

## Herramienta Computacional para el Diseño de Filtros de RF de Circuito Impreso

### Microstrip RF filter design software

REYES AYALA, Mario<sup>1</sup> †\*, ANDRADE GONZÁLEZ, Edgar Alejandro<sup>1</sup>, TIRADO MÉNDEZ, Alfredo<sup>2</sup>, TERRES PEÑA, Hilario<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ciencias Básicas e Ingeniería

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, SEPI Zacatenco, Ingeniería Eléctrica

ID 1<sup>er</sup> Autor: Autor: Mario, Reyes-Ayala / Researcher ID Thomson: O-6206-2018

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Edgar Alejandro, Andrade-Gonzalez

ID 2<sup>do</sup> Coautor: José Alfredo, Tirado-Méndez

ID 3<sup>er</sup> Autor: Hilario, Terres-Peña / ORC ID: 0000-0001-7996-5734, Researcher ID Thomson: G-6072-2018, CVU CONACYT ID: 98093

Recibido Enero 30, 2018; Aceptado Marzo 30, 2018

#### Resumen

El diseño de filtros de microondas implica el uso de herramientas de cómputo cuyo costo puede ser del orden de los \$20,000 USD; con funciones que van desde: la selección de un tipo de respuesta, el modelado tridimensional y su solución. En este trabajo se presenta una herramienta de cómputo para obtener las dimensiones de los filtros a implementarse en un circuito impreso, cuyo costo es muy bajo. La respuesta del filtro es: Butterworth, Bessel o Chebyshev; usando redes LC,  $\pi$  o T. Además, los filtros mencionados se diseñan para respuestas pasa-bajos, pasa-altos, pasa-banda o rechaza-banda. El programa calcula estas redes entregando las dimensiones de las líneas de microcinta. La información generada, se emplea en herramientas CAD-CAM para la implementación. Los límites en el diseño son: (a). Bandas UHF, L y C; (b). Orden siete como máximo; (c). Los circuitos impresos tienen dos caras; y, (d). Sólo puede hacerse un diseño a la vez. Los filtros se simularon en HFSS, el cual es un programa profesional para analizar estructuras electromagnéticas. La medición de los filtros se realizó con un analizador de redes. La desviación entre simulación y medición es cercana al 5%. La herramienta computacional se realizó con Visual Studio de Microsoft y continúa mejorándose.

**Filtro de microondas, Circuito impreso, Visual Studio**

#### Abstract

The design of the microwave filters requires the usage of expensive software, typically around \$20,000 USD; their features include: response of the filter, 3D modelling and, its solution. In this work, a software is presented, which was designed in order to obtain the patch dimensions of a low-cost PCB filter. The response of the filter can be: Butterworth, Bessel or Chebyshev; using LC networks,  $\pi$  or T. Besides, the mentioned filters are designed for low-pass, high-pass, band-pass or band-stop responses. The software calculates these networks giving the dimensions of the PCB strips. The obtained information is used in CAD-CAM tools in the implementation. The restrictions of the designed filters are: (a). UHF, L and C, bands; (b). The filter order should be seven or lower; (c). The printed circuit boards are two sided; and, (d). Only one design is supported at the same time. The filters were simulated in HFSS, which is a professional software for the high frequency simulation for three-dimensional structures. The experimental and simulation results are very similar, with a 5% deviation approximately. The presented software in this paper was developed in Microsoft Visual Studio and, it is still in progress.

