

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN PABLO

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES**



**“SÍNTESIS DE FILTROS DE BANDA DUAL UTILIZANDO LA TÉCNICA DE
MATRIZ DE ACOPLAMIENTO”**

Trabajo de Investigación presentada por la alumna:

LUZBELIA SABRINA AMADO LIMA

Para optar el Grado de Bachiller en Ingeniería
Electrónica y de Telecomunicaciones.

Asesora: Dra. Patricia Raquel Castillo Aranibar

AREQUIPA-PERÚ, 2019

“Presencia de ánimo y valor en la adversidad, valen para conquistar el éxito
más que un ejército”

John Dryden, 1631-1700

Índice general

Abstract	3
Resumen	5
1 Introducción	7
1.1 Planteamiento del problema	7
2 Marco Teórico	9
2.1 Resonadores	9
2.2 Técnica de matriz de acoplamiento	10
2.3 Valores principales de la matriz de acoplamiento	11
2.4 Matriz de Scattering	12
2.5 Filtros de banda dual	12
3 Estado del arte	15
3.1 Matriz de acoplamiento	15
3.2 Optimización de la matriz de acoplamiento	18
3.3 Función de admitancia	19
3.4 Diferenciadores de microonda	21
3.5 Tratamiento de filtros de banda dual	22
4 Conclusiones	27
Bibliografía	29

Índice de figuras

2.1	Estructura circuital de un resonador	9
2.2	Tipos de representación de la matriz de acompañamiento	10
2.3	Red circuital formada por resonadores y puertos acoplados entre sí .	11
2.4	Ejemplo de transformación de filtro pasaalto a uno de banda doble .	13
3.1	Esquema de enrutamiento y acoplamiento para dispositivos de uno o dos puertos	16
3.2	Prototipo de red de dos puertos formada por resonadores pasabajo acoplados entre sí	17
3.3	Esquema de enrutamiento y acoplamiento	17
3.4	Matriz de acoplamiento $N + 2 \times N + 2$	17
3.5	Respuesta del filtro simétrico de banda dual, especificando los ceros de transmisión y reflexión, y los lados límite de la banda de paso . .	19
3.6	Filtro original en unión con la inserción de desplazamiento de fase .	20
3.7	Prototipo de un filtro de topología mezclada de N orden	20
3.8	Respuesta en frecuencia de un diferenciador de primer y segundo orden	21
3.9	Transformación de un prototipo de banda única a multibanda, utilizando el mapeo de frecuencia	23
3.10	Prototipo de acoplamiento de banda única de 4to orden y prototipo de acoplamiento de triple banda de 12vo orden	23
3.11	Resonadores en anillo de lazo abierto para filtros de banda dual . . .	24
3.12	Representación de la estructura del filtro de banda dual con capacitor variable	25
3.13	Circuito de un filtro de banda dual con capacitor variable	25

Abstract

Microwave filters are present in all communications systems, the search for a device with a high selectivity, optimal rejection of unwanted frequencies, low losses, is made increasingly intense, but these are some characteristics that with the use of resonant elements coupled together, can be achieved.

One of the methods for the design of microwave filters is the coupling matrix technique. In order to cover this synthesis it is necessary to choose which model will be used to convert it to a matrix arrangement in the most optimal way possible. Once this has been done, an algorithm will be developed that will include all the formulas necessary to obtain, based on fundamental parameters, such as resonance frequencies, bandwidth, filter order, etc., a matrix arrangement of the couplings between the resonators that make up the filter. Subsequently, everything studied will be translated into a programming code, which will be a tool used to deal with the synthesis of dual-band filters through frequency transformations.

Keywords: coupling matrix, microwave filters, frequency response, transmission and reflection polynomials, dual-band filters.

Resumen

Los filtros de microondas están presentes en todos los sistemas de comunicaciones, la búsqueda por contar con un dispositivo con una alta selectividad, óptimo rechazo a frecuencias no deseadas, bajas pérdidas, se realiza cada vez de forma más intensa, pero estas son algunas características que con el uso de elementos resonantes acoplados entre sí, se puede alcanzar.

Uno de los métodos para el diseño de filtros de microondas, es la técnica de matriz de acoplamiento. Para abarcar esta síntesis es necesario elegir que modelo será el utilizado para convertirlo a un arreglo matricial de la manera más óptima posible. Una vez realizado esto, se desarrollará un algoritmo que incluirá todas las fórmulas necesarias para obtener, en base a parámetros fundamentales, como ejemplo las frecuencias de resonancia, el ancho de banda, el orden del filtro, etc., un arreglo matricial de los acoplamientos entre los resonadores que conforman el filtro. Posteriormente todo lo estudiado se plasmará en un código de programación, que será una herramienta utilizada para tratar el tema de síntesis de filtros de banda dual a través de transformaciones en frecuencia.

Palabras clave: matriz de acoplamiento, filtros microonda, polinomios de transmisión y reflexión, respuesta en frecuencia, polinomios de transmisión y reflexión, filtros de banda dual.

1 Introducción

En los últimos años el gran desarrollo que se ha venido experimentando en todo lo relacionado a sistemas electrónicos y de telecomunicaciones demanda la creación de dispositivos de microondas cada vez más efectivos. Los filtros de microondas están presentes en todos los sistemas de comunicaciones, su concepción y diseño es relevante según la aplicación a la cual van dirigidos; una alta selectividad, óptimo rechazo a frecuencias no deseadas, bajas pérdidas, bajo costo, diseño más compacto, son algunas de las muchas características que un filtro proporciona dependiendo del diseño que éste tenga. El uso de elementos resonantes con acoplamientos entre sí, contribuye en gran escala a alcanzar todos estos parámetros obteniendo una función de transferencia basado en dichos acoplamientos.

Existen muchos métodos convencionales de diseño de filtros de microondas, como por ejemplo el método de parámetros de imagen y el de pérdidas por inserción, pero actualmente una de las más resaltantes es la técnica de matriz de acoplamiento, que no solo involucra un análisis teórico sino también matemático, todo esto plasmado en un arreglo matricial a través de un algoritmo obtenido al momento de realizar ésta síntesis.

