

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Implementación de Circuitos de Radio Frecuencia
Utilizando Microstrips.
Proyecto de investigación**

**Mateo Nicolás Chávez Espinosa
Mario Andrés Ortega Carrillo
Ingeniería Electrónica**

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero electrónico

Quito, 21 de diciembre de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERIAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Implementación de Circuitos de Radio Frecuencia
Utilizando Microstrips.**

Mateo Nicolás Chávez Espinosa

Mario Andrés Ortega Carrillo

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Santiago Navarro , PhD.

Firma del profesor

Quito, 21 de diciembre de 2016

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Mateo Nicolás Chávez Espinosa

Código: 00124124

Cédula de Identidad: 1719567818

Lugar y fecha: Quito, diciembre de 2016

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Mario Andrés Ortega Carrillo

Código: 00107911

Cédula de Identidad: 1714263157

Lugar y fecha: Quito, diciembre de 2016

RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó e implementó un filtro de alta frecuencia utilizando la técnica microstrip line. Para implementar este tipo de filtros se utilizó laminados de cobre de alta frecuencia. Los cálculos teóricos tienen como factores principales a la permitividad eléctrica del material dieléctrico y su espesor; ambos dados por el fabricante de los laminados. Se desarrolló un método para implementar el circuito utilizando fotolitografía con películas secas foto-resistivas. Los circuitos creados ofrecieron curvas de respuesta con 3% error en las especificaciones de diseño. Se recomienda utilizar el método desarrollado en este proyecto, así como los circuitos implementados, en el laboratorio de Microondas de la USFQ para ampliar el conocimiento práctico de los estudiantes.

Palabras clave: Radiofrecuencia, microstrip, implementación, diseño, filtro.

ABSTRACT

In this project, a high frequency filter was designed and implemented using the microstrip line technique. To implement these filters, high frequency copper laminates were used. The theoretical calculations use two main parameters: the electrical permittivity and the width of the dielectric; both specified by the laminate producer. A method to implement the circuit using photolithography on dry film photo resist was developed. The circuits built had 3% error when compared to the design specifications. It is recommended to use the implementation method developed in this project, as well as the circuits constructed, in the laboratory of Microwaves in University San Francisco de Quito to further the practical knowledge of the students.

Key words: Radiofrequency, microstrip, implementation design, filter.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
DESARROLLO DEL TEMA	11
DISEÑO	11
<i>Teoría</i>	11
Líneas de transmisión.	11
Microstrip.	13
Ecuaciones de diseño.....	15
<i>Filtro Pasa-Bajas.</i>	22
Síntesis y simulación.	23
PROTOCOLO EXPERIMENTAL	29
<i>Patrón en Adobe Illustrator.</i>	29
<i>Impresión en acetato.</i>	30
<i>Aplicación de la película foto-resistiva.</i>	30
<i>Exposición UV</i>	32
<i>Revelación de la película foto-resistiva.</i>	33
<i>Remoción del cobre y el material foto-resistivo</i>	33
RESULTADOS	34
CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
ANEXO A: BUTTERWORTH, VALORES NORMALIZADOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS	38
ANEXO 2: CHEBYSHEV, VALORES NORMALIZADOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ancho y largo de las tiras de cobre en función de la impedancia.....	27
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación general de una línea de transmisión. (Pozar, 2012)	11
Figura 2. Representación de un cable como una línea de transmisión. (Ulaby, 2007)	12
Figura 3. Evolución conceptual de un microstrip desde dos cables. (Gupta, 1996)	14
Figura 4. Permitividad eléctrica del sustrato y permitividad eléctrica efectiva. (Pozar, 2012) ...	15
Figura 5. Dimensiones principales de un microstrip. (Pozar, 2012)	15
Figura 6. Unidades base para filtros. (Pozar, 2012)	16
Figura 7. Ejemplo de filtro de orden 5 usando una unidad π	16
Figura 8. Filtro de orden 5 con los valores de elementos des-normalizados.	17
Figura 9. Identidades de Kuroda (Ozaki, 2003)	18
Figura 10. Circuito tras aplicar las identidades de Kuroda.	18
Figura 11. Impedancia de entrada de los stubs. (Pozar, 2012).	19
Figura 12. . Equivalencia entre stubs y elementos discretos. (Pozar, 2012)	20
Figura 13. Filtro representado con stubs y elementos unitarios	21
Figura 14. Filtro representado como estructura de dos puertos. (Sedra, 1998).	22
Figura 15. Respuesta del filtro con elementos discretos des-normalizados usando MATLAB. ..	23
Figura 16. Respuesta del filtro con elementos discretos tras aplicar Kuroda usando MATLAB. 24	
Figura 17. Respuesta del filtro con stubs usando MATLAB.	24
Figura 18. Estructura del filtro con elementos discretos en ORCAD PSPICE	25
Figura 19. Respuesta del filtro con elementos discretos en ORCAD PSPICE	25
Figura 20. Estructura del filtro tras aplicar Kuroda en ORCAD PSPICE.	25
Figura 21. Respuesta del filtro tras aplicar Kuroda en ORCAD PSPICE.	26
Figura 22. Estructura del filtro con stubs en ORCAD PSPICE.	26
Figura 23. Respuesta del filtro con stubs en ORCAD PSPICE.	26
Figura 24. Topología en ADS	27
Figura 25. Resultado de simulación	28
Figura 26. Topología final ADS	28
Figura 27. Respuesta en frecuencia ADS.	29
Figura 28. Caminos de cobre en Adobe Illustrator.	29
Figura 29. Impresión del acetato	30
Figura 30. Placa de cobre con película foto-resistiva.	31
Figura 31. Cámara de exposición UV	32
Figura 32. Foto del sistema después de ser revelado	32
Figura 33. Lámina de cobre con el patrón del circuito en la película foto-resistiva	33
Figura 34. Filtro implementado	33
Figura 35. Diagrama de Bode en el analizador de redes	34

INTRODUCCIÓN

Este proyecto de titulación pretende sentar una base para la elaboración de filtros de alta frecuencia en la Universidad San Francisco de Quito. Partiendo de la teoría vigente, se diseña un filtro pasa bajas usando la técnica de microstrip. Esta técnica genera un esquema que debe ser replicado en una lámina de cobre. Se propone usar fotolitografía para cumplir con esta tarea. El método utilizado comprende el uso de máscaras usando películas foto-resistivas, de manera tal que se pueda usar ácido para remover partes específicas de una lámina de cobre.

Una línea de transmisión permite transportar energía eléctrica entre dos puntos distintos; las líneas microstrip tienen el mismo uso. Cuando se transmite una señal cuya frecuencia es muy elevada (1 GHz – 300 GHz), se trabaja con longitudes de onda pequeñas en relación al tamaño estándar de los elementos usados en un circuito eléctrico. Por esta razón, la señal a la salida de un elemento tiene un cambio de fase con respecto a la entrada, y es este fenómeno el que no permite aplicar la teoría convencional de circuitos cuando se trabaja a altas frecuencias. En cierto sentido, la teoría de circuitos es una aproximación del electromagnetismo descrito por las ecuaciones de Maxwell (Pozar, 2012).

Debido a estos efectos, los circuitos implementados sin elementos discretos son muy utilizados en distintas aplicaciones como: antenas, acopladores, filtros, adaptadores de impedancia, divisores de potencia, etc. Tras haber tomado la clase de microondas de la USFQ, se observó que para complementar la teoría de diseño de líneas de transmisión hace falta experimentar la fabricación del circuito. Se decidió entonces diseñar e implementar el filtro ya mencionado.

En el contexto ecuatoriano es importante empezar a desarrollar este tipo de técnicas. A pesar de que no son nuevas, resulta complejo implementar estos circuitos porque existe dificultad

para encontrar los materiales necesarios, y esto se debe a que no hay una demanda de los mismos. Con la técnica utilizada, es posible realizar circuitos de radiofrecuencia precisos. Si se incentivase la fabricación de este tipo de circuitos a nivel académico sería un primer e importante paso para promover el desarrollo de esta tecnología en el país; lo cual es de vital importancia cuando se tiene en cuenta que, en la industria, los circuitos implementados mediante la técnica de microstrip se utilizan con frecuencia y tienen un alto costo de importación. Según Singh y Tripathi 2011, los circuitos con microstrip tienen varias ventajas: son livianos, de bajo costo, pequeños en dimensiones y sobre todo son fáciles de construir. Es por esto que se entiende su popularidad y se justifica el interés de desarrollar este tipo de circuitos a nivel académico.