**Microwave filter, Printed Circuit Board, Visual Studio**

**Citación:** REYES AYALA, Mario, ANDRADE GONZÁLEZ, Edgar Alejandro, TIRADO MÉNDEZ, Alfredo, TERRES PEÑA, Hilario. Herramienta Computacional para el Diseño de Filtros de RF de Circuito Impreso. Revista del Desarrollo Tecnológico. 2018. 2-5: 19-26.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (mra@correo.azc.uam.mx)

## Introducción

La arquitectura del equipo terminal de los sistemas de comunicaciones implica la implementación de filtros de diversas tecnologías de fabricación, dependiendo principalmente de la frecuencia de operación, del factor de calidad, del nivel de potencia, del ancho de banda y de la distorsión lineal, tanto dentro como fuera del intervalo de interés. En particular, en los receptores de los sistemas de radiocomunicaciones se requieren filtros, cuya frecuencia de operación es del orden de las microondas. En este caso, la utilización de circuitos impresos para la implementación de filtros de bajo nivel de potencia y cuya respuesta está en función del orden del filtro. Las ventajas más importantes que se obtienen empleando la técnica descrita son: la respuesta del filtro puede elegirse de acuerdo a las necesidades, el costo es bajo, se pueden realizar filtros de orden considerable, la forma del filtro permite su fácil incorporación al equipo.

En este artículo se presenta una herramienta computacional que calcula las dimensiones de un filtro de microondas a implementarse por medio de un circuito impreso, el cual incluye información de diseño de este tipo de filtros. Dicha herramienta reduce considerablemente el tiempo de construcción del filtro y permite predecir las dimensiones del mismo en caso de incorporación a un receptor. Además, es importante enfatizar las opciones de diseño que existen en la actualidad, donde la mayoría de los programas de cómputo disponibles son de un costo muy elevado y que no siempre contienen la información necesaria para el desarrollo de los filtros.

El artículo está dividido en las siguientes secciones: Respuesta de los filtros más importantes en radiocomunicación, Diseño de filtros microondas utilizando líneas de transmisión de circuito impreso, Algoritmo de la herramienta computacional, Resultados y Conclusiones.

## Respuesta de los filtros de microondas más importantes en radiocomunicación

Entre la gran variedad de tipos de respuesta de filtros de microondas y que además, son de importancia en los transmisores y receptores de radiocomunicaciones, se destacan: los filtros Butterworth y Chebyshev; cuyas respuestas son antagónicas.

Los filtros Butterworth tienen la respuesta más plana posible dentro del intervalo de interés; pero favorecen la interferencia de canal adyacente. Por el contrario, los filtros Chebyshev tienen un rizo dentro del intervalo de interés (generando distorsión lineal), tienen una mayor atenuación fuera del intervalo de interés, característica que les permite reducir el ancho de las bandas guarda en un esquema con multicanalización en la frecuencia, ya sea en banda base o en el medio de transmisión.

El procedimiento que se explica corresponde primeramente para filtros pasa-bajas, pero como se verá más adelante, el valor numérico y el signo de la reactancia de los componentes, se pueden transformar para lograr filtros pasa-altas, pasa-banda o rechaza-banda. La respuesta de los filtros Butterworth está determinada por la ecuación (1).

$$P_{LR} = 1 + k^2 \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2N} \quad (1)$$

Donde:  $P_{LR}$  es la razón de pérdida de potencia;  $\omega$  es la frecuencia angular, rad/s;  $\omega_c$  es la frecuencia angular de corte, rad/s;  $(\omega/\omega_c)$  es la frecuencia angular normalizada;  $N$  es el orden del filtro; y  $(1+k^2)$  es la razón de pérdida de potencia en la frecuencia de corte. En la figura 1 se ilustra la respuesta normalizada de un filtro Butterworth en términos de las pérdidas por inserción, ver la ecuación (2).

$$[IL] = 10 \log_{10}(P_{LR}) \quad (2)$$

Donde:  $[IL]$  son las pérdidas por inserción, dB.

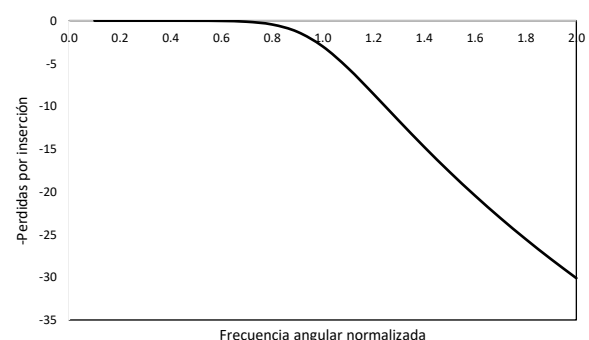


Figura 1 Respuesta normalizada de un filtro Butterworth

De acuerdo al orden del filtro la implementación requerirá de un conjunto de componentes reactivos (inductores y condensadores), para formar una red pasiva de acuerdo a una de dos topologías posibles: red  $\pi$  o red T.