Este proyecto de tesis esta orientado a la obtención de una herramienta basada en la generación de un código de programación apoyado en el algoritmo propuesto de la síntesis de matriz de acoplamiento orientado a una aplicación que actualmente ha alcanzado un alto auge, los filtros multibanda con especial relevancia a síntesis de filtros de banda dual, utilizando el software Matlab, cuya alta confiabilidad y flexibilidad lo hacen apto para el desarrollo de ésta tesis.

1.1. Planteamiento del problema

Considerar los acoplamientos entre cada resonador que conforman la estructura integral de un filtro es relevante para el diseño del mismo, entonces, se presenta la necesidad de contar con un código de programación que permita generar una matriz de acoplamiento a través de parámetros específicos ingresados según el filtro que se quiera obtener (simple o multibanda).

Muchas investigaciones orientadas a diversas aplicaciones en relación a la síntesis de filtros utilizan la técnica de matriz de acoplamiento, pero a pesar de que es muy empleada no se tiene acceso directo a comandos específicos que produzcan dicha matriz y que puedan ser utilizados para la síntesis de filtros de banda dual, que es el

objetivo principal, siendo éste el problema que el presente proyecto de tesis planea resolver demostrando así la funcionalidad y eficacia del método propuesto.

Abarcar este tema de tesis es importante para la rama de radio frecuencia, ya que se presenta como un nuevo método diferente a los convencionales, es innovador y eficaz, no solo podemos orientarlo a trabajar con filtros de banda simple sino también a filtros multibanda , cuya aplicación esta tomando un gran avance en la actualidad.

2 Marco Teórico

En este apartado daremos a conocer algunos conceptos fundamentales para el desarrollo de la tesis, que nos permitirá comprender el proyecto que se quiere desarrollar.

2.1. Resonadores

Los filtros me permiten tener una respuesta selectiva a nivel de frecuencia; esto se logra con la implementación de resonadores, Figura 2.1, que son circuitos formados normalmente por una resistencia, un capacitor y una inductancia, estos elementos se encuentran acoplados entre sí electromagnéticamente.

El acoplamiento entre dichos resonadores, son valores numéricos que pueden ser obtenidos mediante la aplicación de diferentes fórmulas, según el circuito con el que se trabaje. Como sabemos la mayoría de filtros con los que estamos acostumbrados a trabajar tienen como prototipo base, el filtro pasabajo, a partir de éstos poder nosotros empezar a realizar un análisis exhaustivo de dichos circuitos.

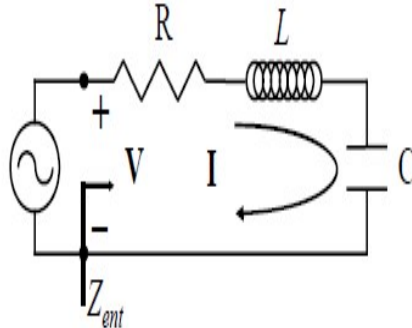


Figura 2.1: Estructura circuital de un resonador

Para un sistema de dos puertos, debemos saber que existen distintos métodos de síntesis que pueden complicar o facilitar de alguna manera el desarrollo de la tesis, el que tomaremos en cuenta para proceder con el análisis será una síntesis matricial, esto debido a:

- El trabajar con matrices nos permite aplicar diferentes tipos de operaciones a toda la red que se encontrará representada en dicha matriz de acoplamiento

(frecuencias de resonancia, coeficientes de acoplamiento, valores numéricos de los elementos).

- Si bien es cierto existen muchos otros datos característicos que pueden ser obtenidos del circuito, los que se encuentran en la matriz son fijos, es decir, pese a que se realice una normalización en la red, éstos no cambiarán; por ello se podría decir que es posible obtener diferentes redes que tengan el mismo comportamiento.
- Nos permitirá tener una respuesta en frecuencia más eficiente, debido a que los datos calculados son más precisos.
- Permitirá reconfigurar la topología de la red.

2.2. Técnica de matriz de acoplamiento

Esta técnica ha adquirido gran relevancia para el diseño de filtros microondas, no solo involucra un análisis teórico sino también matemático, todo esto plasmado en un arreglo matricial a través de un algoritmo obtenido al momento de realizar ésta síntesis.

Se trata básicamente de encontrar los acoplamientos entre cada resonador que conforman el circuito integral del filtro, cuyos valores serán colocados en una matriz.

Ahora bien, hay dos tipos de matriz para la representación de los datos, como se muestra a continuación.

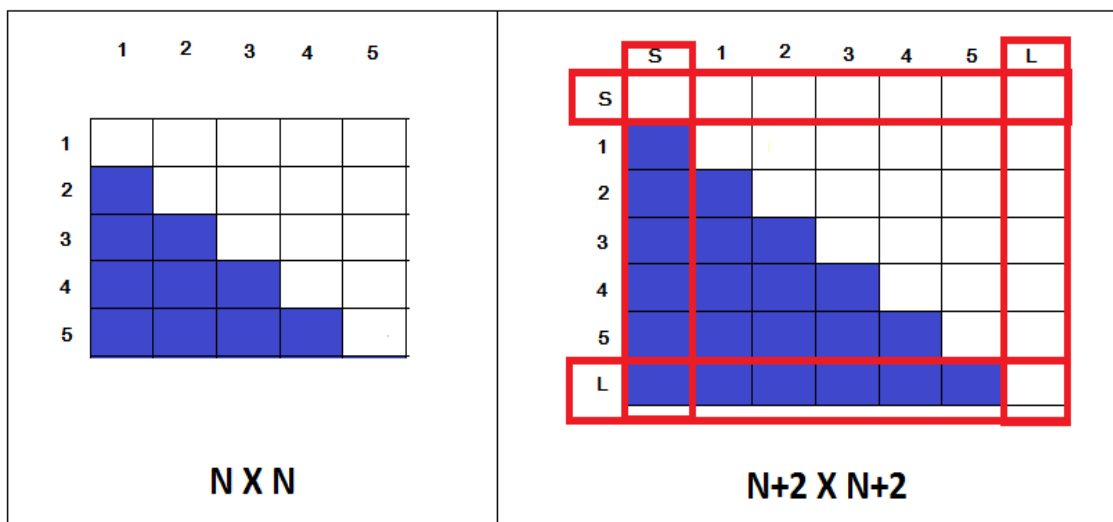


Figura 2.2: Tipos de representación de la matriz de acompañamiento

- $N \times N$ Esta matriz contiene los acoplamientos presentes en la red, donde N corresponde al grado del filtro o número de resonadores.
- $N+2 \times N+2$ Esta matriz contiene los acoplamientos presentes en la red incluyendo la fuente (S) y carga (L).

