a otras frecuencias

4.3) Estudio de la sensibilidad ante tolerancias de fabricación

El objetivo del estudio de la sensibilidad es el de identificar las dimensiones de las líneas microstrip integrantes del filtro que más influyen en su comportamiento global, y que por tanto una modificación (debido por ejemplo a tolerancias en el proceso de fabricación) de sus valores durante el fresado podría alterar sustancialmente la respuesta del filtro.

Se han realizado simulaciones del filtro alterando las dimensiones de sus líneas y estudiando como se modificaba su respuesta. Las conclusiones a las que se han llegado es que un factor crítico en la respuesta del filtro es el espaciamiento entre las líneas acopladas, por lo que se ha de tener un especial cuidado en que en la implementación final del filtro los valores del diseño se respeten. También se ha observado una fuerte influencia de la anchura y longitud de la línea *CLIN3* (Figura 16) en la respuesta del filtro.

4.4) Montaje y medida del filtro

Se ha montado el filtro en una caja prototipo como la mostrada en la **Figura 19**. Posteriormente se ha medido con un analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz ZVK. Los resultados obtenidos son muy similares a los de la simulación con el método de los momentos y se presentan en la **Figura 20**. En la **Tabla 11** se resumen las características del filtro.

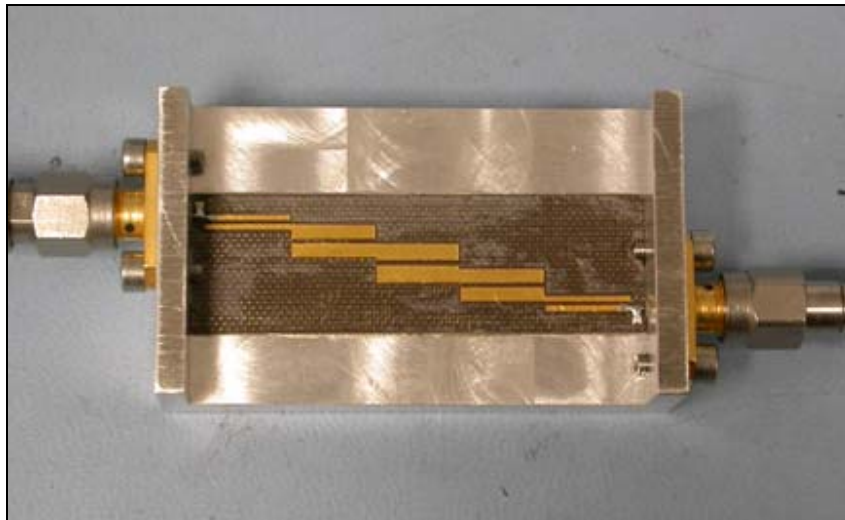


Figura 19. Caja prototipo diseñada para medir el filtro

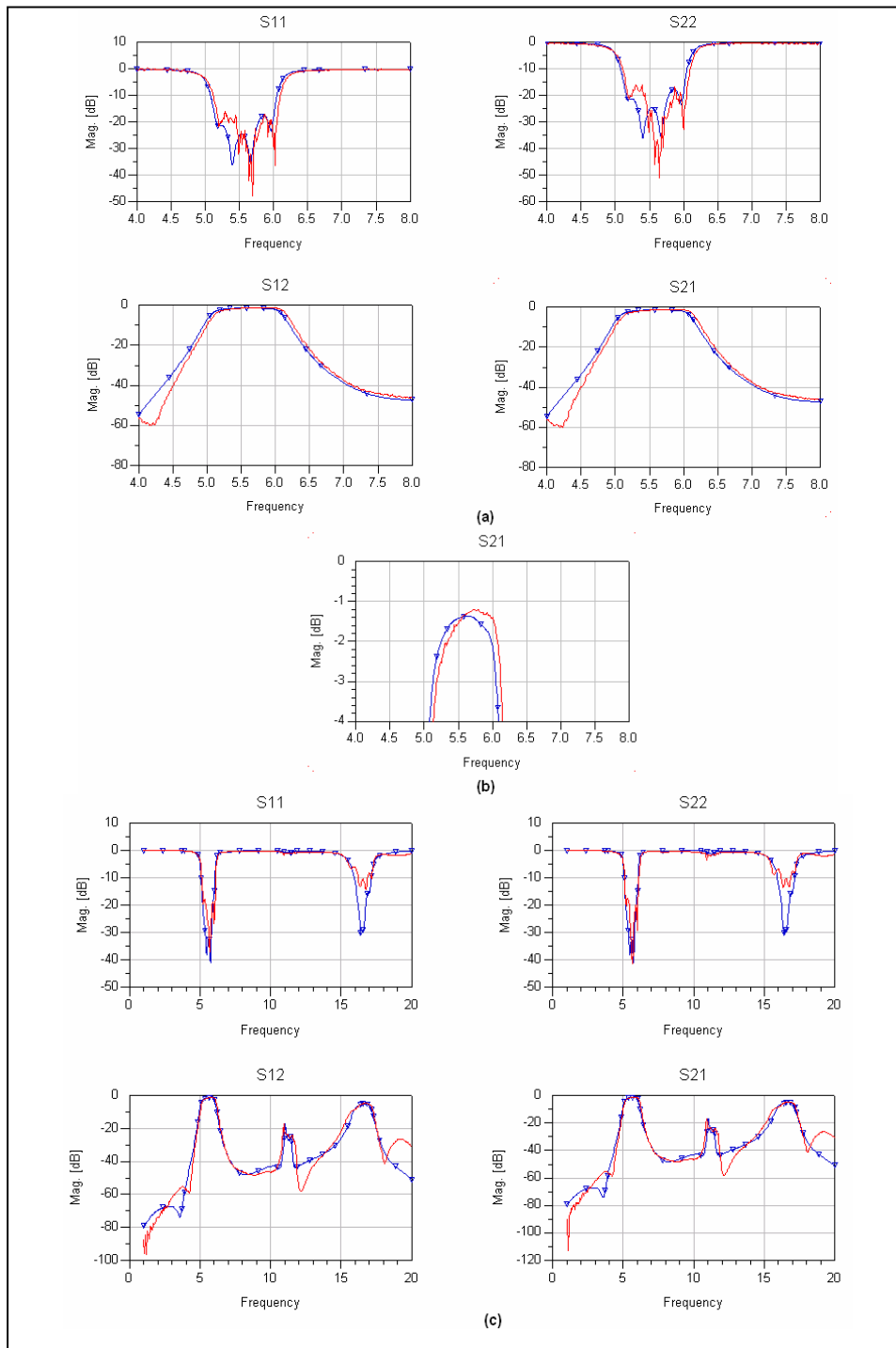


Figura 20. Comparación entre la simulación del filtro (azul) con las medidas del analizador de redes (rojo)
(a) entre 4 y 8 GHz (b) banda pasante (c) a otras frecuencias

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Banda de paso 3dB	5.2 – 6.1GHz	5.2- 6GHz
Pérdidas de inserción	1.3 a 2.2 dB	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	4.7-6.5GHz	4.7-6.5GHz

Tabla 11. Comparación entre los resultados de la medida y las especificaciones

V. Diseño de un filtro paso banda a 4GHz de líneas acopladas empleando tecnología microstrip

Parámetro	Valor
Banda de paso 3dB	3.85 – 4GHz
Pérdidas de inserción	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	3.5 – 4.5GHz
Impedancia	50Ω

Tabla 12. Especificaciones del filtro a diseñar

5.1) Diseño

El diseño de los filtros se ha hecho con el programa ADS empleando *SmartComponents* de forma análoga a los diseños expuestos previamente.

El filtro finalmente diseñado se muestra en la **Figura 21**. Las líneas TL1 y TL2 son de 50Ω. El sustrato empleado fue Taconic TLX-8.