En las figuras 2 y 3 se presentan este tipo de redes para filtros de orden tres. Cabe destacar que ambas redes son equivalentes.

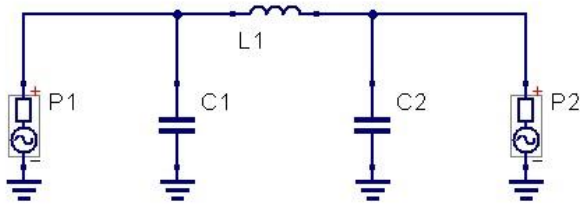


Figura 2 Red tipo π para orden 3

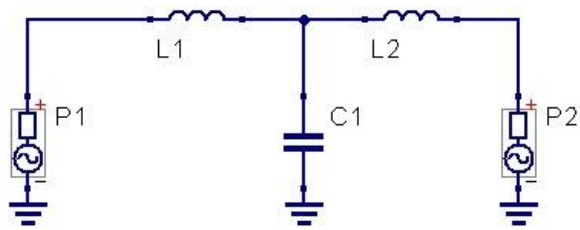


Figura 3 Red tipo T para orden 3

**Diseño de los filtros de microondas utilizando líneas de transmisión de circuito impreso**

El diseño de los filtros consiste en emplear la respuesta del filtro en cuestión a una frecuencia de corte específica y encontrar los coeficientes de los componentes reactivos en función al orden del filtro. Mientras más alto sea el orden del filtro la respuesta se acercará más al comportamiento de un filtro ideal. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que el número de componentes reactivos se incrementa de acuerdo al orden del filtro y que además, la precisión en el valor de los componentes reactivos debe ser más preciso. La Tabla 1 contiene los coeficientes de los componentes reactivos en cualquiera de las topologías seleccionada, donde los coeficientes  $g_i$  corresponden con los valores de los componentes de la red, desde  $C_1$  hasta  $R_L$ .

t	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9	g10	g11
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	
11	0.3129	0.9080	1.4142	1.7820	1.9754	1.9754	1.7820	1.4142	0.9080	0.3129	1.0000

Tabla 1 Coeficientes de la respuesta tipo Butterworth

Por ejemplo, un filtro tipo π de orden tres, se tendrían los siguientes componentes:  $C_1 = 1F$ ,  $L_1 = 2H$ ,  $C_2 = 1F$  y  $R_L = 1Ω$ .

Un aspecto importante es que a medida que se eleva el orden del filtro, el valor real de cada componente deberá ser más cercano al que le corresponde en la Tabla 1, haciendo muy difícil la implementación de filtros de alto orden.

Para una aplicación flexible de los filtros descritos, los valores numéricos de los componentes se pueden alterar para presentar una frecuencia de corte diferente, para lo cual se emplean las transformaciones mostradas en las ecuaciones (3) y (4).

$$L \Rightarrow \frac{L}{\omega_c} \tag{3}$$

$$C \Rightarrow \frac{C}{\omega_c} \tag{4}$$

De forma similar, es posible cambiar el tipo de respuesta del filtro, ver la figura 4 y las ecuaciones (5) y (6).

$$\Delta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} \tag{5}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_2 \omega_1} \tag{6}$$

Donde  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son las frecuencias angulares de corte para filtros con respuestas pasa-banda o rechaza-banda.