Hay que resaltar que esta tesis abordará el análisis para la obtención de la matriz de acoplamiento $N \times N$.

2.3. Valores principales de la matriz de acoplamiento

En la Figura 2.2 podemos observar un circuito formado por círculos abiertos o cerrados y líneas continuas o discontinuas, que van a representar los puertos, los nodos y los acoplamientos que existen entre cada elemento.

- Acoplamiento principal
- Acoplamiento cruzado
- Nodos resonantes
- Nodos no resonantes (puertos)

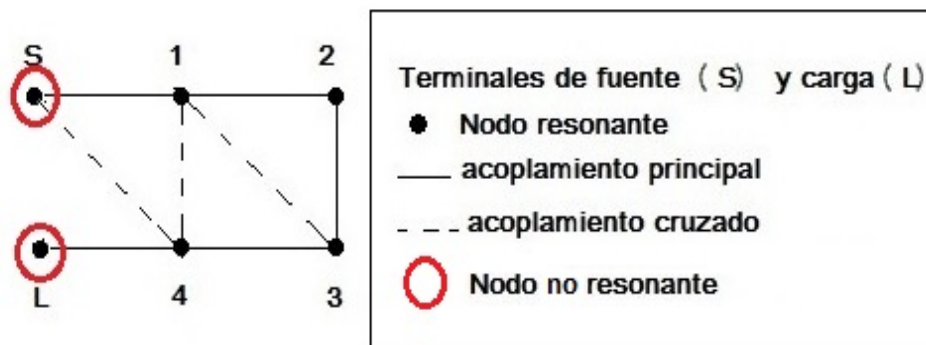


Figura 2.3: Red circuital formada por resonadores y puertos acoplados entre sí

Los valores que se obtengan del circuito presentado en la Figura 2.2, acorde a la aplicación de fórmulas a medida que se desarrolle la presente tesis, serán colocados en la matriz respectiva.

2.4. Matriz de Scattering

Conocido también como parámetros S, utilizados para representar ya sean coeficientes de reflexión o de transmisión según el plano de referencia en que nos situemos.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

Hay algunas propiedades que serán de importancia para el desarrollo de esta tesis y que serán utilizadas a medida que se vaya haciendo el análisis matemático de la misma.

- El trabajo a realizar será con redes recíprocas, cumpliendo lo siguiente.

$$S_{21} = S_{12}$$

- Así mismo asumiremos que se cumple con la condición de unitariedad, lo que significa que trabajamos con redes sin pérdidas, y lo expresamos a través de la siguiente ecuación.

$$|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1$$

2.5. Filtros de banda dual

Para poder abordar el tema de filtros de banda doble es necesario partir de filtros de banda simple, los que pueden ser:

Filtro pasabajo	Filtro pasaalto	Filtro pasabanda
Este tipo de filtro me permite el paso de frecuencias bajas, desde cero hasta la frecuencia de corte determinada por el usuario.	Este tipo de filtro me permite el paso de frecuencias altas, la frecuencia de corte determinada por el usuario en adelante.	Este tipo de filtro me permite el paso de un rango de frecuencias deseadas, que se encuentran entre las frecuencias de corte determinadas por el usuario, es así que podemos denotar también la banda de paso y la de rechazo.

Debemos resaltar que para determinar estos tipos de filtros, en nuestro caso, es importante considerar los ceros de transmisión y los de reflexión, que serán los que me ubicarán las frecuencias deseadas.

Para el tratamiento de banda dual es necesario partir de un filtro pasabanda, pasabajo o pasaalto el cual, haciendo una transformación en la frecuencia, se logra dividir y así obtener dos bandas de trabajo.

Esto implicará lo siguiente:

- El grado del filtro se duplica.
- La cantidad de ceros de transmisión y reflexión se duplican.
- La cantidad de polos (denominador común) de S_{21} y S_{11} se duplica.

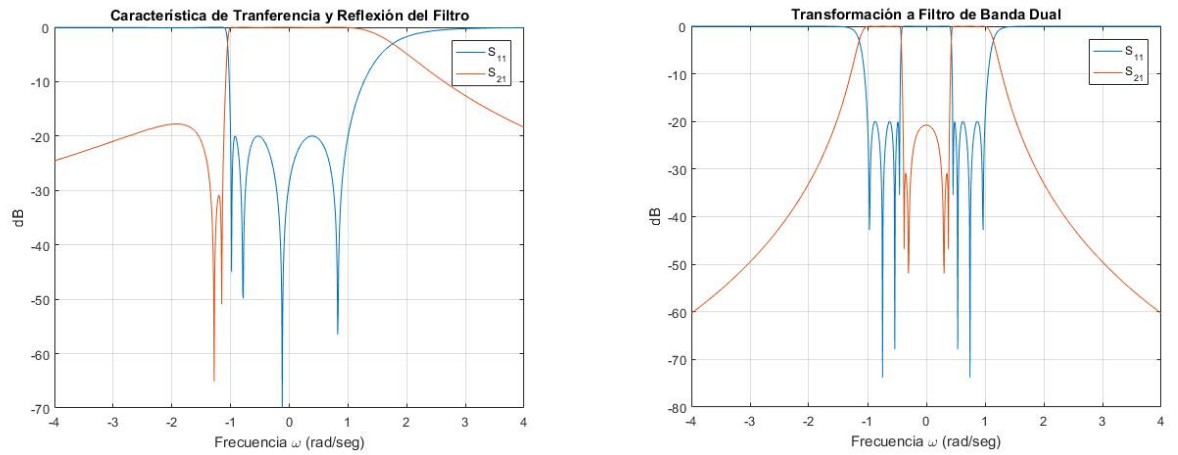


Figura 2.4: Ejemplo de transformación de filtro pasabajo a uno de banda doble

3 Estado del arte

A lo largo del tiempo se han ido realizando numerosas investigaciones acerca de los diferentes sistemas de comunicaciones, que tienen como parte de su estructura a los filtros, que permiten tener una respuesta selectiva a nivel de frecuencia. Son muchas y muy variadas las investigaciones que se realizan con la finalidad de poder obtener mejores resultados a partir del análisis de las diferentes características que podemos extraer de un filtro que utiliza resonadores, los cuales se encuentran acoplados entre sí electromagnéticamente.

