

## DESARROLLO DE CIRCUITOS DE RF CON TECNOLOGÍA DE MICROCINTAS EN LA BANDA DE 2.4 GHz.

### Development of circuits of RF with microstrip technology in the band of 2,4 GHz.

#### RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño y análisis de adaptación de impedancia y filtraje de señales en la banda de 2.4 GHz, usando la tecnología de microcinta como una opción para el desarrollo de nuevas aplicaciones en RF. Además, se resaltan las ventajas que brinda ésta técnica al trabajar en frecuencias de microondas, especialmente, en cuanto a costo y tamaño. Se inicia con el estudio de las distintas formas y topologías para diseñar esta clase de circuitos, hasta la implementación de adaptadores y filtros que cumplan con especificaciones requeridas, posteriormente se realiza una comparación en cuanto a los resultados obtenidos usando herramientas de simulación y las medidas de los prototipos desarrollados.

**PALABRAS CLAVES:** adaptación de impedancias, filtrado, microcintas, microondas, radiofrecuencia.

#### ABSTRACT

*In this article one presents the design and analysis of adjustment of impedance and filtration of signs in the band of 2.4 GHz using the microstrip technology as an option for the development of new applications in RF. In addition, there are highlighted the advantages that technical this one offers on having been employed at frequencies of microwave specially as for cost and size. It begins with the study of the different forms and topologies to design this class of circuits, up to the implementation of adapters and filters that expire with required specifications, later a comparison is realized as for the obtained results using tools of simulation and the measures of the developed prototypes.*

**KEYWORDS:** filtrate, impedance matching, , microstrip, microwaves, radio frequency.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El uso masivo del espectro radioeléctrico mediante el desarrollo de una gran cantidad de aplicaciones de telecomunicaciones, ha llevado a que algunas bandas, especialmente las más apetecidas para aplicaciones móviles, se saturen y estén a punto de colapsar. Es por eso que surge la necesidad de transmitir en bandas de frecuencias cada vez más altas (del orden de los GHz), lo que conlleva a que el desarrollo de nuevas aplicaciones hardware tenga un mayor grado de dificultad debido a los fenómenos que experimentan los elementos tradicionales en estos rangos de frecuencia. Como consecuencia de esto, la tecnología de *microstrip* se perfila como alternativa que supera estos inconvenientes, además que proporciona ventajas significativas en cuanto a facilidad de construcción y de bajo costo. Por lo anterior, esta tecnología poco a poco se ha convertido en una tecnología de uso masivo llegando a ser ampliamente utilizadas en sistemas microondas tales como: sistemas de comunicación personal (PCS), comunicaciones móviles satelitales, redes de área local inalámbricas

(WLAN's), tecnologías tales como bluetooth y telefonía celular, entre otras. [1][6][7][8].

En este artículo se presentan los conceptos básicos de filtros y adaptadores de impedancia, diseño de los dispositivos mencionados en la banda de 2.4 GHz para algunos requerimientos específicos con la ayuda de la herramienta de simulación y diseño microwave office, se dan las pautas para la construcción de los prototipos en cuestión usando tecnología de microcintas y finalmente se comparan los resultados obtenidos en la simulación y medidos en laboratorio con la ayuda de un analizador de redes.

#### 2. ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIAS

Un adaptador de impedancia es un bloque que se utiliza entre la carga y la línea que impide la reflexión. Esto se logra haciendo que la impedancia de la carga vista desde el adaptador sea igual a la impedancia de la línea. La adaptación de impedancias constituye una etapa

**HECTOR FABIO  
BERMUDEZ OROZCO**

Ingeniero Electrónico,  
Estudiante Maestría en  
Ingeniería, Área Electrónica y  
Telecomunicaciones  
Universidad del Cauca  
hebermudez@unicauca.edu.co

fundamental en el proceso de diseño de cualquier subsistema de microondas. [1].

Existen diversos métodos para desarrollar adaptación de impedancias tales como: stubs en corto circuito o en circuito abierto, pero estos métodos suelen arrojar impedancias complejas en los stubs usados, lo cual hace que no se puedan diseñar con la técnica de microcintas [3]; por lo cual el tratamiento para hacer este tipo de adaptaciones debe ser más específico haciendo uso de técnicas diferentes. [2] [4].

## 2.1. ADAPTADORES CON SECCIÓN DE LÍNEA SIMPLE.

Este tipo de adaptación es muy similar a la realizada mediante stubs, se aprecia en la figura 1 y consiste en colocar una sección de línea de longitud  $l$  y ancho determinado para alcanzar adaptación de impedancias entre la línea de transmisión y la carga. En este método de adaptación es posible variar fácilmente las dimensiones tanto del largo como del ancho, alcanzando así las características de la línea deseadas para la respectiva adaptación. [6].