Para facilitar la comprensión de este material se necesita plantear ciertas definiciones. Microstrip es una línea de transmisión que comprende un plano de tierra, un material dieléctrico con una permitividad eléctrica constante y una tira de cobre que se sitúa sobre el dieléctrico. Una película foto-resistiva es un material que al ser expuesto a luz UV cambia sus propiedades, de manera que permita diluir ciertas partes de la película. El químico revelador 4615 permite remover las partes no expuestas a luz UV de la película foto-resistiva. Por último, un DiClad 880 es una placa de cobre de doble lado, diseñada para ser usada a alta frecuencia y que exhibe una permitividad eléctrica constante a lo largo de todo su dieléctrico.

DESARROLLO DEL TEMA

Se eligió un filtro para este proyecto porque su uso aparece en casi todas las áreas de aplicación de la ingeniería; y se eligió un pasa bajas porque es el modelo base a partir del cual se diseñan todos los otros tipos de filtros (pasa altas, pasa banda y rechaza banda).

Diseño

En esta sección se describen todos los conocimientos necesarios para el diseño teórico de un filtro. Se parte de las líneas de transmisión y su funcionamiento para luego explicar la técnica microstrip.

Teoría

Líneas de transmisión.

Todas las estructuras o medios que transfieran energía, o información, entre dos puntos cualesquiera son considerados líneas de transmisión (Ulaby, 2007). El interés de este proyecto se centra en las líneas de transmisión que se usan para guiar señales electromagnéticas. En general una línea de transmisión se puede representar de la siguiente manera:



Figura 1. Representación general de una línea de transmisión. (Pozar, 2012)

Como se puede observar en la figura 1, las líneas de transmisión son redes de dos puertos que transfieren corriente y voltaje entre el circuito generador y el circuito receptor. Cuando se

tiene un circuito eléctrico de baja frecuencia, los cables que conectan los distintos elementos del circuito (resistencias, inductores, capacitores, etc.) son, en efecto, líneas de transmisión. La figura 2 ilustra este punto:

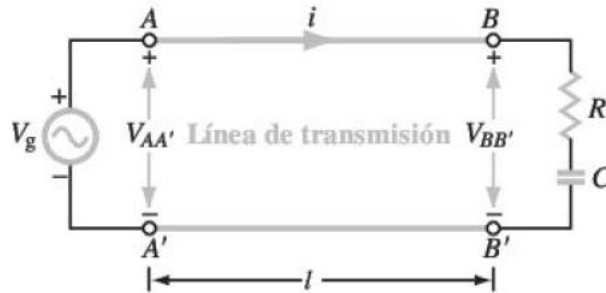


Figura 2. Representación de un cable como una línea de transmisión. (Ulaby, 2007)

No obstante, en los cursos iniciales de circuitos no se hace esta distinción. Se asume que el voltaje $V_{AA'}$ es igual al voltaje $V_{BB'}$ (véase figura 2). La veracidad de esta suposición depende de la longitud l de la línea y la frecuencia de la señal enviada por el generador. Suponiendo que el voltaje del generador sea senoidal:

$$V_{AA'} = V_o \sin(\omega t)$$

$$V_{BB'} = V_o \sin \left[\omega t - \frac{\omega l}{v_p} \right]$$

La magnitud $\omega l / v_p$ determina el cambio entre la salida y la entrada de la línea de transmisión, donde v_p es la velocidad de propagación de la onda en el medio. Entonces se tiene:

$$\frac{\omega l}{v_p} = 2\pi \frac{l}{\lambda}$$

Por lo que la relación entre el largo de la línea y la longitud de onda de la señal transmitida determina cuanto cambia el voltaje entre la salida y la entrada de la línea de transmisión. En general, cuando $l/\lambda \geq 0.01$ se deberá tomar en cuenta los efectos causados por

la línea de transmisión (Ulaby, 2007). Por ejemplo, para un circuito electrónico de muy baja frecuencia ($f = 1\text{Khz}$) conectado con cables de 4 cm de longitud se tiene:

$$\frac{l}{\lambda} = 133.33 \times 10^{-9}$$

Mientras que para una línea de teléfono con líneas de transmisión de 30 km de largo y usando la misma frecuencia de operación se tiene:

$$\frac{l}{\lambda} = 0.07$$

Microstrip.

La fotolitografía es una técnica que permite realizar circuitos impresos o PCB (Printed Circuit Boards). Las características eléctricas de estos circuitos tienen una influencia significativa en el desempeño del mismo, sobre todo cuando se trabaja en radio frecuencia. En general, los circuitos tradicionales conectan los componentes entre ellos mediante tiras de cobre. Entonces es importante hablar de los efectos parásitos que se pueden presentar en los mismos. Se define un efecto parásito como todo parámetro físico que afecta el desempeño del circuito. En radiofrecuencia, una tira de cobre larga entre dos componentes va a tener una inductancia asociada. Por otro lado, una tira de cobre sobre un plano de tierra va a tener una capacitancia asociada. Conforme la frecuencia aumenta, estos efectos parásitos afectan cada vez más al desempeño del circuito. (Semtech, 2006). Es aquí donde aparece la necesidad de realizar circuitos que no interconecten elementos discretos, sino que, mediante un solo plano de cobre con un patrón determinado, se comporte de manera similar a un circuito con elementos discretos.

Con el nacimiento de los circuitos integrados, aparece la necesidad de una nueva estructura de transmisión. El requerimiento principal es que sea planar. En su publicación intitulada *The planar circuit – An Approach to Microwave Integrated Circuitry* en 1972, Okoshi

y Miyoshi mencionan que los circuitos planares ofrecen una impedancia menor, incluso que la de los circuitos con stripline. Los circuitos de microondas realizados en semiconductores necesitan impedancias bajas. Existen varias estructuras que cumplen con esto, tales como: microstrip, guía de onda coplanar, entre otras (Gupta, 1996).

Una línea de transmisión de microstrip es una línea de al menos dos conductores, la cual ha evolucionado desde las líneas de transmisión de dos cables separados por un dieléctrico.

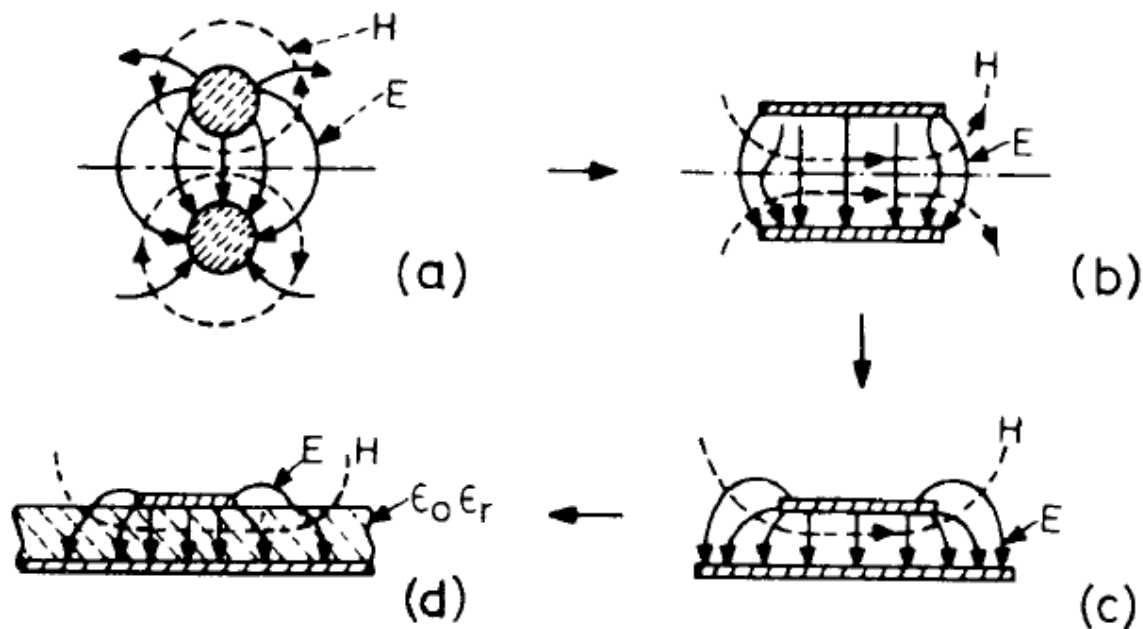


Figura 3. Evolución conceptual de un microstrip desde dos cables. (Gupta, 1996).