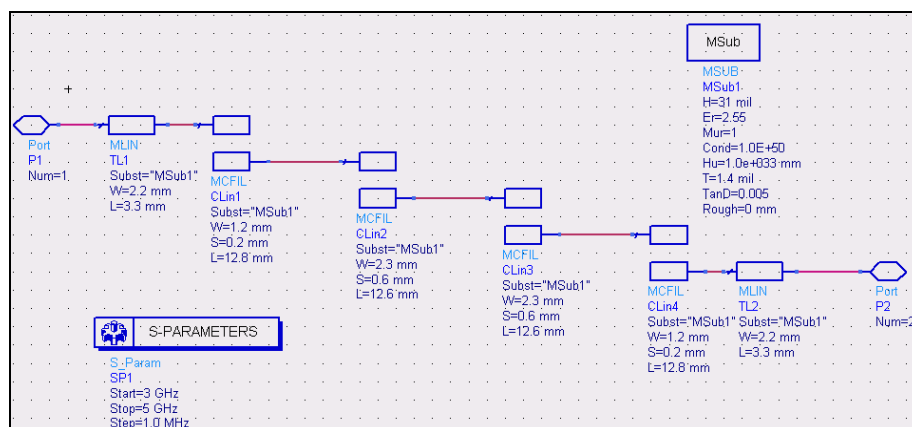


Figura 21. Filtro paso banda diseñado de 3.85GHz – 4GHz

5.2) Simulación

El resultado de la simulación del filtro empleando el método de los momentos se presenta en la **Figura 22**. Como se puede apreciar, los coeficientes de reflexión para toda la banda de paso están por de debajo de -15dB. Para conseguir esto se tuvo que ampliar ligeramente el ancho de banda 3dB del filtro, que es ahora de 3.7GHz a 4.2GHz.

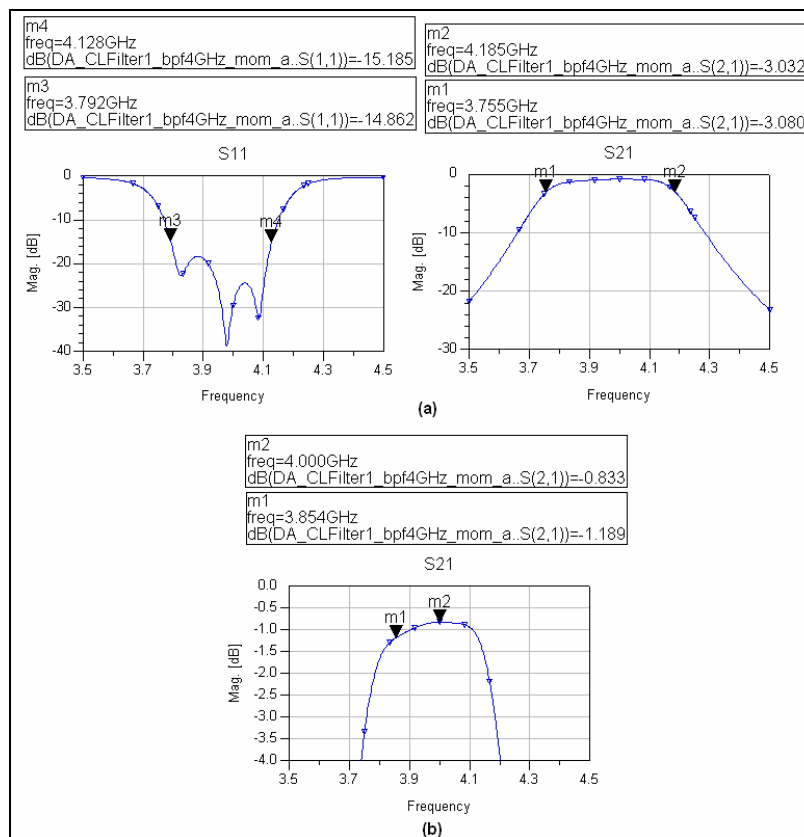


Figura 22. Resultado de la simulación del filtro con el método de los momentos.