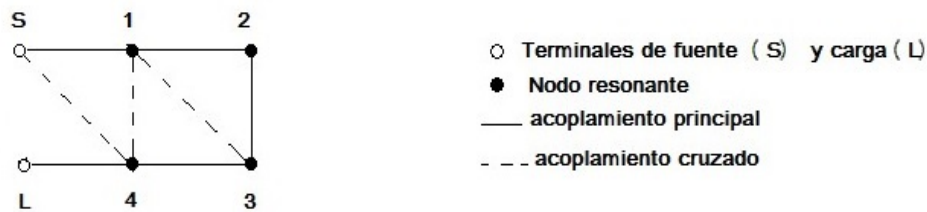
En ésta sección, se definen puntos importantes a considerar para la síntesis de filtros de banda dual a través método propuesto, empezando por el tratamiento de la matriz de acoplamiento y su optimización; pasando al análisis de la función de admitancia, el estudio de diferenciadores de microonda, y la síntesis de filtros de banda dual. Todo lo mencionado debidamente sustentado en investigaciones previas y reconocidas.

3.1. Matriz de acoplamiento

El análisis realizado según los distintos trabajos revisados en esta sección presentan diferentes características relevantes para esta tesis, en [ZLDC17] presenta el método de matriz de acoplamiento orientado al diseño de dispositivos de un solo puerto, con y sin pérdidas, utilizando una topología integrada. El hablar de un solo puerto implica trabajar con el coeficiente de reflexión S_{11} y la función de admitancia, cuyo análisis es característico y crucial para abordar la técnica de matriz de acoplamiento.

Un rasgo importante presente en el artículo [ZLDC17] es la comparación del uso del método de matriz de acoplamiento para el procedimiento de reducción de forma integrada o en línea y de forma plegada, orientado a trabajar con dispositivos de uno o dos puertos respectivamente, cuyo esquema de enrutamiento y acoplamiento varía según se decida trabajar con uno u otro, como podemos ver en la Figura 3.1, donde muestra los nodos resonantes y no resonantes de fuente (S) y carga (L) para el caso de dispositivos con dos puertos, y para el caso de dispositivos con un puerto se cuenta con un solo nodo no resonante que viene a ser la fuente (S).

Esquema de enrutamiento y acoplamiento de dos puertos



Esquema de enrutamiento y acoplamiento de un puerto



Figura 3.1: Esquema de enrutamiento y acoplamiento para dispositivos de uno o dos puertos

Una de las principales referencias para poder abordar lo correspondiente a la síntesis de la matriz de acoplamiento está presente en [Cam99] el cual es la base para introducirnos en todo lo que implica realizar este análisis. Este artículo presenta un método general de síntesis de matriz de acoplamiento para la síntesis de filtros con características pertenecientes al tipo Chebyshev a través de la generación de funciones de transferencia partiendo de los polinomios de transmisión y reflexión, así como también de la función de admitancia.

El prototipo de la Figura 3.2, nos muestra los acoplamientos que existen entre cada resonador y los puertos de entrada (S) y salida (L), que están representados por M y sus derivados. Todo ello es mostrado a su vez en un esquema de enrutamiento y acoplamiento formado por nodos resonantes y no resonantes, cuyo acoplamiento entre ellos toman nombres específicos, que serán descritos en la Figura 3.3 y plasmados en la matriz presentada en la Figura 3.4, cuyo tamaño es $[N + 2 \times N + 2]$ donde N es el número de nodos resonantes y el agregado (+ 2) representa los nodos no resonantes de la fuente (S) y carga (L).

En [Cam99] desarrolla un ejemplo, donde muestra el uso de esta técnica, y como resultado obtiene que el proceso de transformación o reducción utilizando la forma plegada no afecta al retardo de grupo que es una característica importante en el desarrollo de los filtros, en este caso del tipo Chebyshev.

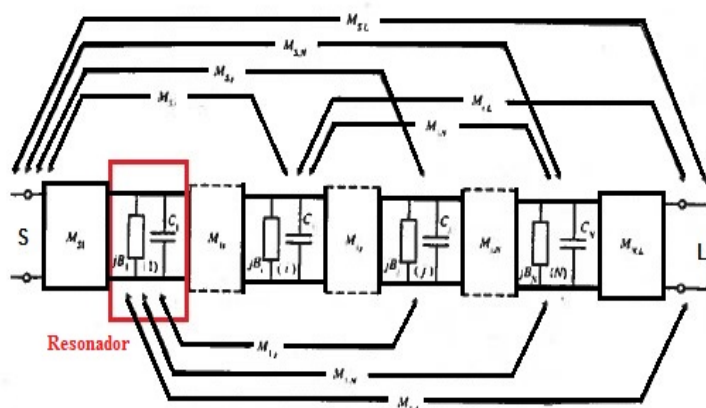


Figura 3.2: Prototipo de red de dos puertos formada por resonadores pasabajo acoplados entre sí

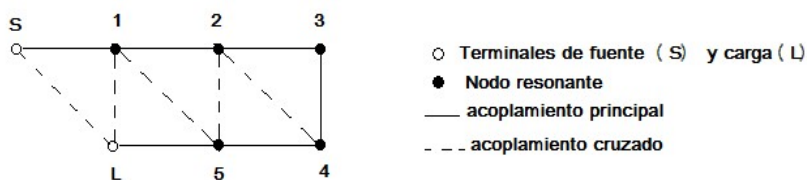


Figura 3.3: Esquema de enrutamiento y acoplamiento

	S	1	2	3	4	5	L
S		mc					ax
1		sc	mc			ax	sx
2			sc	mc	ax	sx	
3				sc	mc		
4					sc	mc	
5						sc	mc
L							

sc - autoacoplamiento
 mc - acoplamiento principal
 ax - acoplamiento cruzado asimétrico
 sx - acoplamiento cruzado simétrico
 acoplamiento simétrico respecto a la diagonal principal

Figura 3.4: Matriz de acoplamiento $N + 2 \times N + 2$

Esta información se explica de forma más profunda en [CKM15], que es guía en la mayoría de artículos que tratan de ésta técnica utilizada para la síntesis de filtros,

es muy importante su consideración antes de abordar temas que nos introduzcan a nuevos métodos de optimización de matrices de acoplamiento.