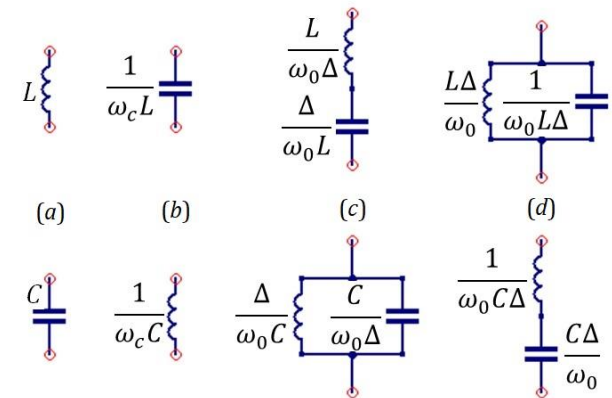


Figura 4 Transformación de los valores numéricos de los componentes reactivos para una frecuencia de corte determinada, en los tipos de respuesta: (a) Pasa-bajas, (b) rechaza-banda, (c) Pasa-banda y, (d) Rechaza-Banda

Otro problema para filtros de microondas incluso de orden bajo o moderado, es que la tolerancia de los componentes comerciales no favorece la construcción del filtro, de tal forma que resulta conveniente emplear líneas de transmisión.

En este caso, la herramienta más empleada es la transformación de Richard, de tal forma que un inductor puede sustituirse por una línea de transmisión de  $\lambda/8$  de longitud y cuya impedancia característica sea del mismo valor que la inductancia original. La figura 5 ilustra las transformaciones de Richard para inductores y condensadores.

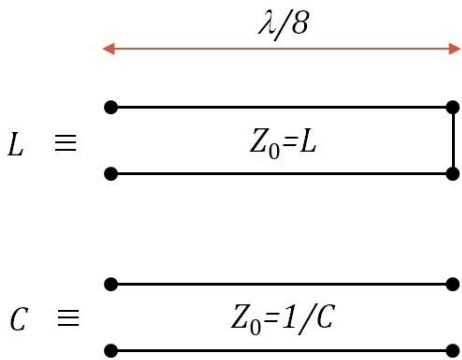


Figura 5 Transformaciones de Richard para inductores y condensadores, respectivamente

La figura 6 muestra la aplicación de la transformación de Richard a cada uno de los componentes reactivos de un filtro de orden 3 tipo T, cuyos valores originales son:  $L_1 = 3.35H$ ,  $C_1 = 1.405F$ ,  $L_2 = 3.35H$  y  $R_L = 1\Omega$ .

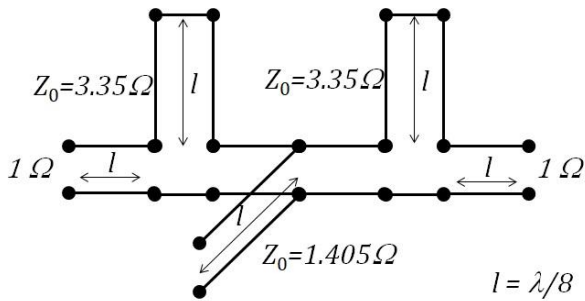


Figura 6 Transformaciones de Richard en una red tipo T de orden 3

La forma del filtro de la figura 6 involucra la implementación de segmentos de línea de transmisión tanto en corto circuito, como en circuito abierto. Normalmente, se prefiere aplicar las identidades de Kuroda para modificar la red de tal forma que sólo contendrá líneas de transmisión en circuito abierto. La identidad de Kuroda más útil en el proceso de evitar líneas de transmisión en corto circuito, es la que se observa en la figura 7, en la cual deberán cumplirse las ecuaciones (7) a (9).

$$n^2 = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \tag{7}$$

$$Z_a = \frac{Z_1}{n^2} \tag{8}$$

$$Z_b = \frac{Z_2}{n^2} = 1 \tag{9}$$

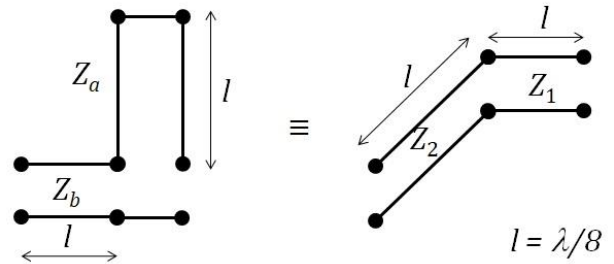


Figura 7 Identidad de Kuroda aplicada para eliminar las líneas de transmisión en corto circuito

El resultado de aplicar la identidad de Kuroda a la red mostrada en la figura 6, produce la figura 8, donde ya no aparecen las líneas de transmisión en corto circuito.