Vale la pena mencionar que en microstrip los campos eléctricos y magnéticos no están confinados exclusivamente al dieléctrico del sustrato, sino que también están presentes en el aire. Esto implica que la estructura tiene dos permitividades eléctricas distintas, una del aire y otra del sustrato. Esto hace que sea necesario obtener una permitividad eléctrica efectiva que tome en cuenta los efectos de esta disparidad, como se ve en la figura 4:

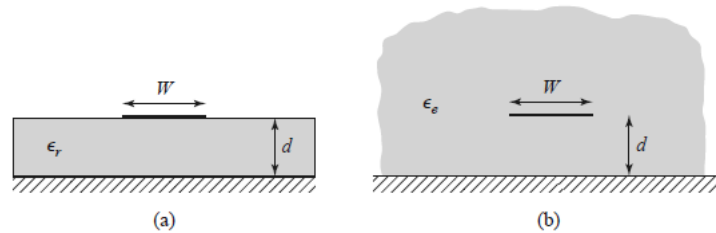


Figura 4. Permitividad eléctrica del sustrato y permitividad eléctrica efectiva. (Pozar, 2012).

La estructura de un microstrip tiene cuatro dimensiones importantes; W representa el ancho de la línea de microstrip, d es el espesor del sustrato, t es el espesor de la línea de cobre, y ϵ_r representa la permitividad eléctrica relativa del dieléctrico. Solo se puede variar el ancho de las líneas para obtener el comportamiento deseado del circuito. Conforme sube la frecuencia se debe tomar en cuenta el efecto pelicular en la propagación de las ondas por lo que el espesor t se vuelve relevante. Para los propósitos de este proyecto, se considera que los efectos de la dimensión t serán mínimos por lo que no se los toma en consideración.

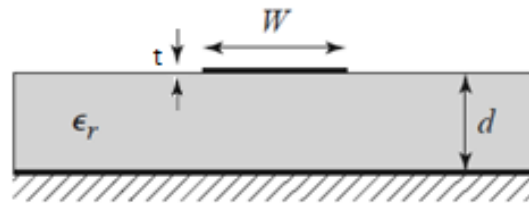


Figura 5. Dimensiones principales de un microstrip. (Pozar, 2012).

Ecuaciones de diseño.

El diseño de filtros es un tema ampliamente estudiado, por lo cual se tienen estándares establecidos. Se describirá el proceso de diseño de filtros tipo Butterworth o Chebyshev. Un filtro tipo Butterworth tiene una banda pasante plana, pero una pendiente baja. El filtro tipo Chebyshev tiene una pendiente mayor, es decir es más selectivo, pero tiene oscilaciones en la banda pasante. Como se verá más adelante, la diferencia práctica entre el diseño de ambos filtros

será la tabla de la que se obtengan los valores base de los elementos. Todos los filtros parten de dos posibles prototipos:

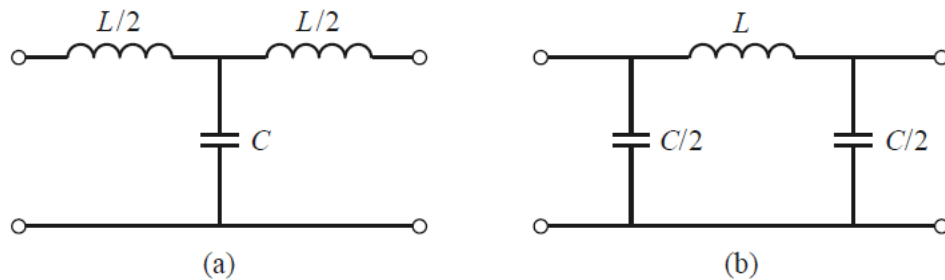


Figura 6. Unidades base para filtros. (Pojar, 2012).

Un filtro puede estar constituido por varias etapas de una de las dos unidades que se muestran en la figura anterior. La figura 6.a se conoce como circuito T, y la figura 6.b se conoce como circuito π . De manera que un filtro de orden 5 podría verse de la siguiente manera:

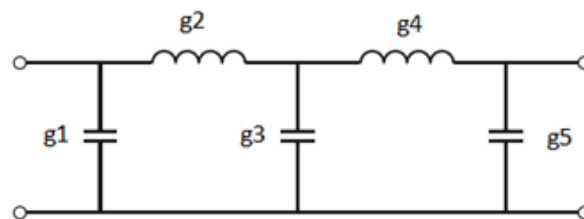


Figura 7. Ejemplo de filtro de orden 5 usando una unidad π .

En este caso se usó el circuito π . El orden del filtro está determinado por el número de elementos en el mismo. Se puede observar el orden en el que se numeran los elementos del filtro.

Una vez elegido el prototipo del filtro, se tiene que asignar los valores a los elementos. Para hacer esto se tiene que ir a una tabla de valores normalizados para filtros Butterworth o Chebyshev. En los anexos 1 y 2 se pueden encontrar estas tablas. Todos los valores están normalizados a una frecuencia de corte de 1 [rad/s], una carga de 1 [Ω] y una resistencia del generador de 1 [Ω].

Luego se procede a des-normalizar el filtro. En este paso del diseño es donde el filtro puede pasar a ser: pasa altas, pasa banda, rechaza banda o quedarse como pasa bajas. La des-normalización para pasa bajas es la siguiente:

$$L = \frac{R_L g_x}{\omega_c}$$

$$C = \frac{g_x}{R_L \omega_c}$$

Si la resistencia de carga fuera distinta que la resistencia del generador se deben tomar consideraciones especiales en cuanto a la simetría del filtro. A continuación se asignan los valores reales de cada elemento, el prototipo ahora tiene esta topología:

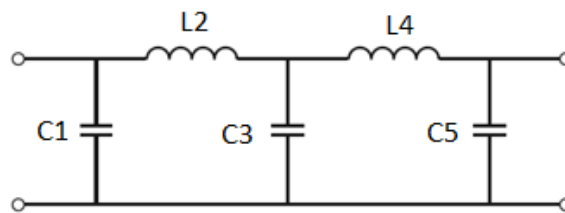


Figura 8. Filtro de orden 5 con los valores de elementos des-normalizados.

Una vez que se obtiene el prototipo des-normalizado, se nota un problema. Sin importar la base que se elija (T o π) se tienen elementos que están en serie. Esto es un inconveniente para obtener la equivalencia del filtro, porque con microstrip solo se pueden implementar elementos en paralelo y en cascada. Entonces es necesario aplicar las identidades de Kuroda. Estas permiten transformar un elemento en serie en un elemento en paralelo y otro en cascada, y funcionan de la siguiente manera:

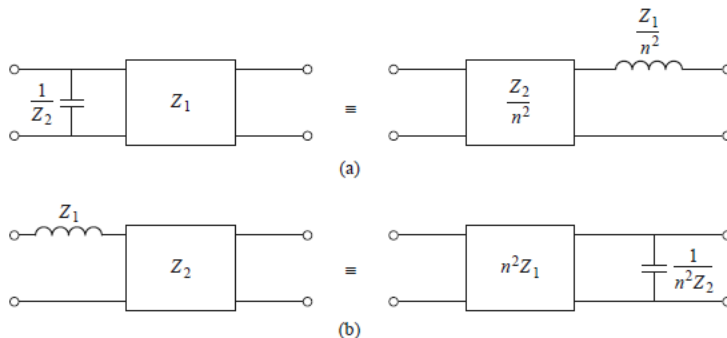


Figura 9. Identidades de Kuroda (Ozaki, 2003).

Los cuadrados en la figura 9 representan elementos unitarios. Un elemento unitario es un segmento de línea de transmisión que tiene una longitud de $\lambda_c/8$, donde λ_c es la longitud de onda a la frecuencia de corte del filtro. Como se observa en la figura 9 un inductor en serie tiene una equivalencia con un capacitor en paralelo. Cabe recalcar que: $n^2 = 1 + Z_2/Z_1$. Aplicando estas identidades podemos transformar el circuito de la figura 8 en un circuito con la siguiente topología:

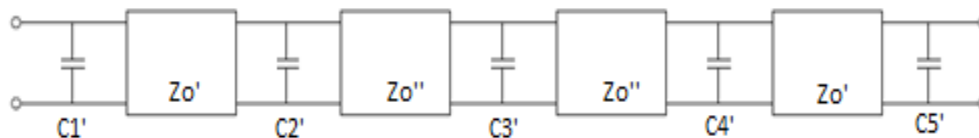


Figura 10. Circuito tras aplicar las identidades de Kuroda.