3.2. Optimización de la matriz de acoplamiento

Varios artículos revisados describen formas de optimizar una matriz acoplamiento que contiene diferentes características, una de las técnicas más interesantes para realizar esta optimización esta orientado a la síntesis de filtros con pérdidas, es tratado por Yuting Zhao y Gang Wang propios de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China, se basa en el algoritmo evolucionario multi-objetivo más conocido como MOEA.

El tratamiento presente en [ZW13], trabaja con la matriz $[N + 2 \times N + 2]$, utilizando fórmulas similares a lo que se presenta en [CKM15], especialmente por los polinomios de transferencia y reflexión, S_{21} y S_{11} respectivamente, solo que ahora se le agrega una constante que representa las pérdidas de los filtros.

El NSGA II es un algoritmo utilizado por MOEA, y las ventajas que éste tiene son abordadas también en [ZW13]. Particularmente es un tanto complejo poder realizar una comparación con los artículos utilizados en esta sección, ya que se diferencia por la utilización de algoritmos ya planteados anteriormente y no realiza un análisis directa de la matriz de acoplamiento, pero para el tratamiento de su optimización es importante su consideración.

Otra técnica interesante es la expuesta por Nicholson y Lancaster, de la Universidad de Birmingham, Edgbaston (UK), en el artículo [NL09], que presenta un algoritmo de optimización híbrido. Este tipo de algoritmo trabaja con los polinomios de transferencia y reflexión, los ceros de transmisión y los ceros de reflexión.

La aplicación de este algoritmo híbrido esta orientado a trabajar con filtros de banda única, pero puede ser adaptado a través de transformaciones de frecuencia para hacerlo también con filtros de banda dual.

Este algoritmo tiene como base un algoritmo genético codificado en binario, dentro del cual se puede aplicar el SQP que es la programación cuadrática secuencial, que busca a cada uno de los cromosomas presentes en el algoritmo genético.

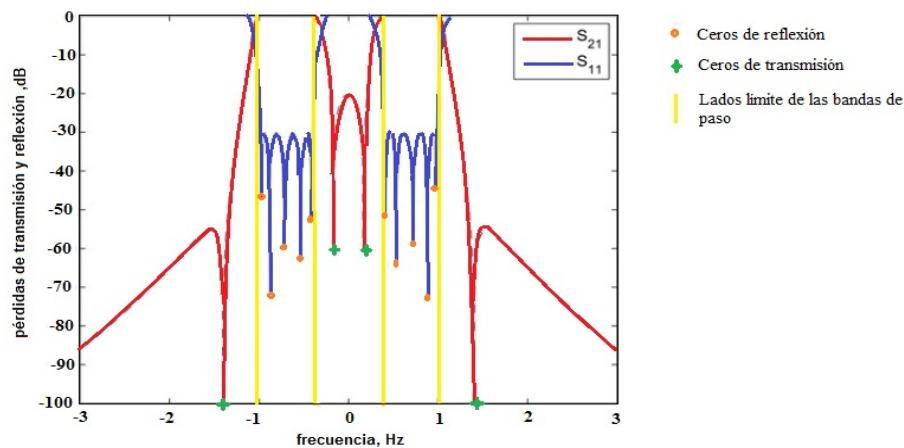


Figura 3.5: Respuesta del filtro simétrico de banda dual, especificando los ceros de transmisión y reflexión, y los lados límite de la banda de paso

En [NL09] desarrollan una serie de pasos a través de un esquema en el que representan el método híbrido, el cual es utilizado para la síntesis de la matriz de acoplamiento utilizando 30 cromosomas, y una serie de parámetros orientados a filtros de banda dual simétrico de orden diez, especificando entre que resonadores se encuentran los acoplamientos cruzados, donde están ubicados los ceros de transmisión y los ceros de reflexión, y entre que parámetros son ubicadas las bandas de paso del filtro. Para esta optimización es necesario contar con variables de control, función de costo, y los lados límite de la banda de paso, que son también parámetros a considerar para utilizar este algoritmo, cuyo resultado es presentado en la Figura 3.5, como se muestra, los ceros de transmisión y reflexión, y los lados límites de las bandas de paso del filtro se encuentran exactamente en el lugar que el ejemplo presentado en [NL09] expone.

3.3. Función de admitancia

La síntesis de función de admitancia va en relación directa a la síntesis de la matriz de acoplamiento, como lo muestra en [HWSS16] orientada a filtros de topología mezclada, es decir, acoplamientos cruzados y sección de polos extraídos como se muestra en la Figura 3.7. Esta topología presentada empieza con una inserción de desplazamientos de fase en la estructura original, como se presenta en la Figura 3.6, que posteriormente son reemplazados por resonadores oscilantes (dangling resonators) en el puerto de entrada (S) que se convierten en nodos no resonantes derivados; es por ello que en la Figura 3.7 están representados por un color diferente (verde) al de los nodos resonantes (negro) y no resonantes (blanco), siendo ésto a lo que llaman una representación de polos extraídos. Éstos datos son incluidos en la matriz de

acoplamiento presentada en la Sección 3.1, convirtiéndola en una matriz de tamaño $[N + P + 2 \times N + P + 2]$, donde P corresponde a la sección de polos extraídos.