(a) Adaptación y transmisión (b) Rizado en la banda pasante

Los filtros paso banda microstrip empleando la tecnología de líneas acopladas se caracterizan por presentar otras bandas de paso a múltiplos de la frecuencia central del filtro, que habrán de tenerse en cuenta al integrarlos en un sistema de radiofrecuencia (**Figura 23**).

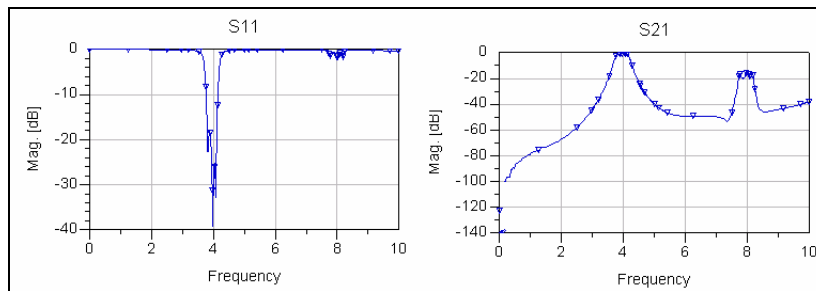


Figura 23. Bandas pasantes a otras frecuencias

5.3) Estudio de la sensibilidad ante tolerancias de fabricación

El objetivo del estudio de la sensibilidad es el de identificar las dimensiones de las líneas microstrip integrantes del filtro que más influyen en su comportamiento global, y que por tanto una modificación (debido por ejemplo a tolerancias en el proceso de fabricación) de sus valores durante el fresado podría alterar sustancialmente la respuesta del filtro.

Se han realizado simulaciones del filtro alterando las dimensiones de sus líneas y estudiando como se modificaba su respuesta. Las conclusiones a las que se han llegado es que un factor crítico en la respuesta del filtro es el espaciamiento entre las líneas acopladas, por lo que se ha de tener un especial cuidado en que en la implementación final del filtro los valores del diseño se respeten.

5.4) Montaje y medida del filtro

Se ha montado el filtro en una caja prototipo como la mostrada en la **Figura 24**. Posteriormente se ha medido con un analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz ZVK. Los resultados obtenidos son muy similares a los de la simulación con el método de los momentos y se presentan en la **Figura 25**. En la **Tabla 13** se resumen las características del filtro.