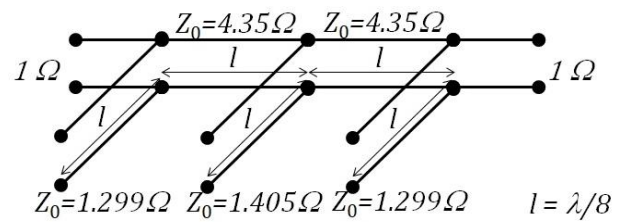


Figura 8 Aplicación de la identidad de Kuroda a la red original

Para tener cualquier impedancia de carga, las impedancias de todas las líneas de transmisión del filtro deberán ajustarse proporcionalmente, de tal manera, que la red tiene la forma que se muestra en la figura 9.

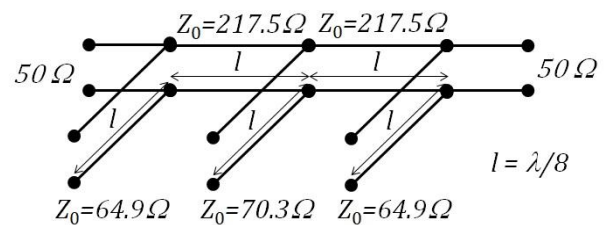


Figura 9 Ajuste de la impedancia de la red para una impedancia de carga determinada

La implementación del filtro a base de líneas de transmisión con circuito impreso, se basa en el modelo que se muestra en la figura 10. En donde:  $w$  es el ancho de la pista en la placa superior, mm;  $t$  es el espesor de las placas de cobre, mm;  $h$  es la separación de las placas de cobre, mm;  $y$ ,  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica del sustrato.

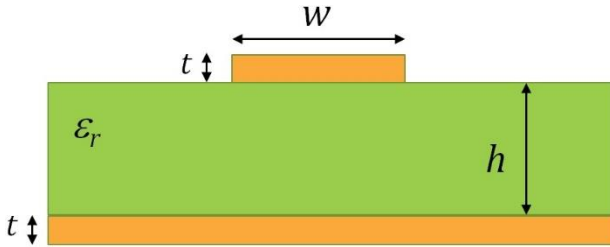


Figura 10 Perfil de una pista de circuito impreso

La capa intermedia, conocida como sustrato está construida de un material dieléctrico y, las capas inferior y superior usualmente son placas de cobre.

El principio de funcionamiento de la línea de transmisión de circuito impreso consiste en la generación de un campo eléctrico entre las placas de cobre, cuya magnitud depende de la geometría del modelo y de la constante dieléctrica del sustrato. Las dimensiones de las líneas de transmisión de circuito impreso, se calculan por medio de las ecuaciones muy conocidas y que están incluidas en las referencias de este artículo. La forma final del filtro de microondas construido con líneas de transmisión de circuito impreso, se presentará en la sección denominada Resultados.

**Algoritmo de la herramienta computacional**

El algoritmo empleado para el cálculo de los componentes y dimensiones del filtro de circuito impreso, se presenta a manera de diagrama de flujo en la figura 11.