Por último, se tiene que reemplazar cada elemento en paralelo por su equivalente con microstips. Esto se logra usando stubs. Un stub es un trozo de línea de transmisión que tiene una terminación en corto circuito o circuito abierto. Los stubs tienen la siguiente impedancia de entrada:

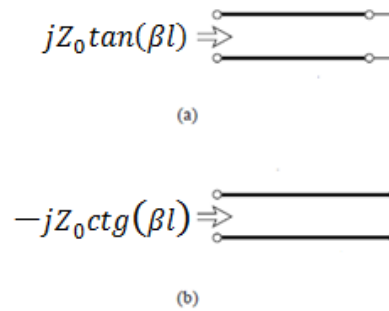


Figura 11. Impedancia de entrada de los stubs. (Pozar, 2012).

Donde l representa el largo del stub y $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ es la constante de propagación de la línea.

Se puede notar que los stubs tienen impedancias análogas a capacitores e inductores a excepción de la presencia de una tangente. Esto fue observado por P.I. Richards (1948) que introdujo el siguiente cambio de variable:

$$\Omega = \tan(\beta l)$$

$$S = j\Omega$$

Los filtros con elementos discretos son normalizados a una frecuencia $\omega_c = 1$ [rad/s].

De manera análoga se tiene que elegir $\Omega_c = 1$ en la transformada de Richards. Esto implica $\beta l = \pi/4$, por lo que $l = \lambda_c/8$. Por esta razón este tipo de filtros se conoce como: filtros de líneas conmensuradas. Se observa la siguientes relaciones:

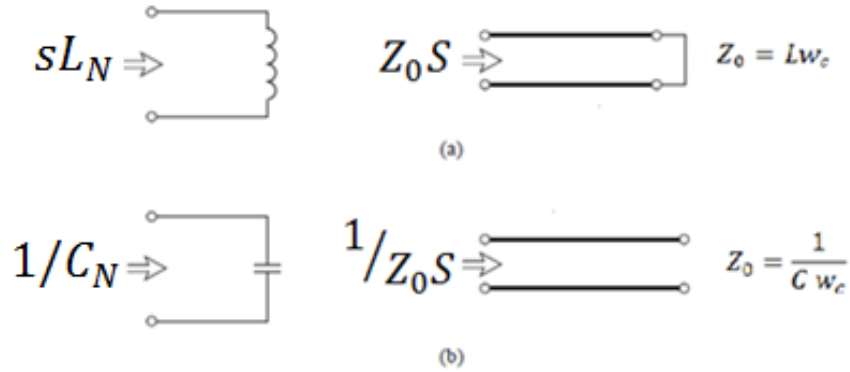


Figura 12. . Equivalencia entre stubs y elementos discretos. (Pojar, 2012).

Estas solo se cumplen a la frecuencia de corte porque la impedancia de los elementos discretos tiene una dependencia de ω , mientras que la de los elementos distribuidos tiene una dependencia de $\Omega = \tan\left(\frac{\pi \omega}{4 \omega_c}\right)$. La tangente es periódica, por lo que la respuesta del filtro se repite cada $4\omega_c$.

Cabe recalcar que aunque todas las tiras de cobre miden $\lambda_c/8$, λ_c no es el mismo para cada línea de cobre, ya que la velocidad de propagación tiene una dependencia con las dimensiones del microstrip. Esto se evidencia con las siguientes ecuaciones:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_l}}$$

$$\epsilon_l = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 d/W}}$$

$$\lambda_c = \frac{v_p}{f_c}$$

Después de reemplazar los elementos discretos por stubs el esquema del circuito se ve como en la siguiente figura, se recalca que el valor de l equivale a $\lambda_c/8$:

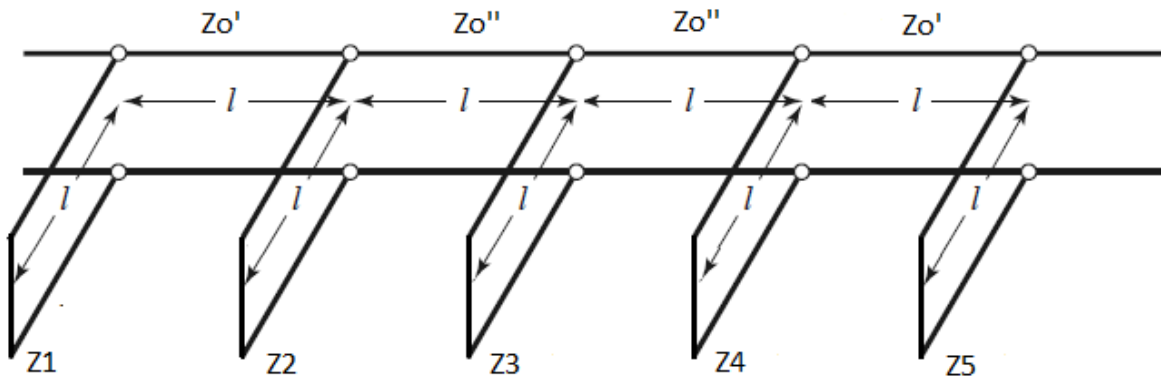


Figura 13. Filtro representado con stubs y elementos unitarios.

Por último, se tiene que transformar todo a microstrips. El objetivo es encontrar los distintos anchos de cada tira, dados el espesor y la permitividad eléctrica relativa. Lo que determina la variación en el ancho de la tira es la impedancia característica que se desea que tenga. Según Pozar 2012, para esto se usan las siguientes ecuaciones:

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{for } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{for } W/d > 2 \end{cases}$$

Se puede observar que es necesario calcular los resultados de ambas ecuaciones para decidir cuál utilizar. Los factores A y B son dependientes de la impedancia característica de la tira de microstrip, y se calculan de la siguiente manera:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right)}$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}$$

Filtro Pasa-Bajas.

Los filtros de interés en este proyecto son circuitos lineales, lo que significa que si existe una entrada senoidal la salida también debe ser senoidal. Estos filtros pueden ser representados sin problema por una red de dos puertos (Sedra, 1998), como la que se muestra en la siguiente figura:

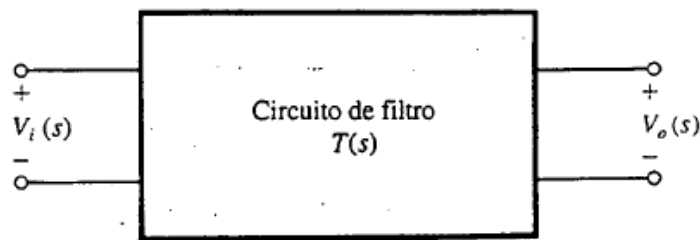


Figura 14. Filtro representado como estructura de dos puertos. (Sedra, 1998).

La función de estos filtros es seleccionar frecuencias. Esto significa que para un rango de frecuencias especificado las señales que entran a la red no salen atenuadas, mientras que las señales fuera de este rango sufren una atenuación importante. Se decide diseñar un filtro de tipo Butterworth de orden 3, de tipo pasa bajas con una frecuencia de corte a 1 GHz.

Para pasar a la implementación del filtro se utilizaron tres programas: Matlab, Pspice y ADS para obtener la mayor cantidad de información acerca del comportamiento del filtro usando simulaciones.

Síntesis y simulación.

Siguiendo el proceso descrito en la parte “ecuaciones de diseño”, tras des-normalizar los valores de los elementos, se utiliza MATLAB para simular la respuesta del filtro. Se multiplica las matrices de transmisión de cada elemento; la respuesta del filtro es la siguiente:

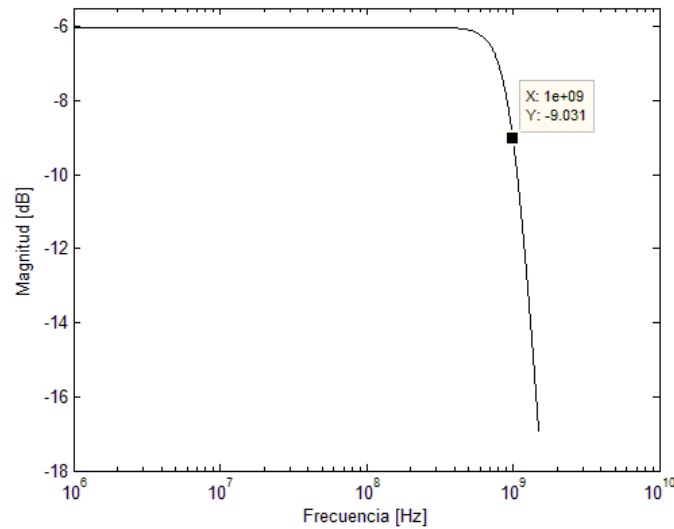


Figura 15. Respuesta del filtro con elementos discretos des-normalizados usando MATLAB.