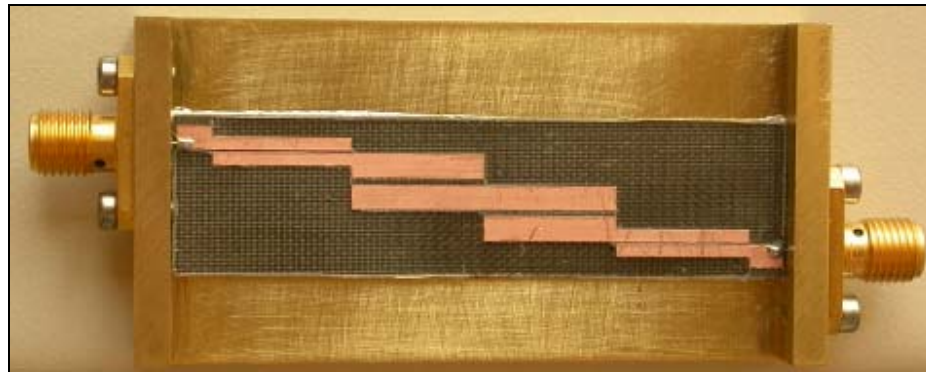


Figura 24. Caja prototipo diseñada para medir el filtro

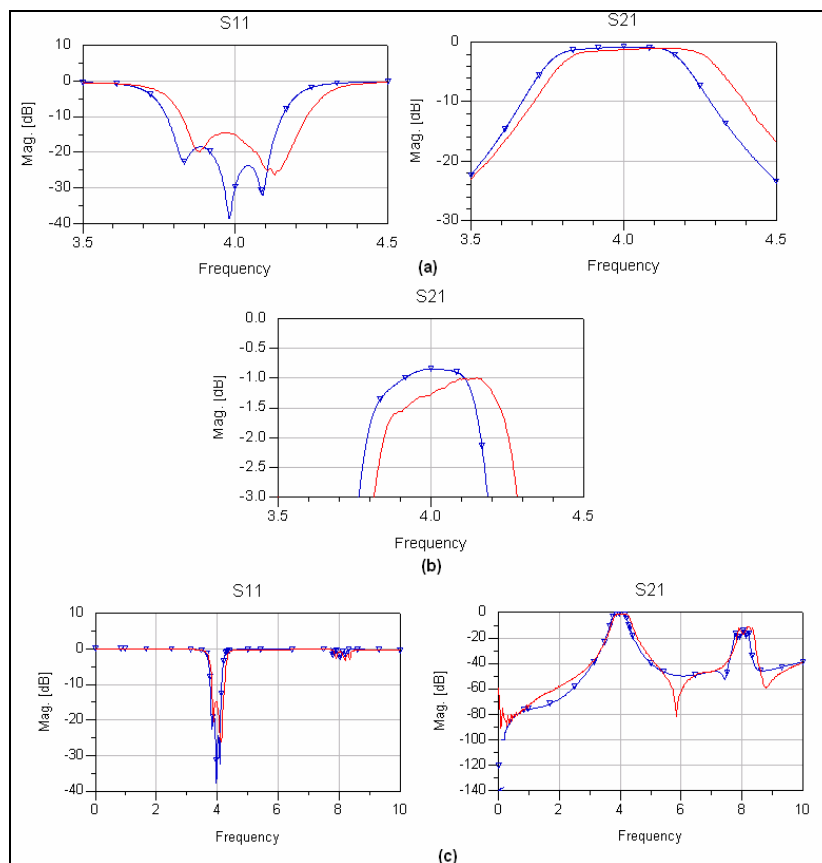


Figura 25. Comparación entre la simulación del filtro (azul) con las medidas del analizador de redes (rojo) (a) entre 3.5 y 4.5 GHz (b) banda pasante (c) a otras frecuencias

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Banda de paso 3dB	3.8 – 4.3GHz	3.85 – 4GHz
Pérdidas de inserción	1 a 1.5 dB	<1.5dB
Pérdidas retorno	< -14.5dB	< -15dB
Banda de rechazo a 20dB	3.5 – 4.6GHz	3.5 – 4.5GHz

Tabla 13. Comparación entre los resultados de la medida y las especificaciones

VI. Diseño de un filtro paso banda a 920MHz con stubs

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Banda de paso 3dB	0.87 – 1GHz
Pérdidas de inserción	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	0.5 – 1.5GHz
Impedancia	50Ω

Tabla 14. Especificaciones del filtro a diseñar

6.1) Diseño

El diseño de los filtros se ha hecho con el programa ADS empleando *SmartComponents* de forma análoga a los diseños expuestos previamente.

El filtro finalmente diseñado se muestra en la **Figura 26**. Las líneas TL4 y TL5 son de 50Ω. Al igual que en los diseños previos, el sustrato empleado fue Taconic TLX-8.