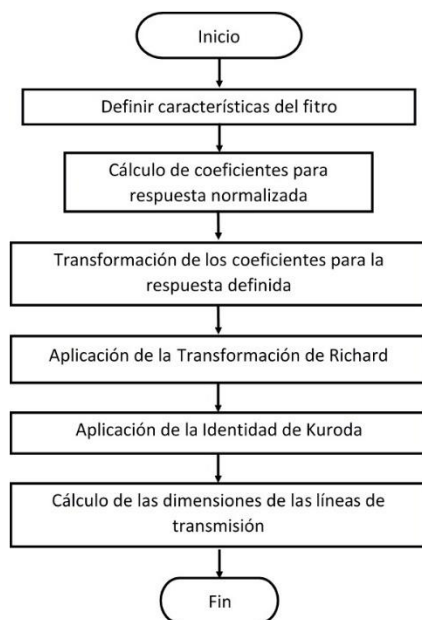


Figura 11 Diagrama de flujo de la herramienta computacional

La herramienta computacional se implementó en el lenguaje Visual Basic del programa Visual Studio 2017 de la empresa Microsoft, el cual está diseñado para invocar rutinas por medio de eventos y realiza los cálculos mediante los valores actuales en las variables definidas en el primer paso del diagrama de Flujo.

**Resultados**

La pantalla principal de la herramienta computacional se muestra en la figura 12, en donde puede observarse que primeramente se realiza el cálculo de coeficientes para los componentes reactivos, con la idea de contar con la posibilidad de implementar el circuito con componentes discretos. En la parte inferior, se muestran las impedancias y dimensiones de los segmentos de líneas de transmisión de circuito impreso, para su implementación con parámetros distribuidos, cumpliendo así los objetivos de este trabajo.

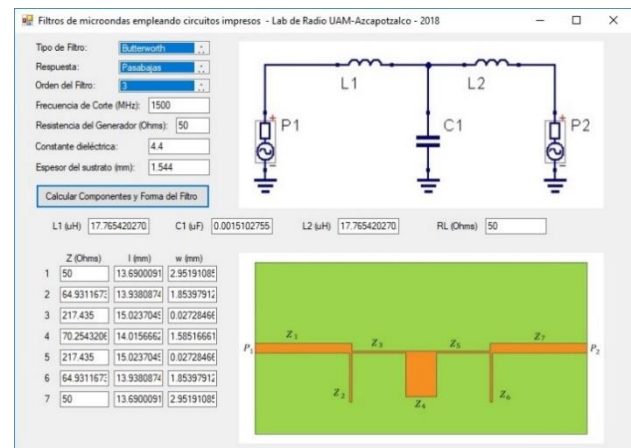


Figura 12 Ventana de trabajo de la herramienta computacional

La definición de las características del filtro se realiza por medio de listas y cajas de texto; posteriormente, realiza los cálculos y transformaciones al oprimir el botón de comando, para desplegar los resultados en la parte inferior de la ventana. Utilizando el modelo desarrollado con la herramienta que se presenta, se simuló la respuesta en la frecuencia del filtro de circuito impreso, ver figura 13.

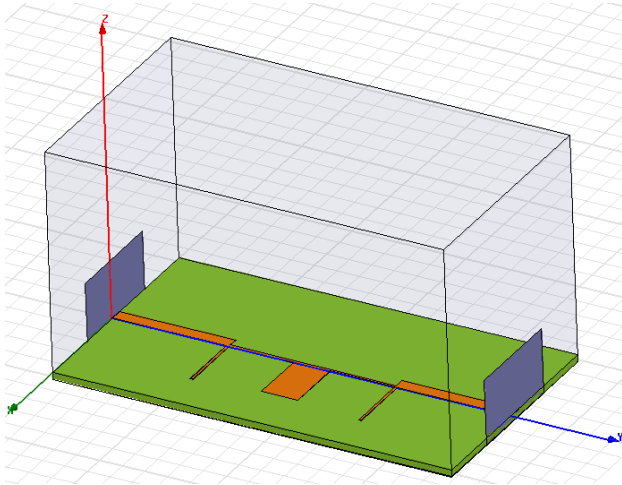


Figura 13 Modelo introducido al HFSS para simular la respuesta del filtro

El programa de simulación que se empleó fue el HFSS (High Frequency Structure Simulator), obteniéndose la respuesta en la frecuencia mediante el parámetro  $S_{21}$ , el que observa en la figura 14.

