

FILTRO PASABAJO PARA FRECUENCIAS DE MICROONDAS

Iván Ney Alvizuri Romani
e-mail: ivann@unmsm.edu.pe

*Profesor de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos,
Lima, Perú*

Resumen: Este artículo muestra las etapas de diseño de filtros pasabajo para frecuencias de microondas. Se presenta los conceptos básicos, luego se analiza las características y se dan recomendaciones a través de un diseño práctico.

Abstrac: This paper shows the design stages of lowpass filters for microwave frequencies. It presents the basic concepts, then is analyzed the characteristics and gives recommendation through a practical design.

Palabras claves: Filtro pasabajo, microondas, Microstrip, Polinomio Chebyshev.

I. INTRODUCCIÓN

La red de alimentación en los circuitos con inyección de voltaje en dispositivos de microondas, es una forma de filtro pasabajo donde el diseño se centra en la separación de las frecuencias de microondas y de las frecuencias d.c.. Para nuestro caso es necesario la separación de la frecuencia intermedia (es decir 100MHz) de las frecuencias de microondas (o sea 1.5GHz), para esto se usa características bien precisas para diseñar los filtros.

A continuación se presentan las características de atenuación vs frecuencias de los filtros pasabajos[Mattaei, etal., 1964]:

- *Características del filtro pasabajo ideal (figura1)*, que no tiene atenuación debajo de una frecuencia en particular y tiene una atenuación infinita para frecuencias mayores a ésta.

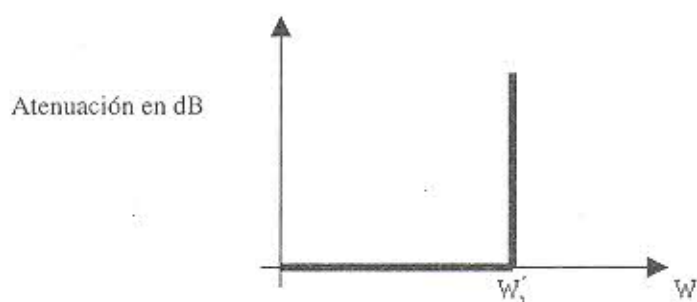


Figura 1 - Filtro pasabajo ideal.

- Respuesta de un filtro Butterworth ó filtro de máxima respuesta plana de dos secciones (figura 2), con una frecuencia de corte definida como la frecuencia de atenuación de 3dB.

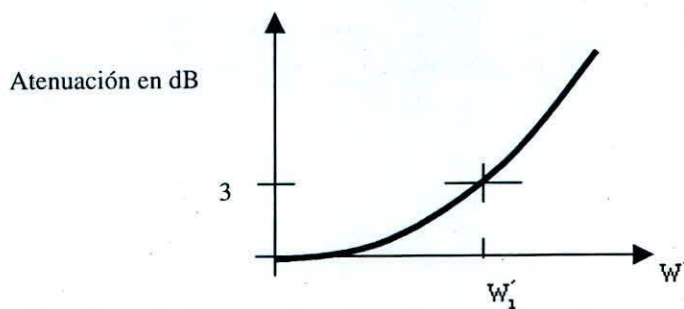


Figura 2 - Filtro Butterworth

- Característica de un filtro Chebyshev (figura 3) de dos secciones de 1.0dB de equi-ripple y con una frecuencia de corte definido por la frecuencia de atenuación 1.0dB en el incremento de atenuación en la stopband (banda de frecuencia de parada).

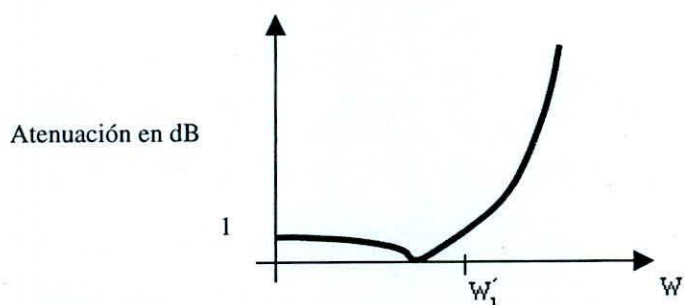


Figura 3 - Filtro Chebychev

- Respuesta de un filtro Chebyshev de tres secciones (figura 4) con 1.0dB de equi-ripple, en el cual se observa un incremento más rápido en la stopband.