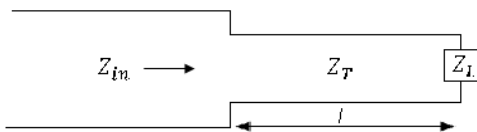


Figura 1. Adaptación de impedancias con simple sección de línea.

Según la figura 1, el problema consiste en encontrar el valor de la impedancia  $Z_T$  que cumpla con los requerimientos necesarios para que exista adaptación de impedancias entre la línea de entrada y la carga, este valor de  $Z_T$  estará definido por las dimensiones de la sección de línea (largo y ancho de la microcinta).

## 2.2. ADAPTACIÓN CON DOBLE SECCIÓN DE LÍNEA.

Consiste en realizar una adaptación de impedancias pero utilizando una doble sección de línea, esta adaptación se logra adicionando dos secciones de línea con longitud  $l_1$  y  $l_2$  respectivamente, al realizar este proceso se generan unos planos de impedancias; el proceso consiste en adaptar desde el plano D hasta el plano A como se puede ver en la figura 2, el proceso se realiza siempre mirando hacia la carga, en cada uno de esos puntos la impedancia

será normalizada a la impedancia característica de aquel plano. [3][6]

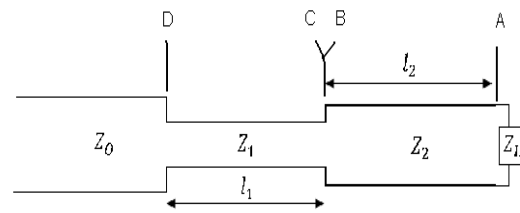


Figura 2. Planos de impedancia y selección de impedancias de transformación en adaptación con doble sección de línea.

Las secciones de línea se escogen con unos valores típicos de impedancias con el propósito de que sean realizables, pues estos valores deben estar en el rango entre 20-120  $\Omega$ , comúnmente los valores típicos que se toman en la práctica corresponden a 100 y 30  $\Omega$ .

En la mayoría de diseños se conocen las impedancias a adaptar, por lo tanto el problema consiste en calcular los largos de las líneas de 100 y 30  $\Omega$  con los cuales se logre la máxima transferencia de potencia hacia la carga. [7][8]

## 3. FILTROS

Un filtro es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase.

En este artículo, los filtros usados son de tipo pasa banda con la técnica de microcintas dentro de la banda de 2,4 GHz, existen otras topologías de diseño las cuales se analizan con mayor exactitud en [2][3][4][6][7][8].

### 3.1. FILTROS PASA BANDA DE LÍNEAS PARALELAS ACOPLADAS

En un sistema de líneas de microcinta, un par de líneas paralelas acopladas con dos de los puertos en circuito abierto puede ser caracterizado por sus impedancias de modos par e impar y la longitud del acoplamiento, las líneas acopladas son equivalentes a un inversor ideal  $J$  unido a líneas de longitud eléctrica  $\Phi$ ; el valor de  $J$  es determinado por los valores de las impedancias de modo par e impar y se considera independiente de la longitud eléctrica cuando esta cercana a  $\pi/2$ .

En la figura 3 se muestra un filtro de líneas paralelas acopladas, el cual está formado por dos resonadores terminados en circuito abierto que están acoplados paralelamente entre ellos y con las líneas de entrada y de salida. Se observa que para 2 líneas resonantes hay tres acopladores de un cuarto de longitud de onda que tendrán

propiedades de inversores, este filtro será por consiguiente un filtro de dos secciones. En la misma figura se aprecia que cada acoplador se representa por su correspondiente inversor y por líneas de un cuarto de longitud de onda; las líneas adyacentes de un cuarto de longitud de onda forman un resonador de media longitud de onda. Las longitudes de las líneas que se conectan a los puertos de entrada y salida no tienen mayor efecto sobre el funcionamiento del filtro y por lo tanto no son relevantes.

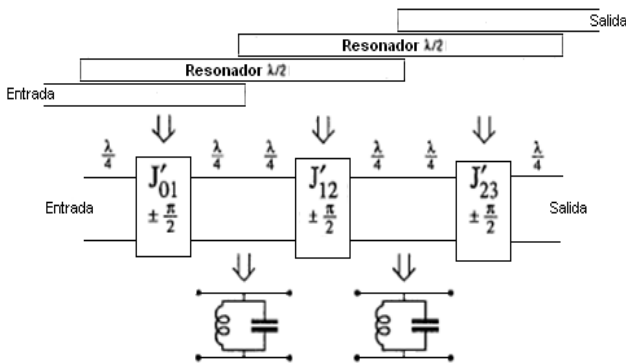


Figura 3. Equivalencia entre los pares de secciones de líneas acopladas y los inversores de admitancia.