Lo presentado en esta sección tiene un impacto importante en lo que respecta a la matriz de acoplamiento, ya que ésta puede tomar diversos tamaños e incluir otros datos característicos de los filtros, que en este caso corresponde a una topología mezclada muy diferente a las que normalmente se trabaja.

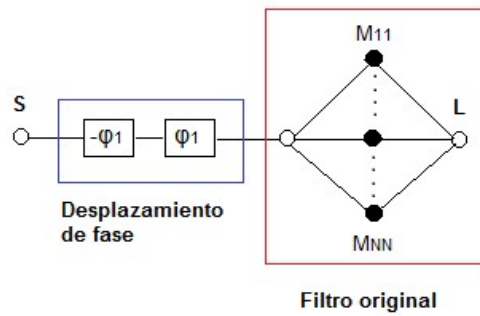


Figura 3.6: Filtro original en unión con la inserción de desplazamiento de fase

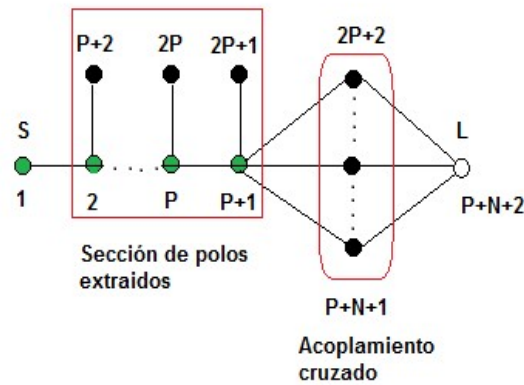


Figura 3.7: Prototipo de un filtro de topología mezclada de N orden

3.4. Diferenciadores de microonda

Existen distintas aplicaciones donde se utilizan las matrices de acoplamiento no solo para el diseño de filtros, sino también orientado a diferenciadores de microonda, tomados como operadores de señal clave con aplicaciones en la configuración de las formas de onda y la generación de impulsos, considerando el pase del dominio de pasabajo al pasabanda. [ZXZC17]

Tema que es abordado en [ZXZC17] en el que parten de una red pasabajo formado inicialmente por un capacitor y la frecuencia invariante pasando a un circuito LC (inductor - capacitor), asumiendo que se trabaja con una red pasiva y sin pérdidas.

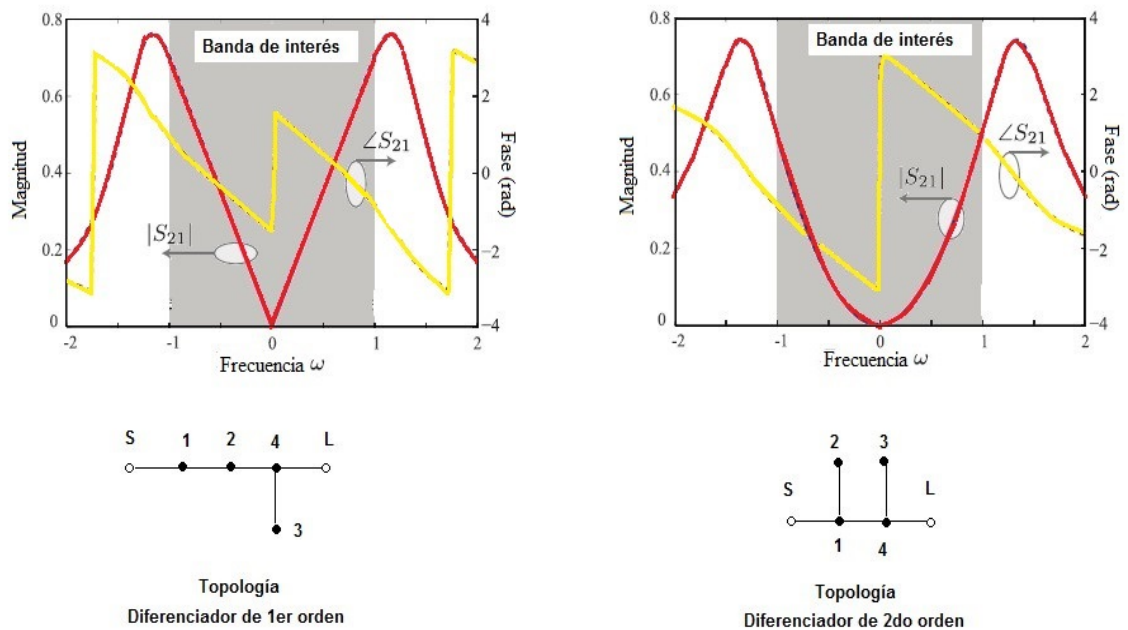


Figura 3.8: Respuesta en frecuencia de un diferenciador de primer y segundo orden

Al igual que los artículos ya estudiados, [ZXZC17] expresa la importancia de las funciones de polinomios de transferencia y reflexión, parámetros S. Un dato importante a rescatar y que lo diferencia de los anteriores es la descripción de algunos valores tomados de los ejemplos que muestra en la matriz de acoplamiento:

- Si los valores son positivos representan estructuras de acoplamiento eléctrico.
- Si los valores son negativos representan estructuras de acoplamiento magnético.

En los ejemplos mostrados en [ZXZC17] logamos ver la diferencia de los polinomios utilizados para obtener la matriz de acoplamiento y así mismo la topología resultante, es entonces que con lo ya estudiado podemos asumir que se trata de una matriz

de $[N + 2 \times N + 2]$, que nos da como respuesta en frecuencia un filtro rechaza banda (V) con un cero de transmisión directamente en $\omega = 0$ (normalizado), para posteriormente fabricar el prototipo físico y así poder mostrar la validación del pulso.

Dependiendo del orden del diferenciador la respuesta en frecuencia de S_{21} cambia, la banda de interés es mucho más selectiva si el orden es menor y lo contrario sucede si el orden es mayor, independientemente del número de nodos resonantes ya que lo que varía es su ubicación, como podemos observar en la Figura 3.8.