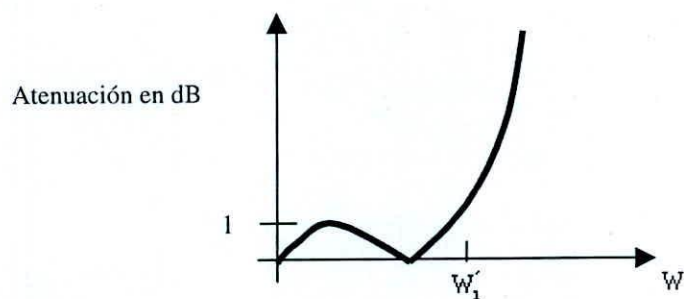


Figura 4 - Filtro Chebychev de tres secciones.

La figura 5 muestra un filtro pasabajo que se utiliza en los circuitos de microondas

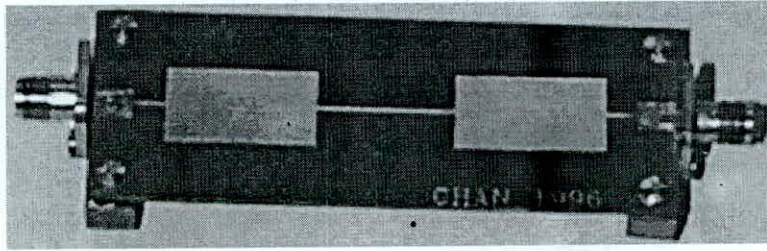


Figura 5 - Filtro pasabajo en microondas.

II. PROTOTIPO DE FILTRO PASABAJO DE MÁXIMA RESPUESTA PLANA

Los valores prototipo de los filtros pasabajo [Mattaei, et al., 1964], k_1 a k_n dan un filtro pasabajo con 3.01dB de atenuación a una frecuencia de corte de 1 radian/segundo. Las cargas terminales, k_0 y k_{n+1} están en siemens(mho) ó en ohmios como se muestra la figura 6, dependiendo como éstas se conectan en la estructura del filtro, esto es, como un elemento paralelo ó serie.

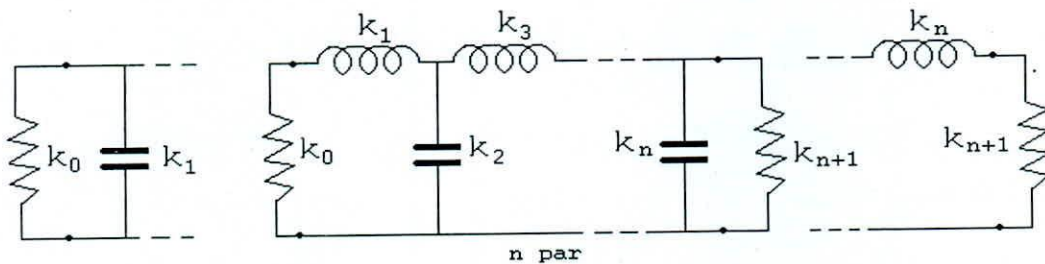


Figura 6 - Parámetros k_0 y k_{n+1}

Para filtros de máxima respuesta plana, cualquier suceso en la respuesta plana entre los límites de la pasabanda causará ripples que aparecerán en la pasabanda.

La característica de ganancia del filtro es dada por:

$$P_{salida} = \frac{1}{1 + \left(\frac{w'}{w_1}\right)^{2n}} * P_{promedio} \quad (1)$$

Expresado como una pérdida en dB:

$$L = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \left(\frac{w'}{w_1}\right)^{2n} \right\} \quad (2)$$

La atenuación fuera de banda es originada por reflexiones del filtro. Esto debe ser tomado en cuenta en todo sistema de diseño.