Tras aplicar las identidades de Kuroda, se repite el mismo procedimiento en Matlab para simular la respuesta del filtro con la presencia de elementos unitarios. Se obtienen los siguientes resultados:

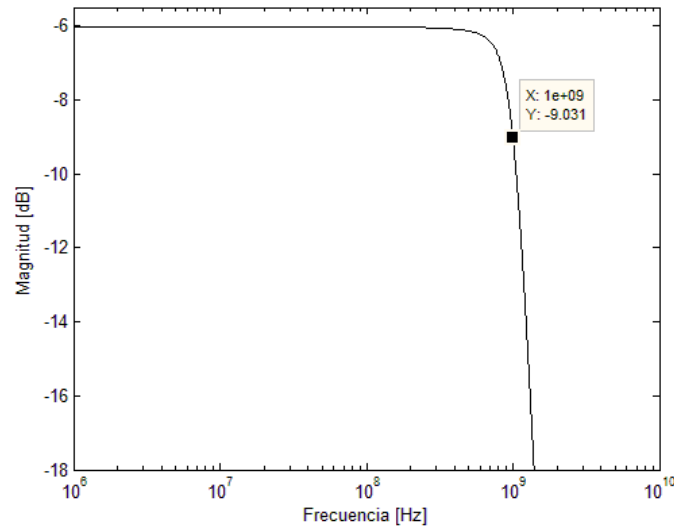


Figura 16. Respuesta del filtro con elementos discretos tras aplicar Kuroda usando MATLAB.

Finalmente, se realizan las transformaciones necesarias para obtener la respuesta del filtro utilizando stubs:

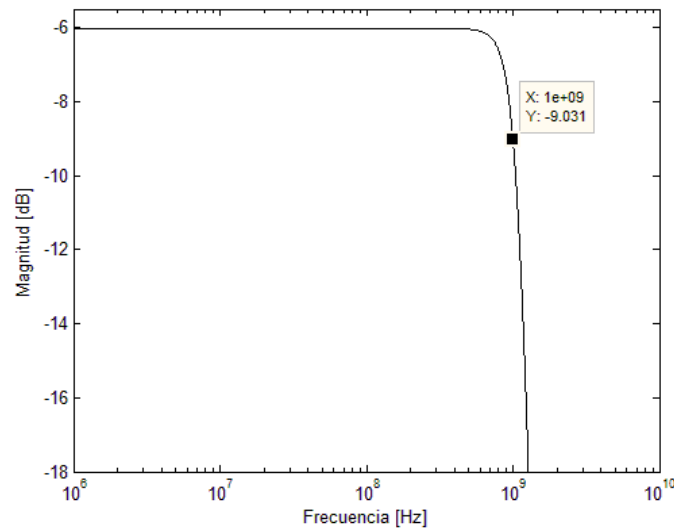


Figura 17. Respuesta del filtro con stubs usando MATLAB.

Por otro lado, se realizaron las mismas simulaciones utilizando Orcad PSPICE. Se muestra la topología usada junto con los resultados para la respuesta del filtro con elementos discretos:

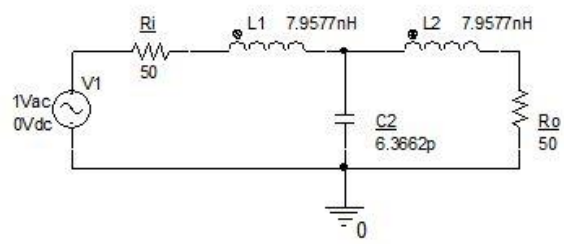


Figura 18. Estructura del filtro con elementos discretos en ORCAD PSPICE.

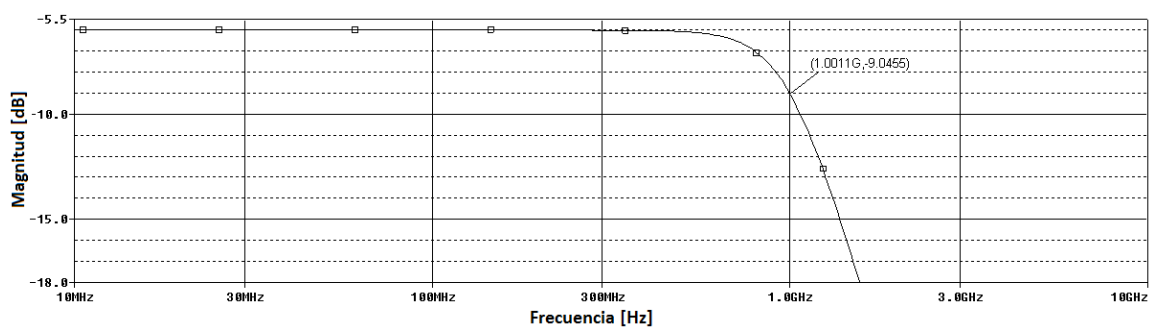


Figura 19. Respuesta del filtro con elementos discretos en ORCAD PSPICE.

Se repite el mismo procedimiento tras aplicar las identidades de Kuroda:

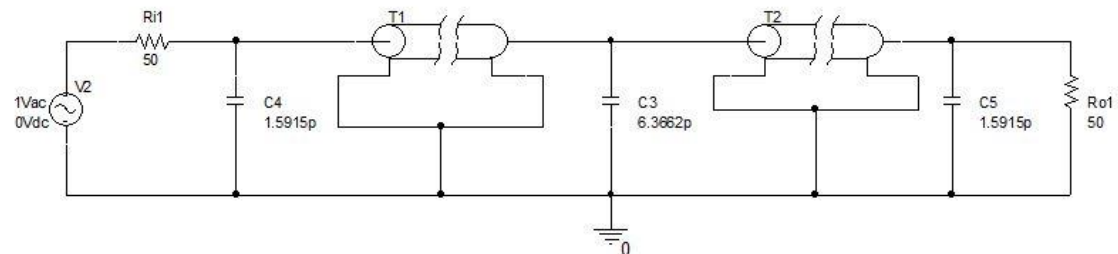


Figura 20. Estructura del filtro tras aplicar Kuroda en ORCAD PSPICE.

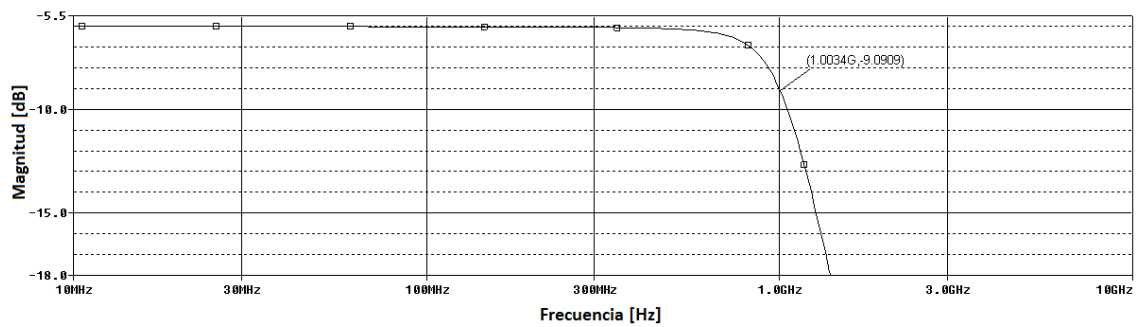


Figura 21. Respuesta del filtro tras aplicar Kuroda en ORCAD PSPICE.

Finalmente, se reemplazan los elementos discretos por stubs:

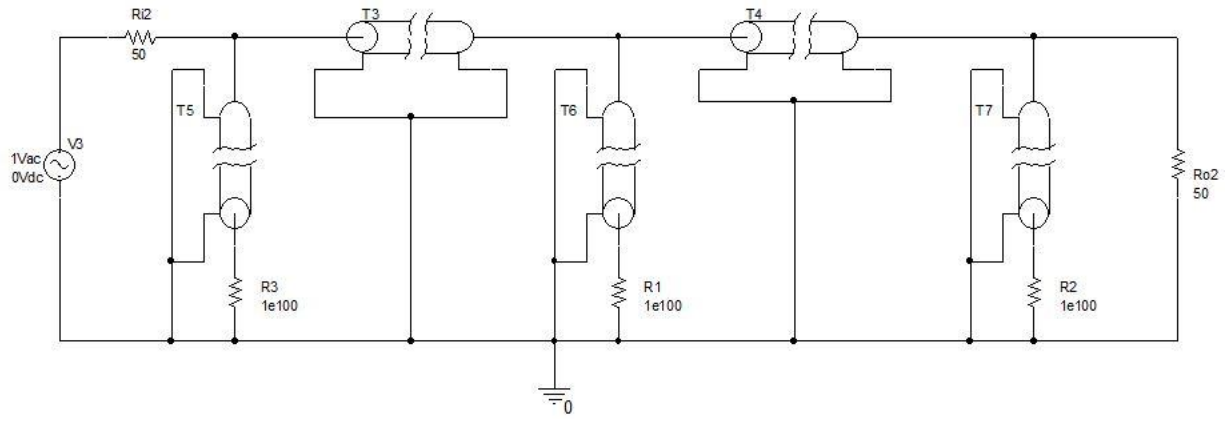


Figura 22. Estructura del filtro con stubs en ORCAD PSPICE.