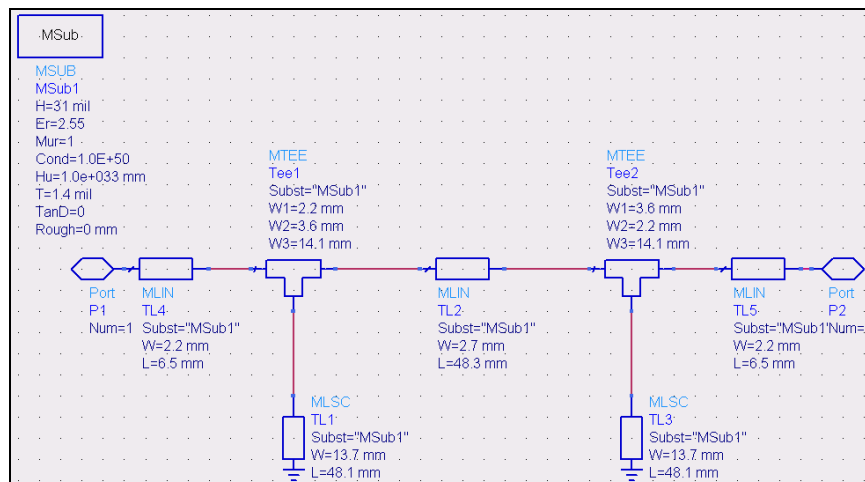


Figura 26. Filtro paso banda diseñado de 3.85GHz – 4GHz

6.2) Simulación

El resultado de la simulación del filtro empleando el método de los momentos se presenta en la **Figura 27**. Como se puede apreciar, los coeficientes de reflexión para toda la banda de paso están por de debajo de -15dB. Para conseguir esto se tuvo que ampliar ligeramente el ancho de banda 3dB del filtro, que es ahora de 780MHz a 1.15GHz.

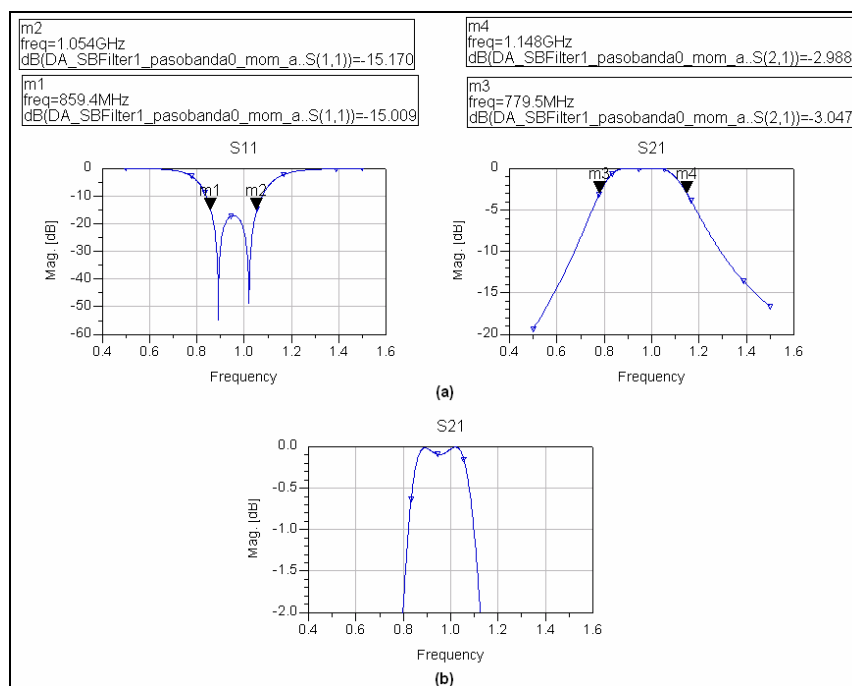


Figura 27. Resultado de la simulación del filtro con el método de los momentos.

(a) Adaptación y transmisión (b) Rizado en la banda pasante

Los filtros paso banda microstrip empleando la tecnología de líneas acopladas se caracterizan por presentar otras bandas de paso a múltiplos de la frecuencia central del filtro, que habrán de tenerse en cuenta al integrarlos en un sistema de radiofrecuencia (**Figura 28**).