Las características de pérdida de los filtros prototipos, para determinar el número de elementos que son necesarios, se muestra en la figura 7, la frecuencia 3dB y el número de elementos, **n**, puede ser determinado conociendo la atenuación requerida en las frecuencias de pasabanda y stopbanda.

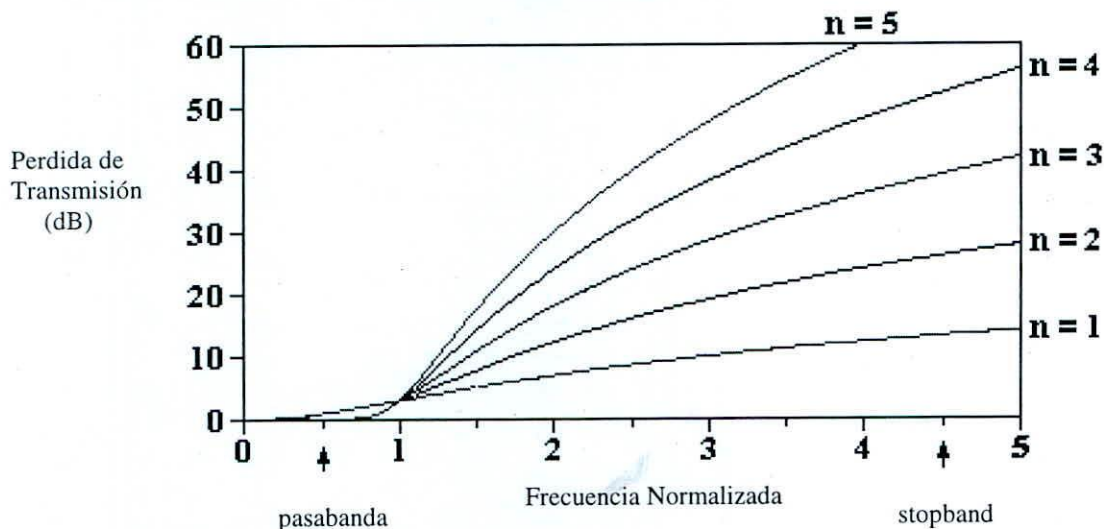


Figura 7 – Caraterísticas de filtros prototipos

Los coeficientes prototipos pueden ser evaluados con la expresión 3 :

$$k_K = 2 * \text{sen} \left\{ \frac{(2K - 1)\pi}{2n} \right\} \quad K = 1, 2, \dots, n \tag{3}$$

Con las cargas terminales k_0 y k_{n+1} , ambas iguales a la unidad. La tabla 1, muestra los valores de los coeficientes prototipos para algunos valores de n.

Tabla 1 – coeficientes de k para diferentes valores de n

n	1	2	3	4	5
k_1	2.0000	1.4142	1.0000	0.7654	0.6180
k_2		1.4142	2.0000	0.8478	1.6180
k_3			1.0000	1.8478	2.0000
k_4				0.7654	1.6180
k_5					0.6180

2.1 Filtro prototipo pasabajo - respuesta de igual ripple (chebyshev)

En la figura 8 se muestra la comparación entre las características de dos filtros pasabajos de tres secciones, una con una respuesta máxima plana y otro con una respuesta chebyshev. Para propósitos comparativos, cada filtro está normalizado a la misma frecuencia de atenuación 0.05dB.