Se observa que hay una resistencia con un valor muy grande en el esquema, para representar un circuito abierto. La respuesta de esta estructura es la siguiente.

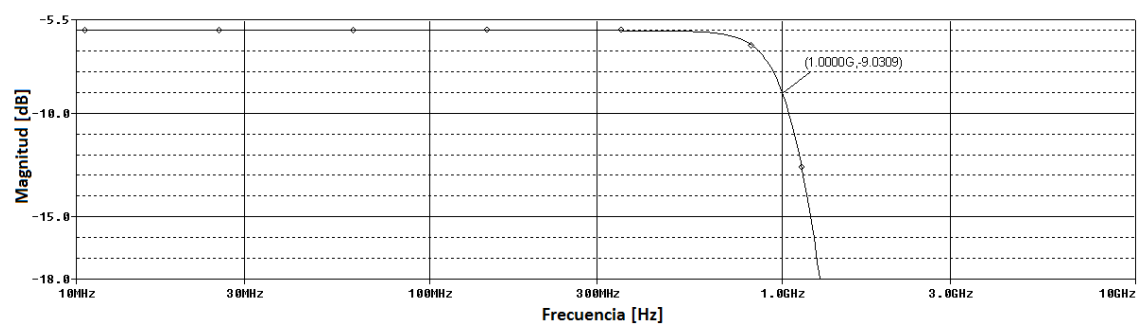


Figura 23. Respuesta del filtro con stubs en ORCAD PSPICE.

Finalmente, es necesario obtener los anchos de las tiras de cobre a partir de las impedancias características de cada stub. Para esto se necesita conocer las características del microstrip a usar, como se puede observar en la figura 5. Se desea obtener el ancho W dado que se conoce d , y ϵ_r . En este proyecto se va a usar una lámina de cobre DiClad 880, la cual tiene una permitividad eléctrica relativa de 2.2 y un espesor de 3.17 mm (Rogers Corp, 2016). Se obtienen los siguientes resultados tras aplicar las ecuaciones que se mencionaron en la sección anterior.

Tabla 1. Ancho y largo de las tiras de cobre en función de la impedancia.

Impedancia [Ohms]	Ancho [mm]	Largo [mm]
25	25.07	27,38
50	9.87	27.57
100	2.88	28.43

Es importante que todos los stubs se unan en sus puntos medios. Una vez que se conocen las dimensiones del filtro se procede a simular la línea de transmisión en ADS. La topología usada en el software es la siguiente:

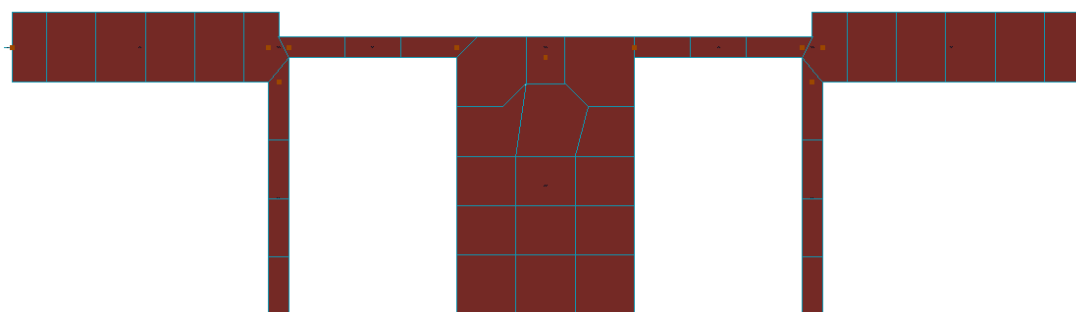


Figura 24. Topología en ADS

La simulación arroja el siguiente resultado:

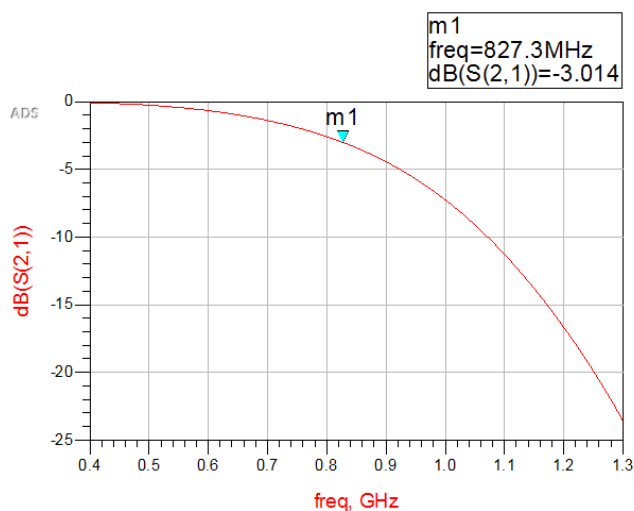


Figura 25. Resultado de simulación

Se observa en la figura 25 que la frecuencia de corte del filtro no se encuentra a la frecuencia diseñada. Esto se debe a que el stub central es muy grueso, y nuevamente se tiene que el problema del desfase de la señal entre la entrada y la salida del capacitor. Para solucionar estos problemas se decide separar el stub central en dos en paralelo, que tengan la mitad del ancho. Se obtiene la siguiente topología.

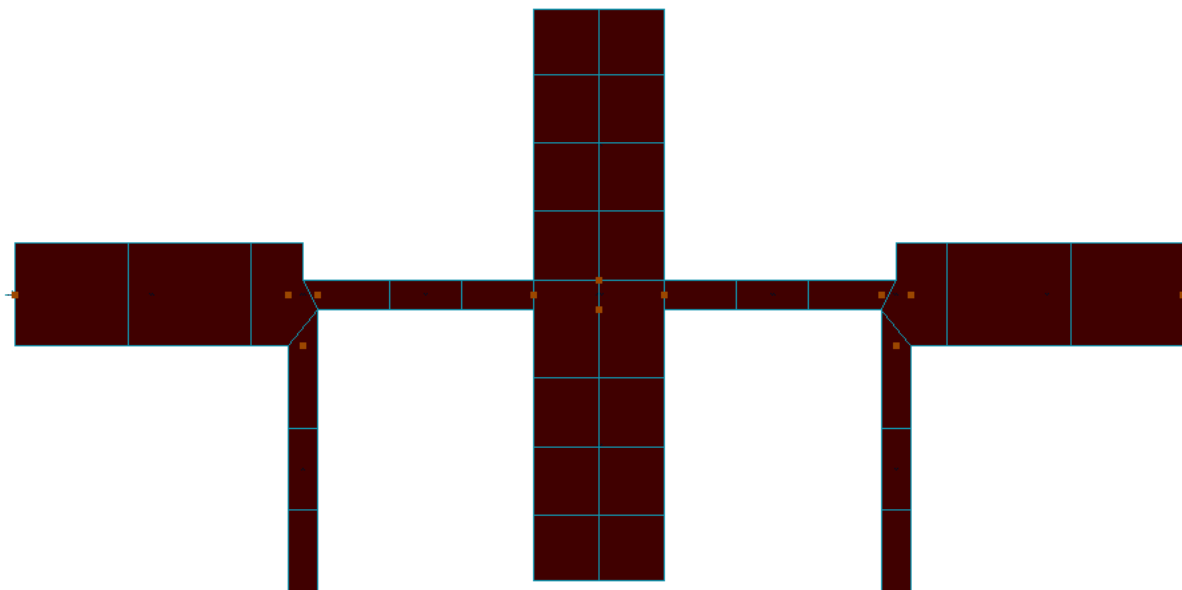


Figura 26. Topología final ADS

Se obtiene la siguiente respuesta en la simulación:

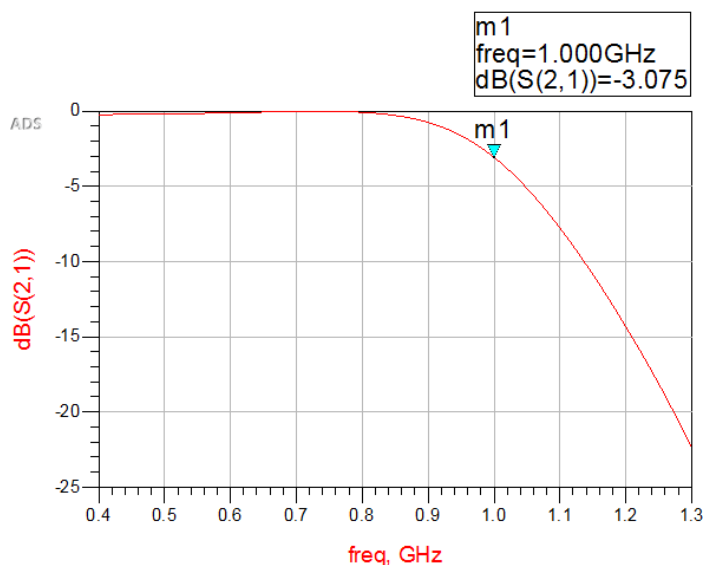


Figura 27. Respuesta en frecuencia ADS.