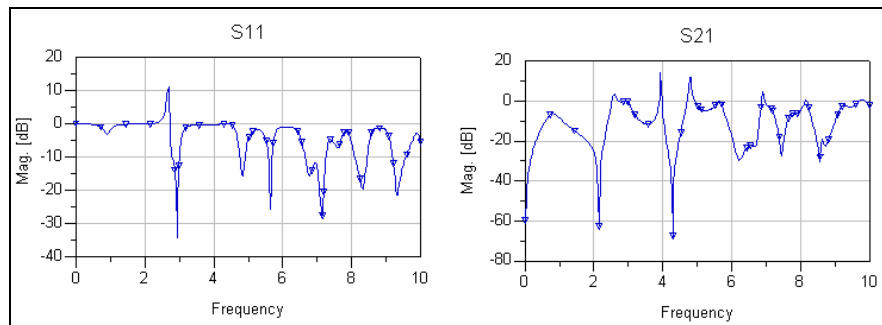


Figura 28. Bandas pasantes a otras frecuencias

6.3) Estudio de la sensibilidad ante tolerancias de fabricación

El objetivo del estudio de la sensibilidad es el de identificar las dimensiones de las líneas microstrip integrantes del filtro que más influyen en su comportamiento global, y que por tanto una modificación (debido por ejemplo a tolerancias en el proceso de fabricación) de sus valores durante el fresado podría alterar sustancialmente la respuesta del filtro.

Se han realizado simulaciones del filtro alterando las dimensiones de sus líneas y estudiando como se modificaba su respuesta. Las conclusiones a las que se han llegado es que un factor crítico en la respuesta del filtro es la anchura de la línea TL2 y la longitud y posición de la tierra en los stubs.

6.4) Montaje y medida del filtro

Se ha montado el filtro en una caja prototipo como la mostrada en la **Figura 29**. Posteriormente se ha medido con un analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz ZVK. Los resultados obtenidos son muy similares a los de la simulación con el método de los momentos y se presentan en la **Figura 30**. En la **Tabla 15** se resumen las características del filtro.