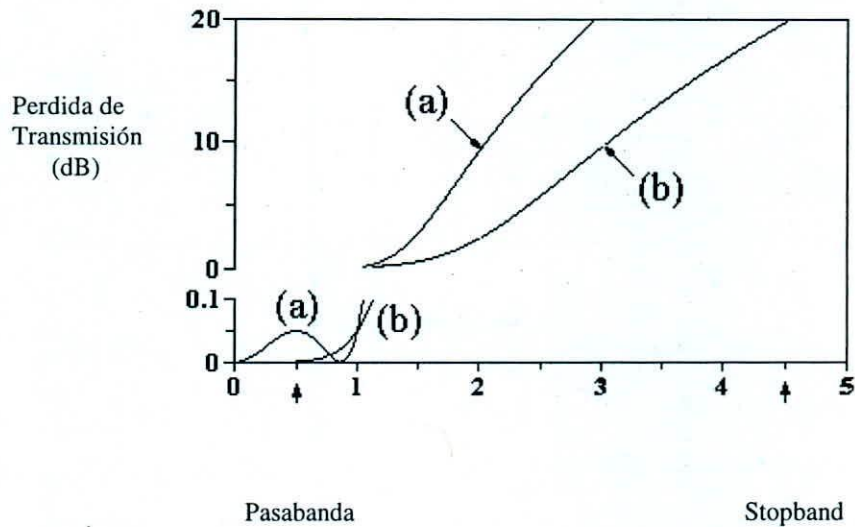


Figura 8 - filtro Chebyshev (a) vs filtro Butterworth (b)

Claramente la respuesta del filtro chebyshev demuestra una mayor rapidez en el incremento de la atenuación en el stopband, esto a expensas de una atenuación en el ripple de la pasabanda.

La potencia de salida es dado por:

$$P_{salida} = \frac{1}{1 + F_0 C_n^2\left(\frac{w}{w_1}\right)} * P_{promedio} \quad (4)$$

Frecuencia Normalizada

Donde $C_n(x)$ es el polinomio Chebyshev de orden n y argumento x .

F_0 es una constante relacionada a la pérdida del ripple pasabanda y está dado por:

$$F_0 = 10^{\frac{L_r}{10}} - 1 \quad (5)$$

Los valores de los elementos prototipos para una equi-ripple de 0.1dB de un filtro pasabajo se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 - Valores de k_n para un filtro pasabajo con equi-ripple de 0.1dB

n	1	2	3	4
K_0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
K_1	0.3052	0.8430	1.0316	1.1088
K_2		0.6220	1.1474	1.3062
K_3			1.0316	1.7704
K_4				0.8181
K_{n+1}	1.0000	1.3554	1.0000	1.3554

2.2 Consideraciones prácticas para los filtros pasabajo

Para todo filtro con respuesta máxima plana y para filtros equi-ripple con un número impar de secciones, los valores terminales k_0 y k_{n+1} son iguales a la unidad sin importar que el valor esté en ohmios o siemens.

Sin embargo, para filtros equi-ripple con un número par de secciones y con $k_0 = 1$, k_{n+1} no será igual a la unidad. Ahora es importante notar, sin embargo que, k_{n+1} es un elemento serie o paralelo en la secuencia de los elementos del filtro, así esto determinará si el valor tabulado de k_{n+1} está en ohmios o siemens.

Hay una desadaptación en la frecuencia d.c. para filtros equi-ripple con un número par de secciones. Esto es debido a la reflexión indicado anteriormente.

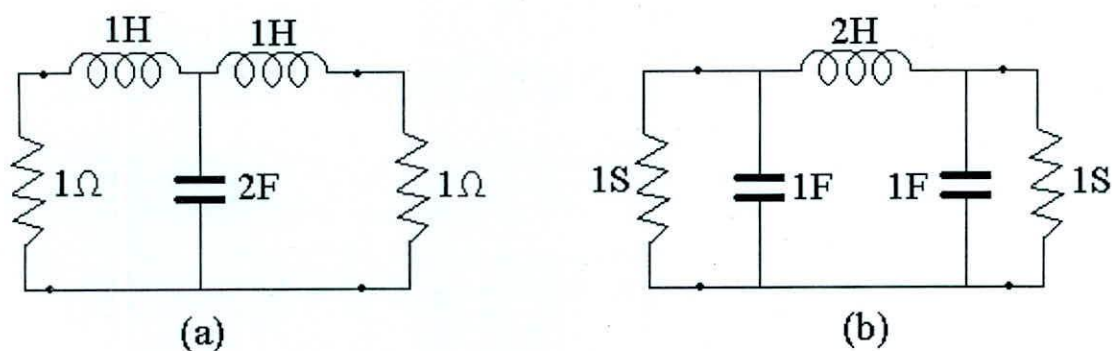


Figura 9 - filtro de alta impedancia (a) y filtro de baja impedancia (b)

En la figura 9 se muestra dos filtros pasabajos con respuesta máxima plana, que tiene características idénticas de atenuación versus frecuencia, sin embargo, ellos difieren en un punto crítico. El circuito (a) tiene una alta impedancia en el stopband, mientras que el circuito (b) tiene una baja impedancia. Esto es particularmente importante si uno de los filtros pasabajos es usado para la salida de frecuencia intermedia (i.f.), después de un

diodo mezclador montado en serie o en paralelo, donde los circuitos (a) ó (b) deberán ser utilizados respectivamente.