Protocolo experimental

El eje de este proyecto es la implementación del filtro una vez calculadas todas las dimensiones teóricas del microstrip. Para llevar a cabo esta tarea se usa una película seca foto-resistiva y luz UV para replicar el patrón deseado sobre una lámina de cobre de alta frecuencia.

Patrón en Adobe Illustrator.

Primer se procede a dibujar un patrón de caminos de cobre con las dimensiones resultantes del cálculo teórico. En la figura 28 se puede observar cómo se verían dichos caminos:

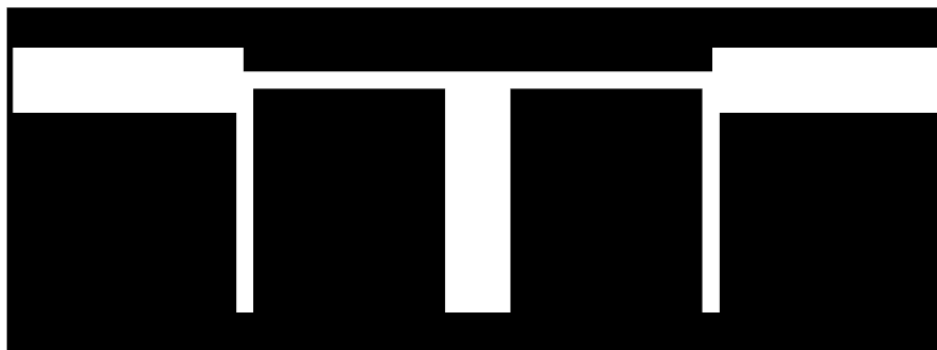


Figura 28. Caminos de cobre en Adobe Illustrator.

Impresión en acetato.

El segundo paso es imprimir el patrón diseñado sobre una hoja de acetato. La impresión debe realizarse con una impresora láser para mantener una alta calidad de impresión. Se imprime el patrón dos veces para ponerlos uno sobre otro y asegurarse de que la luz no pueda pasar por las secciones negras. El acetato se ve de la siguiente manera:

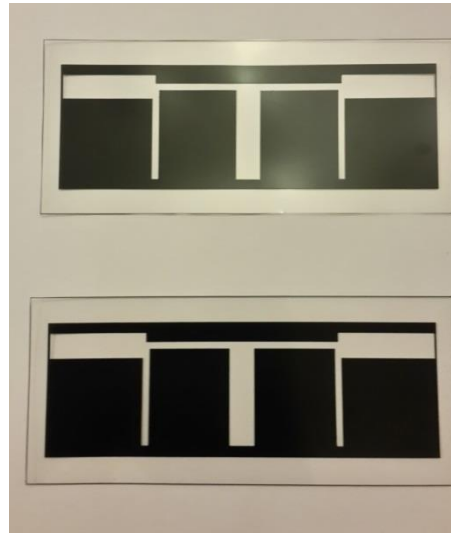


Figura 29. Impresión del acetato

Aplicación de la película foto-resistiva.

A continuación se debe colocar la película foto-resistiva sobre la lámina de cobre previamente lavada. Cabe mencionar que la película foto-resistiva es muy sensible a la luz, inclusive si no proviene de una cámara UV. La luz solar, inclusive la que se tiene en una habitación normal por la tarde, va a revelar la película foto-resistiva si incide sobre la misma por un tiempo prolongado. Por esta razón, la película debe cubrirse en un envoltorio completamente negro. Idealmente se tendría un cuarto oscuro, que solo tenga iluminación con luz roja. De manera análoga a los cuartos para revelar fotografías. Por falta de recursos no se pudo trabajar en un cuarto similar en este proyecto, sin embargo se minimizó los efectos de la luz solar sobre la película foto-resistiva.

Una segunda consideración importante es la calidad de la lámina de cobre. Para este proyecto se contó con la donación de dos laminas Diclad880 por parte de la empresa Rogers RF, por lo que las láminas de cobre son immaculadas. Empero, si se trabajara con otra lámina habría que considerar limpiar y limar todas las asperezas e impurezas que se encuentren sobre la superficie de cobre.

Dicho esto, se puede pasar a la aplicación de la película foto-resistiva, esta tiene dos cubiertas plásticas, una a cada lado. Se remueve la cubierta del lado cóncavo de la película. Se colocan gotas de agua sobre la placa de cobre con un atomizador y se coloca el lado descubierto de la película sobre el cobre. Se coloca una tela y se aplica calor levemente (100°C). Para esto se puede usar una plancha común o una pistola de calor. Si se usa la plancha se la debe calibrar a un potencia baja y planchar solo durante 2 minutos. Durante el planchado se debe parar ocasionalmente para eliminar burbujas de aire y agua con la ayuda de un rodillo plástico. Tras este proceso la placa de cobre con la película foto-resistiva laminada sobre ella se ve como en la figura 30:



Figura 30. Placa de cobre con película foto-resistiva.

Exposición UV

El siguiente paso consiste en revelar la película foto-resistiva adherida al cobre. Para lograr esto se coloca el patrón impreso en acetato sobre la película foto-resistiva, que a su vez se encuentra laminada sobre la placa de cobre. Este sistema se coloca dentro de una cámara de exposición UV como la que se ve en la figura 31:



Figura 31. Cámara de exposición UV.

Se expone al sistema a luz UV durante 90 segundos y se obtiene el resultado que se muestra en la figura 32. Nótese el patrón generado sobre la película foto-resistiva.



Figura 32. Foto del sistema después de ser revelado

Revelación de la película foto-resistiva.

Después de exponer el sistema a luz UV se procede a revelar la parte que no se desea del material foto-resistivo. De manera tal que, usando la película seca, se plasme el patrón del acetato sobre la lámina de cobre. Para esto se usa la solución reveladora 4615. El resultado obtenido se muestra en la figura 33.



Figura 33. Lámina de cobre con el patrón del circuito en la película foto-resistiva.

Remoción del cobre y el material foto-resistivo

A continuación se sumerge el sistema en percloruro férrico para remover todo el cobre que ha quedado expuesto. Posteriormente se usa Acetona para remover la parte restante de la película foto-resistiva. Por último se sueldan dos SMA a los extremos para poder caracterizar el circuito en un analizador de redes. El resultado obtenido se muestra en la figura 34.

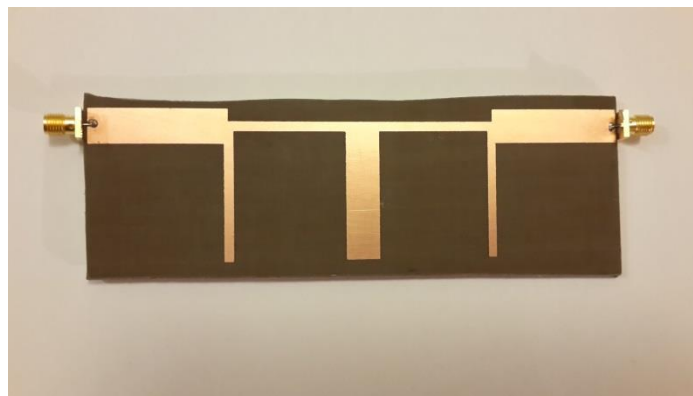


Figura 34. Filtro implementado

Resultados

Primero se calibra el analizador de redes usando el kit de calibración 85033E 3.5 mm. Se obtiene el siguiente diagrama de bode:

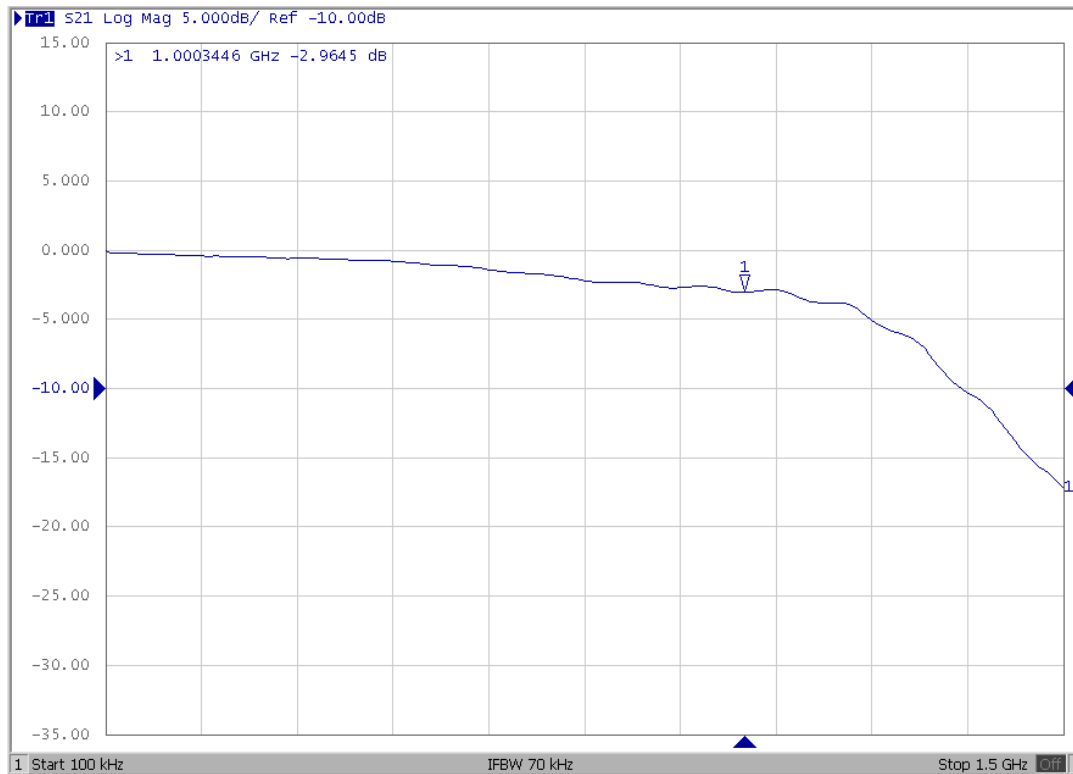


Figura 35. Diagrama de Bode en el analizador de redes.

A 1 [GHz] se obtiene una atenuación de 2.96 [dB], el error obtenido frente a las especificaciones de diseño es de 1.18%.

CONCLUSIONES

La teoría para el diseño de circuitos usando microstrip es ampliamente usada en la industria y ha sido estudiada a profundidad desde hace varios años. A pesar de esto, circuitos de este tipo no son fabricados en Ecuador sino importados por catálogo. En este proyecto se han elaborado filtros de alta frecuencia, y se ha corroborado que la técnica de microstrip ofrece una gran precisión en la implementación de los mismos. Previamente la construcción de estos filtros no era factible en la USFQ debido a la falta de equipos y de un método para seguir. El presente proyecto ha solucionado estos problemas, creando un método simple a seguir y dejando en la universidad los instrumentos necesarios para su implementación. Los errores obtenidos estuvieron alrededor del 1.18%.

Se espera que de ahora en adelante todos los alumnos de ingeniería electrónica que estudien la materia de microondas salgan con experiencia práctica implementando filtros de alta frecuencia; siendo este el primer paso para que dichos filtros sean ensamblados en el país.

El enfoque de esta tesis fueron filtros, sin embargo con la misma técnica se pueden realizar acopladores, divisores de potencia, adaptadores, etc. A futuro se puede pensar en algunos proyectos adicionales que tengan esto como base. Se puede por ejemplo, caracterizar las baquelitas que se encuentran a la venta en el país para conocer su permitividad eléctrica y su espesor y verificar si estos valores son homogéneos en toda la placa. Otra alternativa interesante sería un proyecto de química en el que se cree un material dieléctrico sobre el cual se realice electrodeposición de cobre. De esta manera, se evitaría la importación de placas y se ahorraría ese costo.

Se recomienda revisar bien que las dimensiones de los acetatos impresos coincidan con las del diseño ya que es probable que al imprimir se presenten errores. Además se debe tener en

cuenta que los anchos de los stubs sean coherentes, esto quiere decir que se debe evitar que el desfase de la señal entre los dos lados no afecte al comportamiento del circuito.

Se concluye finalmente que el proyecto fue realizado con éxito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cheng, D. (1998). Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería. Mexico: Pearson.
- Gupta, K., Garg, R., Bahl, I., Bhartia, P. (1996). Microstrip lines and slot lines. Boston: Artech House.
- Okoshi, T., Miyoshi, T. (1972). The planar circuit – An Approach to Microwave Integrated Circuitry. Obtenido el 22 de septiembre de 2016 desde <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1127730>.
- Ozaki, H., Ishii, J. (2003). Synthesis of a class of strip-line filter. Obtenido el 22 de septiembre de <http://ieeexplore.ieee.org/document/1086441>.
- Pozar, D. (2012). Microwave Engineering. Boston:Wiley.
- Rogers Corp. (2016). Product Selector Guide. Obtenido el 10 de octubre de 2016 de <https://www.rogerscorp.com/documents/2532/acs/ACS-Product-Selector-Guide-and-Standard-Thicknesses-and-Tolerances.pdf>
- Sedra, A., Smith, K. (1998). Circuitos microelectrónicos. Mexico: Oxford University Press.
- SEMTECH. (2006). RF Design Guidelines: PCB Layout and Circuit Optimization. Obtenido el 15 de septiembre de 2016 desde http://www.semtech.com/images/datasheet/rf_design_guidelines_semtech.pdf
- Singh, I., Tripathi, V. (2011). *Micro strip Patch Antenna and its Applications: a Survey*. Obtenido el 23 de septiembre de 2016 desde <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.208.7887&rep=rep1&type=pdf>
- Ulaby, F. (2007). Fundamentos de aplicaciones de electromagnetismo, quinta edición. Mexico: Pearson.

ANEXO A: BUTTERWORTH, VALORES NORMALIZADOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS

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

Source: Reprinted from G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House, Dedham, Mass., 1980, with permission.

En la tabla precedente se observa que N es el orden del filtro. g_{N+1} representa la carga del circuito. Todos los otros g 's representan los elementos del circuito.

ANEXO 2: CHEBYSHEV, VALORES NORMALIZADOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS.

0.5 dB Ripple											
N	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}	g_{11}
1	0.6986	1.0000									
2	1.4029	0.7071	1.9841								
3	1.5963	1.0967	1.5963	1.0000							
4	1.6703	1.1926	2.3661	0.8419	1.9841						
5	1.7058	1.2296	2.5408	1.2296	1.7058	1.0000					
6	1.7254	1.2479	2.6064	1.3137	2.4758	0.8696	1.9841				
7	1.7372	1.2583	2.6381	1.3444	2.6381	1.2583	1.7372	1.0000			
8	1.7451	1.2647	2.6564	1.3590	2.6964	1.3389	2.5093	0.8796	1.9841		
9	1.7504	1.2690	2.6678	1.3673	2.7239	1.3673	2.6678	1.2690	1.7504	1.0000	
10	1.7543	1.2721	2.6754	1.3725	2.7392	1.3806	2.7231	1.3485	2.5239	0.8842	1.9841

3.0 dB Ripple											
N	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}	g_{11}
1	1.9953	1.0000									
2	3.1013	0.5339	5.8095								
3	3.3487	0.7117	3.3487	1.0000							
4	3.4389	0.7483	4.3471	0.5920	5.8095						
5	3.4817	0.7618	4.5381	0.7618	3.4817	1.0000					
6	3.5045	0.7685	4.6061	0.7929	4.4641	0.6033	5.8095				
7	3.5182	0.7723	4.6386	0.8039	4.6386	0.7723	3.5182	1.0000			
8	3.5277	0.7745	4.6575	0.8089	4.6990	0.8018	4.4990	0.6073	5.8095		
9	3.5340	0.7760	4.6692	0.8118	4.7272	0.8118	4.6692	0.7760	3.5340	1.0000	
10	3.5384	0.7771	4.6768	0.8136	4.7425	0.8164	4.7260	0.8051	4.5142	0.6091	5.8095

Source: Reprinted from G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House, Dedham, Mass., 1980, with permission.

Se tienen las mismas consideraciones que para la tabla Butterworth