3.5. Tratamiento de filtros de banda dual

En la mayoría de artículos revisados en las secciones anteriores, hemos tratado a los filtros de banda única como forma de introducción al tema de síntesis de filtros, pero para desarrollar el proyecto de tesis es necesario obtener información de cómo pasar de todo lo ya estudiado a filtros de banda dual y como orientar la matriz de acoplamiento a otras aplicaciones.

En [GLSP11] se presenta un tema muy importante para el desarrollo de esta tesis, en relación a filtros multibanda, utilizando una transformación en frecuencia en un prototipo pasabanda, que tiene como clave el mapeo de frecuencia entre resonadores como se puede ver en la Figura 3.9, que pasa de una estructura de banda única a una de banda dual, cuyo concepto es tomado en la mayoría de artículos expuestos para tratar el análisis de la matriz de acoplamiento.

De manera muy similar a lo expuesto en el libro de Cameron [CKM15], al prototipo pasabajo, que es un circuito formado por resonadores, capacitancia y susceptancia invariante en frecuencia, se le agrega un valor K_n para interconectar los resonadores en paralelo al original.

Se analizó el tema de la matriz de acoplamiento en un apartado de este artículo, empezando por una estructura de red de banda única, transformándola a una estructura multibanda; a cuya matriz se le agregan filas y columnas, con los datos propios de los nuevos resonadores [GLSP11], considerando una matriz $[N + 2 \times N + 2]$.

Posteriormente desarrolla algunos ejemplos con su respectiva implementación microstrip, cuyos resultados muestran éste paso a filtros multibanda basados en resonadores acoplados entre sí, cuya respuesta en frecuencia es muy cercana entre el modelo y la medida. Es importante que se considere que esta transformación va a generar un orden mayor del filtro respecto al original como se muestra en la Figura 3.10, pero el resultado será muy acertado.

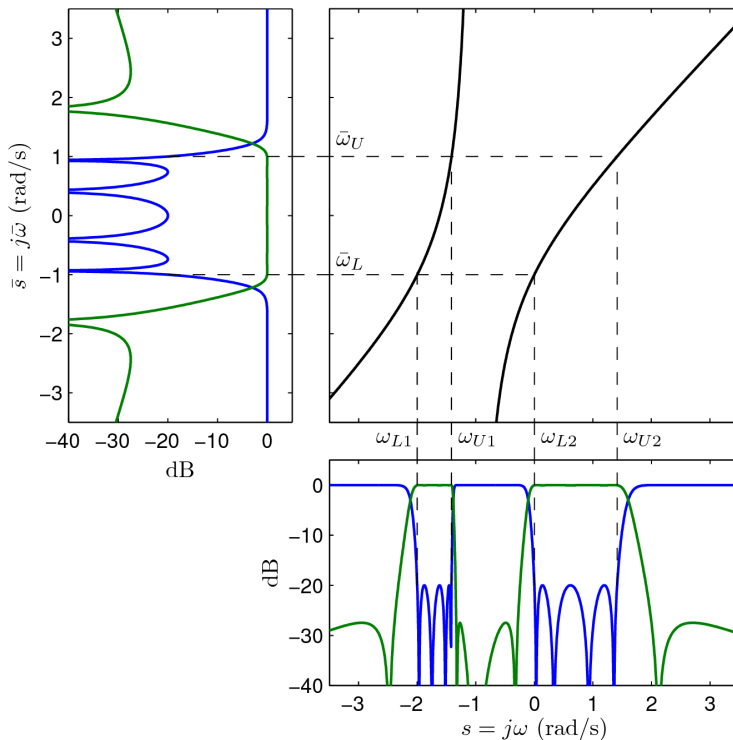


Figura 3.9: Transformación de un prototipo de banda única a multibanda, utilizando el mapeo de frecuencia

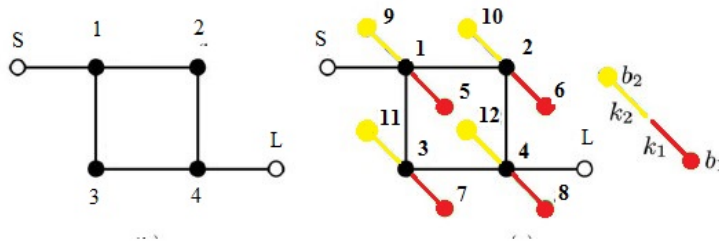


Figura 3.10: Prototipo de acoplamiento de banda única de 4to orden y prototipo de acoplamiento de triple banda de 12vo orden

El gran auge de las aplicaciones de filtros microonda demanda la utilización de múltiples bandas, que me permitan tener una respuesta en frecuencia muy selectiva y esto se logra con la utilización de resonadores. En [CAGLSV⁺11] se desarrolla un tema muy resaltante, ya que toma como base la descripción de aspectos valiosos acerca de filtros de banda dual conformados por resonadores en anillo de lazo abierto, Figura 3.11, que es utilizado posteriormente para filtros de triple banda.

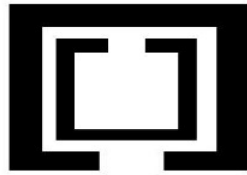


Figura 3.11: Resonadores en anillo de lazo abierto para filtros de banda dual

Características importantes a considerar:

- Las respuestas aparecen a frecuencias bajas.
- La cantidad de anillos representa el número de bandas de paso.
- Requiere una matriz de acoplamiento, que fue tema de estudio en secciones anteriores.
- Las longitudes eléctricas de los anillos internos y externos van en relación directa con la aparición de las bandas simétricas y asimétricas., dependiendo de la ubicación del cero de transmisión que es producido por el anillo interno del filtro de banda dual.

Todo esto es utilizado y adaptado para generar filtros de triple banda que contará con dos anillos internos, que generan dos ceros de transmisión y un externo que controla la banda total, haciendo que las bandas de paso se acorten o se amplíen dependiendo de la frecuencia en la que se encuentren.