La respuesta de un filtro pasabajo práctico con sus componentes derivados de los valores prototipo es ilustrado en la figura 10.

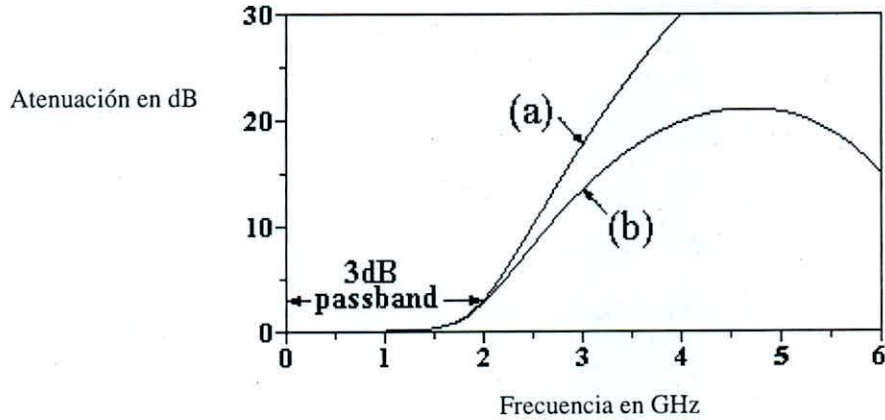


Figura 10 - Respuesta de un filtro pasabajo práctico para los casos (a) y (b).

En el circuito microstrip se usaran longitudes cortas de línea de transmisión para representar la inductancia serie y capacitancia paralela. Cuando la frecuencia se incrementa estas aproximaciones no son válidas y para obtener las respuestas del *stopband* se requieren un análisis profundo de línea de transmisión.

En la práctica la frecuencia de 3dB debe ser escogida próxima al 40% de la frecuencia en donde se obtenga la máxima atenuación.

2.3 Ejemplo de diseño de filtro pasabajo [Fooks, 1999]

Se diseñará un filtro pasabajo máximo-plano de quinto orden con una frecuencia de corte 3dB de 2.0GHz en un sistema de impedancia característica igual a 50 ohmios. El filtro será diseñado en un sustrato con un espesor de 1.58 mm y un $\epsilon_r = 2.5$.

2.3.1 Pasos

Los elementos del filtro prototipo están dados por $n=5$ en la tabla 1. Estos valores son para un sistema de un ohmio con una frecuencia en rad/seg con una atenuación de 3dB. Para calcular los elementos, se utilizará las ecuaciones (6) y (7):

$$L_k = \frac{k_k z_0}{w} \quad (6)$$

$$C_k = \frac{k_K}{w z_0} \quad (7)$$

Donde $z_0 = 50$ ohmios y $w = 4\pi * 10^9$ radian/seg.

Así se tiene:

$$L_1 = L_5 = 2.46 \text{ nH}$$

$$L_3 = 7.96 \text{ nH}$$

$$C_2 = C_4 = 2.58 \text{ pF}$$

Los datos para líneas de diferentes valores de impedancia característica, son mostrados en la tabla 3. Estos han sido seleccionados para ser usado en el substrato de espesor 1.58 mm y con un $\epsilon_r = 2.5$.