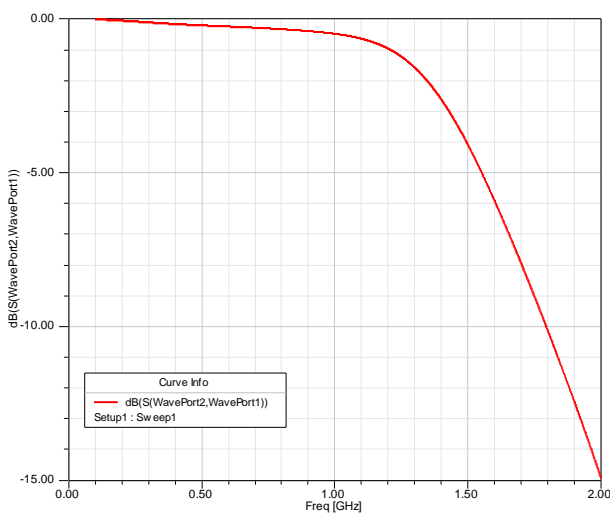


Figura 14 Parámetro  $S_{21}$  del filtro de microondas de circuito impreso

Para comprobar el funcionamiento del filtro se construyó además un prototipo, el cual se evaluó con un analizador de redes Fielfox de la marca Agilent Technologies. La figura 15 muestra el circuito impreso construido para el filtro, el cual se conecta al analizador de redes con conectores SMA.

Para la implementación del circuito se emplea FR-4 como sustrato y se removió el cobre por medio de cloruro férrico.

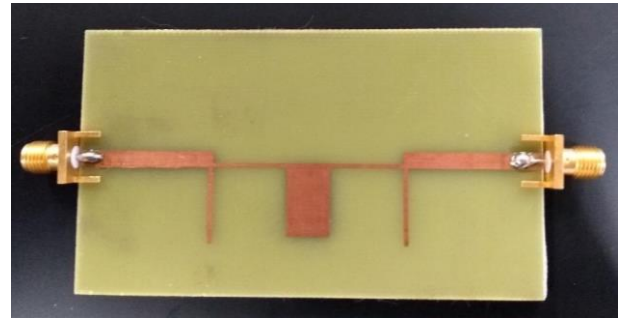


Figura 15 Parámetro  $S_{21}$  del filtro de microondas de circuito impreso

Las conexiones realizadas para la obtención de la respuesta en la frecuencia del filtro, se ilustran en la figura 16.



Figura 16 Parámetro  $S_{21}$  del filtro de microondas de circuito impreso

Finalmente, la respuesta en la frecuencia del filtro, se presenta en la figura 17, donde se observa que la frecuencia de corte es muy cercana a 1.5 GHz

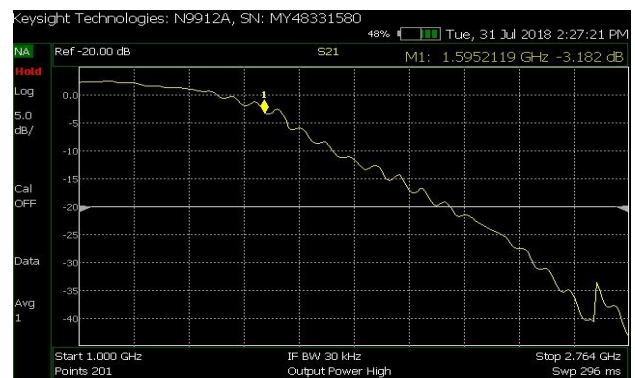


Figura 17 Parámetro  $S_{21}$  del filtro de microondas de circuito impreso

REYES AYALA, Mario, ANDRADE GONZÁLEZ, Edgar Alejandro, TIRADO MÉNDEZ, Alfredo, TERRES PEÑA, Hilario. Herramienta Computacional para el Diseño de Filtros de RF de Circuito Impreso. Revista del Desarrollo Tecnológico. 2018.