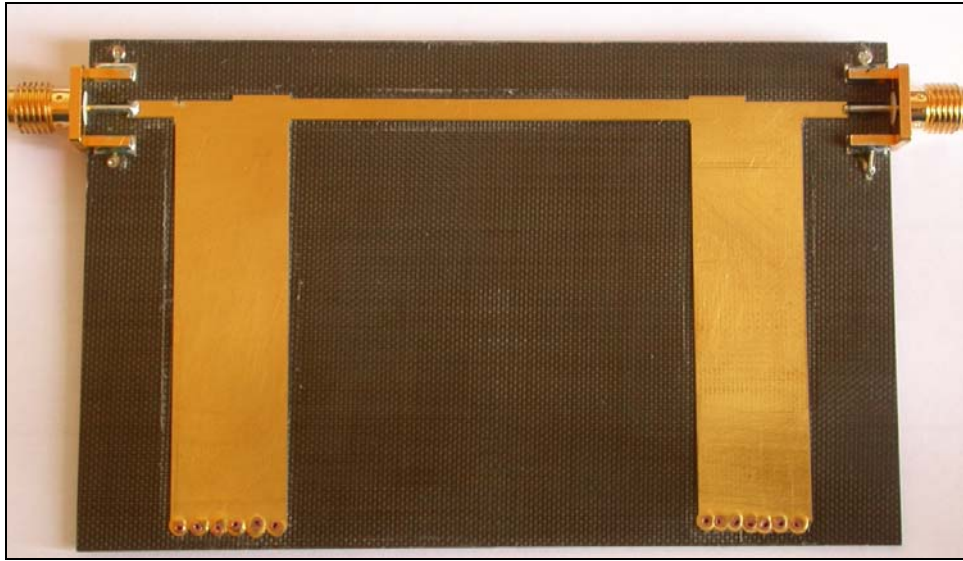


Figura 29. Prototipo diseñado para medir el filtro

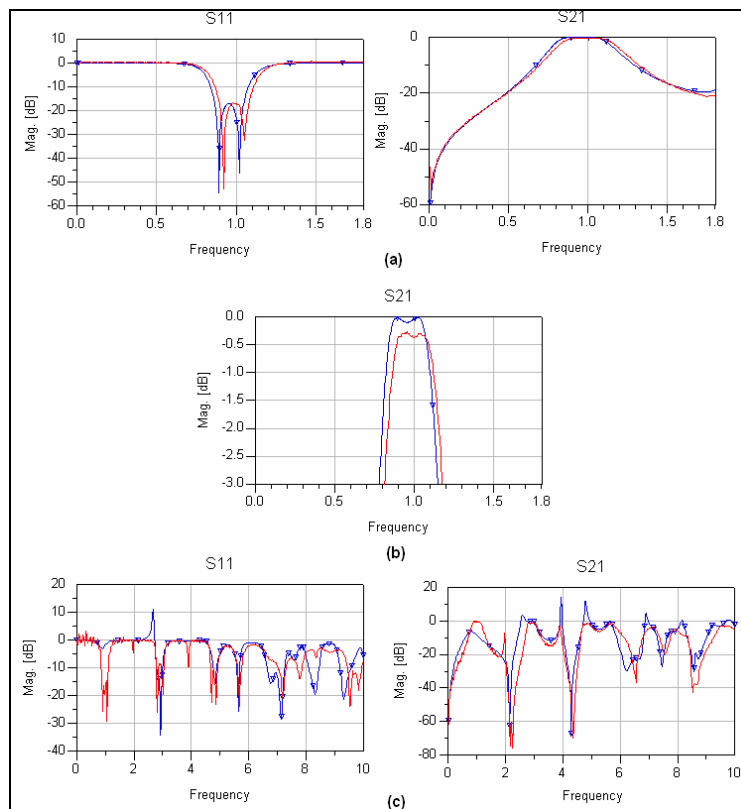


Figura 30. Comparación entre la simulación del filtro (azul) con las medidas del analizador de redes (rojo) (a) entre 0 y 1.8 GHz (b) banda pasante (c) a otras frecuencias

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Banda de paso 3dB	0.81 – 1.2GHz	0.87 – 1GHz
Pérdidas de inserción	<1 dB	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	0.5 – 1.6GHz	0.5 – 1.5GHz

Tabla 15. Comparación entre los resultados de la medida y las especificaciones

VII. Tablas resumen

Filtro paso bajo de 3GHz:

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Frecuencia de corte	3.16GHz	3GHz
Atenuación de 20dB	4.56GHz	4.5GHz
Pérdidas inserción	<1dB	<1dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB

Filtro paso banda de 12GHz:

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Banda de paso 3dB	10.8 – 13.5GHz	10.9- 12.75GHz
Pérdidas de inserción	<1.5dB	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	10-14.5GHz	10-14GHz

Filtro paso banda de 5GHz:

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Banda de paso 3dB	5.2 – 6.1GHz	5.2- 6GHz
Pérdidas de inserción	1.3 a 2.2 dB	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	4.7-6.5GHz	4.7-6.5GHz

Filtro paso banda de 4GHz:

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Banda de paso 3dB	3.8 – 4.3GHz	3.85 – 4GHz
Pérdidas de inserción	1 a 1.5 dB	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-13.5dB	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	3.5 – 4.6GHz	3.5 – 4.5GHz

Filtro paso banda de 920MHz:

<i>Parámetro</i>	<i>Medida</i>	<i>Especificaciones</i>
Banda de paso 3dB	0.81 – 1.2GHz	0.87 – 1GHz
Pérdidas de inserción	<1 dB	<1.5dB
Pérdidas retorno	<-15dB	<-15dB
Banda de rechazo a 20dB	0.5 – 1.6GHz	0.5 – 1.5GHz

VIII. Bibliografía

[1] David M. Pozar, *Microwave Engineering Second Edition*, John Wiley & Sons Inc. 1998.