Tabla 3 - Información de líneas seleccionadas

Z_0 (ohmios)	W/h	W, mm	ϵ_{eff}	λ , mm a 2.0GHz
25	7.28	11.50	2.226	99.8
50	2.837	4.48	2.090	103.8
130	0.404	0.64	1.901	108.8

Los valores para línea de 130Ω de la tabla 3, se utilizará para el cálculo de componente inductiva, con longitud de línea y capacitancia corregida deducida de las ecuaciones (8) y (9).

$$l = \frac{\lambda_H}{2\pi} \text{sen}^{-1} \left(\frac{wL}{Z_H} \right) \quad (8)$$

$$C_L = \frac{1}{wZ_H} \tan \left\{ \frac{\pi l}{\lambda_H} \right\} \quad (9)$$

Luego:

$$L_1 = 2.46 \text{ nH}, \quad Z_H = 130\Omega \rightarrow l_1 = 0.038\lambda_H = 4.2 \text{ mm}, \quad C_L = 0.073 \text{ pF}$$

$$L_3 = 7.96 \text{ nH}, \quad Z_H = 130\Omega \rightarrow l_3 = 0.140\lambda_H = 15.2 \text{ mm}, \quad C_L = 0.287 \text{ pF}$$

Un circuito equivalente T con una capacitancia en paralelo como componente principal es utilizada por una línea de baja impedancia de corta longitud. En forma similar con las ecuaciones (10) y (11), se obtienen la longitud de línea y la inductancia corregida:

$$l = \frac{\lambda_L}{2\pi} \text{sen}^{-1} (wCZ_L) \quad (10)$$

$$L_C = \frac{Z_L}{w} \tan\left(\frac{\pi l}{\lambda_L}\right) \quad (11)$$

$$C_2 = 2.58 \text{ pF}, Z_L = 25 \Omega \rightarrow l_2 = 0.150\lambda_H = 15.0 \text{ mm}, L_C = 1.020 \text{ nH}$$

Los valores deseados de capacitancias e inductancias del circuito, son deducidos de los valores corregidos de la línea adyacente. Así :

$$L_1 = 2.46 - 1.020 = 1.44 \text{ nH}$$

$$C_2 = 2.58 - 0.073 - 0.287 = 2.22 \text{ pF}$$

$$L_3 = 7.96 - 2 * 1.020 = 5.92 \text{ nH}$$

Seguidamente hay que realizar un nuevo cálculo de l_1 , l_2 y l_3 apartir de L_1 , C_2 y L_3 , obteniendose los siguientes resultados:

$$l_1 = 2.42 \text{ mm} \quad \text{con} \quad C_L = 0.043 \text{ pF}$$

$$l_2 = 12.26 \text{ mm} \quad \text{con} \quad L_C = 0.810 \text{ nH}$$

$$l_3 = 10.55 \text{ mm} \quad \text{con} \quad C_L = 0.192 \text{ pF}$$

Finalmente por la simetría del filtro se obtiene: $l_5 = l_1$ y $l_4 = l_2$.

III. CONCLUSIONES

En el diseño del filtro, considerar que un pequeño error pero importante, ocurre cuando las inductancias y capacitancias pequeñas de las líneas capacitiva e inductiva respectivamente son intercambiadas en posición a lo largo de la línea, las iteraciones extensas pueden no ser necesarias ó significativas. Sin embargo, se debe notar que sí una iteración extensa es llevada a cabo, entonces las condiciones de corrección son deducidas de los valores iniciales de L y C, los cuales resultan de los valores prototipos del filtro.

Un aspecto importante en el diseño de este filtro es que, hay dos forma en el cual este circuito pasabajo de quinto orden puede ser diseñado, uno con dos líneas capacitivas y tres inductivas ó en su defecto con tres líneas capacitivas y dos inductivas. Ambos diseños presentarán características de transmisión muy similares, sin embargo, debe notarse que para las frecuencias stopband en el primer caso presentará una alta impedancia y en el segundo caso una baja impedancia [Fooks, 1999].

Lo anterior es particularmente importante si el filtro pasabajo en un circuito mezclador es conectado a un diodo.

IV. BIBLIOGRAFÍA

- Mattaei, G. L., Young L. and Jones, E. M., *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures*, McGraw-Hill, New York, 1964.
 Fooks, E. H., *Microwave Circuits: Theory and Techniques*. 1999.
 Bhartia, P. and Balh, I., *Microwave Solid State Circuit Design*, Jhon Wiley & Sons, New York, 1988.