Visto desde la respuesta en frecuencia lo que generará será tres bandas de paso, dos bandas de rechazo, y dos ceros de transmisión.[CAGLSV⁺11]

Es muy interesante notar que dependiendo de las modificaciones que se realicen a los distintos anillos, internos o externos, se generará un cambio en la respuesta en frecuencia, como lo muestra [CAGLSV⁺11] en el análisis paramétrico que realiza, utilizando el software AWR, para de esta manera llegar a controlar la respuesta del filtro y adecuarlo a las características deseadas. Esto último mencionado es relevante ya que los usuarios necesitan trabajar a diferentes frecuencias de acuerdo a su aplicación. Por ejemplo, en [GLM⁺09] se propone el diseño de filtros de banda dual orientados a la tecnología inalámbrica de área local, para de esta manera poder realizar operaciones simultáneas en bandas múltiples de frecuencia y así llegar a adaptarlos a los diferentes servicios inalámbricos.

En [GLM⁺09] desarrollan dos puntos importantes:

- Tener una frecuencia variable o sintonizable entre 5.75Ghz y 5.25Ghz, en la segunda banda del filtro, mientras la primera se encuentra fija en 2.45Ghz.
- Obtener una estructura donde se cumpla que $f_2/f_1 > 2$.

Esta sintonización será posible con el uso de resonadores de impedancia de carga ($Z1$, $Z2$) y la utilización de un capacitor variable (C), tomando en cuenta también la longitud total de las líneas ($L1$), como se muestra en la Figura 3.12.

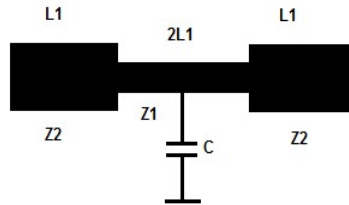


Figura 3.12: Representación de la estructura del filtro de banda dual con capacitor variable

Para abarcar el tema en primer lugar desarrollan la resonancia en modo impar, trabajando con la fórmula general para la impedancia de entrada; en segundo lugar la resonancia en modo par, variando el valor de la impedancia de carga ZL .

Un dato en el que [GLM⁺09] hace mucho énfasis es la ubicación del capacitor variable, ya que al ser resonadores integrados en un filtro, un error en esto produciría una degradación en la respuesta del filtro; rizado en las bandas de paso o rechazo, pérdidas o cambios en el ancho de banda.

La Figura 3.13 muestra la estructura final del filtro de banda dual con un capacitor variable, que permitirá conseguir los objetivos planteados inicialmente, siendo esto en lo que desemboca el artículo.

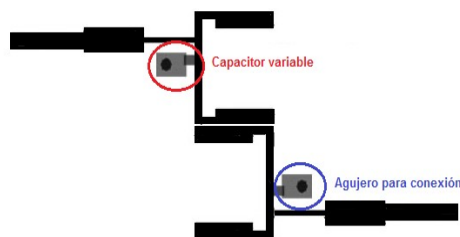


Figura 3.13: Circuito de un filtro de banda dual con capacitor variable

4 Conclusiones

- La mayoría de investigaciones explican la síntesis de polinomios como modo de obtención del numerador y denominador de los polinomios de transferencia (S_{21}) y reflexión (S_{11}) calculados a través de diferentes técnicas, la más relevante el método recursivo y el principio de singularidad alternativa.
- La transformación de un filtro simple a uno de banda doble es posible gracias a la aplicación de fórmulas matemáticas y que conlleva consecuencias relevantes para el diseño de filtros, como son: duplicar el grado del filtro, por lo tanto agrandar el circuito formado por los resonadores.
- En [Bab17] se cuenta con código ejemplo, que nos permite analizar de mejor manera el procedimiento para obtener la matriz de acoplamiento, pero no puede ser utilizado completamente para obtener esta misma, porque cuenta con funciones no especificadas y esta orientada a trabajar con dos ceros de transmisión definidos.
- Todo el análisis y desarrollo matemático que se tiene que realizar, es extenso, de modo que debemos encontrar formas de resumir estas ecuaciones y adaptarlas al proyecto de la manera más concisa posible.
- El tratamiento de los polinomios $E(s), P(s), F(s) = U(s), V(s)$, la matriz de acoplamiento $N \times N$, y la transformación a banda dual, es un trabajo en conjunto, que necesitará optimización y adaptación de uno con el otro para lograr el objetivo planteado.

Bibliografía

- [Bab17] Sharon Babuall. coupling matrix. url <https://la.mathworks.com/matlabcentral>, 2017.
- [CAGLSV⁺11] P. R. Castillo-Aranibar, A. García-Lampérez, D. Segovia-Vargas, M. Salazar-Palma, and S. Barbin. Multiple split-ring resonators for tri-band filter with asymmetric response. In *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*, pages 75–78, Oct 2011.
- [Cam99] R. J. Cameron. General coupling matrix synthesis methods for chebyshev filtering functions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(4):433–442, April 1999.
- [CKM15] Richard J Cameron, Chandra M Kudsia, and Raafat Mansour. *Microwave filters for communication systems*. John Wiley & Sons, 2015.
- [GLM⁺09] David Girbau, Antonio Lázaro, Esther Martínez, Diego Masone, and Lluís Pradell. Tunable dual-band bandpass filter for wlan applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 51(9):2025–2028, 2009.
- [GLSP11] Alejandro García-Lampérez and Magdalena Salazar-Palma. Single-band to multiband frequency transformation for multiband filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59(12):3048–3058, 2011.
- [HWSS16] Yuxing He, Gang Wang, Xiaotian Song, and Liguó Sun. A coupling matrix and admittance function synthesis for mixed topology filters. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 64(12):4444–4454, 2016.
- [NL09] GL Nicholson and MJ Lancaster. Coupling matrix synthesis of cross-coupled microwave filters using a hybrid optimisation algorithm. *IET microwaves, antennas & propagation*, 3(6):950–958, 2009.
- [ZLDC17] Q. Zhang, B. Li, R. Das, and C. Caloz. One-port coupling matrix synthesis for reflection-type devices. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(12):1086–1088, Dec 2017.
- [ZW13] Yuting Zhao and Gang Wang. Multi-objective optimisation technique for coupling matrix synthesis of lossy filters. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 7(11):926–933, 2013.

- [ZXZC17] Qingfeng Zhang, Fen Xia, Ge Zhang, and Yifan Chen. Coupling matrix synthesis of microwave differentiators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(10):879–881, 2017.