La respuesta teórica del filtro se presenta en la figura 1, donde se aprecia la similitud con la figura 14 (obtenida por simulación) y con la figura 17 (medida experimentalmente). Cabe destacar, que la versión que se presenta del paquete computacional desarrollado no genera el archivo en código G.

### Conclusiones

En este artículo se presentó una herramienta de cómputo para facilitar el proceso enseñanza aprendizaje de los filtros de microondas que emplean líneas de transmisión de circuito impreso. Este programa entrega las dimensiones finales de los segmentos de línea de transmisión para su incorporación en una estructura de parche en la placa superior de un circuito impreso de doble cara.

Entre las principales ventajas de la herramienta, se destaca la flexibilidad de seleccionar el tipo de filtro, el orden del filtro, el tipo de respuesta, la o las frecuencias de corte, la impedancia de carga, la constante dieléctrica del sustrato del circuito impreso y, el espesor del sustrato.

Para ejemplificar el diseño del filtro, el modelado, la simulación, la construcción y la evaluación del mismo; se utilizó un filtro pasabajos tipo Butterworth de orden 3, con una frecuencia de corte de 1500 MHz, una resistencia de carga de 50  $\Omega$ ; y, construido con un circuito impreso de doble cara con 1.544 mm de sustrato y una constante dieléctrica de 4.4.

El circuito impreso se elaboró con el método convencional de impresión por calor y removiendo el cobre con solventes. Sin embargo, para un filtro de orden mayor, podría ser necesario emplear una técnica de fabricación de mejor precisión, por ejemplo: utilizando una herramienta de maquinado de control numérico.

La herramienta computacional presentada sigue en desarrollo para utilizar otras topologías de filtros de circuito impreso y también una forma más completa de interacción con el usuario, para favorecer almacenar los modelos generados. De esta forma se espera contar con un programa más completo que permita la docencia de los circuitos de microondas evadiendo la adquisición de algunos de los programas comerciales disponibles a precios muy elevados.

### Referencias

- Bahl, I. J. y Trivedi, D. K. (1977). A Designer's Guide to Microstrip Line. *Microwaves*, 1 (5), 174-182.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory* (Tercera edición). EUA: John Wiley and Sons.
- Barret, R. M. (1984). Microwave Printed Circuits – An Historical Perspective. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 32 (9), 961-969.
- Bhattacharyya, A. K. (). *High-Frequency Electromagnetic Techniques*. EUA: John Wiley and Sons.
- Butterworth, S. (1930). On the Theory of Filter Amplifiers. *Wireless Engineering*, 7 (1) 536-541.
- Cohn, S. B. (1958). Parallel-Coupled Transmission-Line Resonator Filters. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 6 (4), 223-231.
- Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. y Ittipiboon, A. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. EUA: Artech House.
- Grieg, D. D. y Englemann, H. F. (1952). Microstrip – A New Transmission Technique for the Kilomegacycle Range. *Proceedings of the IRE*, 40 (12), 1644-1650.
- Hussain A. (2005). *Advanced RF Engineering for Wireless Systems and Networks*. EUA: John Wiley and Sons.
- Jian-Ming, J. (2010). *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*. EUA: John Wiley and Sons.
- Jones, E. M. T. y Bolljahn, J. T. (1956). Coupled-Strip-Transmission Line Filters and Directional Couplers. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 4 (4), 78-81.
- Ludwig, R. y Bretchko, P. (2000). *RF Circuit Design Theory and Applications*. EUA: Prentice-Hall.
- Pozar, D. M. (2005). *Microwave Engineering* (Tercera edición). EUA: John Wiley and Sons.

Richard, P. I. (1948). Resistor-Transmission Line Circuits. Proceedings of the IEEE, 36 (2), 217-220.

Sagawa, M., Makimoto, M. y Yamashita, S. (1985). A Design Method of Bandpass Filters Using Dielectric-Filled Coaxial Resonators. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 33 (2), 152-157.