En la figura 4 se puede apreciar un filtro de este tipo con orden N, en este filtro se debe entender por sección acoplada cada una de las regiones en donde las líneas acopladas tienen el mismo ancho (W), una separación (s) entre ellas y el mismo largo (L), cada sección acoplada se corresponde uno a uno a un inversor, se puede identificar que la sección acoplada número 1 es la correspondiente a la constante inversora  $Z_0 J_{0,1}$  y se relaciona a las líneas acopladas que tienen un ancho  $W_1$ , un espaciamiento entre ellas  $s_1$  y un largo  $L_1$ , la sección acoplada número 2 será la correspondiente a la constante inversora  $Z_0 J_{1,2}$  y se relaciona a las líneas acopladas que tienen un ancho  $W_2$ , un espaciamiento entre ellas  $s_2$  y un largo  $L_2$ , y análogamente para las demás regiones; se debe entender que un filtro de orden N tendrá N+1 regiones acopladas.

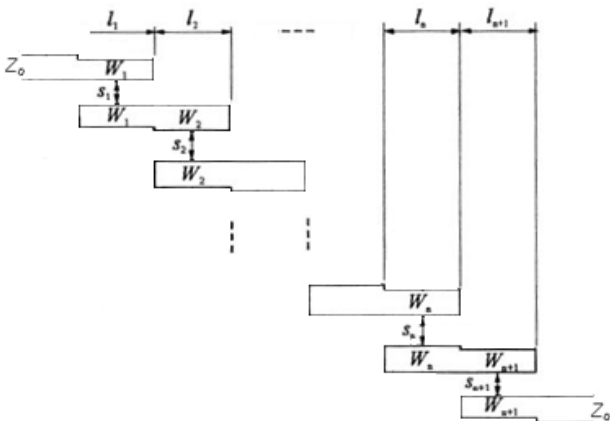


Figura 4. Estructura general del filtro de líneas acopladas.

Fecha de Recepción: 8 de junio de 2009  
 Fecha de Aceptación: 13 de Agosto de 2009

#### 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CIRCUITOS.

Se debe recordar que el Ministerio de Comunicaciones de Colombia ha regulado la banda de 2,4 GHz que va desde 2,400 a 2,4835 GHz [5], en dos subbandas de las cuales la banda que se ha designado como banda libre es la comprendida entre 2,4 y 2,450 GHz.

Los diseños realizados se han dimensionado teniendo en cuenta esta norma.

##### 4.1. ADAPTADOR DE IMPEDANCIAS DE SECCIÓN SIMPLE.

Se realiza el diseño de un adaptador de impedancias que permita adaptar una línea de entrada de 50 Ohms a una carga de 100 Ohms, a una frecuencia de 2,425 GHz (frecuencia central de la banda) con un sustrato de características:

- Constante dieléctrica = 3,5
- Espesor del dieléctrico (h) = 1,52 mm
- Espesor del conductor (t) = 0,035 mm
- En este caso se ha usado cobre
- Factor de pérdidas (Tangente de pérdidas) = 0,0018

Los resultados de los cálculos de las impedancias pueden ser apreciados en la tabla 1, donde LR es el largo requerido de la línea.

Línea	Z (Ω)	LR	Ancho (mm)	Largo (mm)
Entrada	50	-	3,39	10
Adaptadora	70,71	$\frac{1}{4} \lambda$	1,83	19,05
Carga	100	-	0,82	10

Tabla 1. Dimensiones físicas de las líneas del adaptador de simple sección.

El Layout o visualización real del adaptador obtenido con el simulador Microwave Office puede ser apreciado en la figura 5.

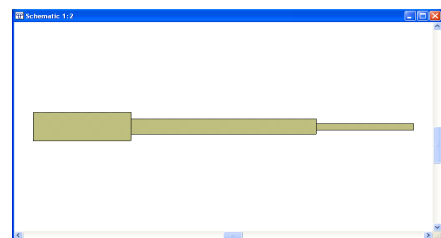


Figura 5. Layout del adaptador de simple sección de línea.

La respuesta simulada del adaptador puede ser apreciada en la figura 6, donde se han medido sus pérdidas por retorno para ver la respectiva adaptación.

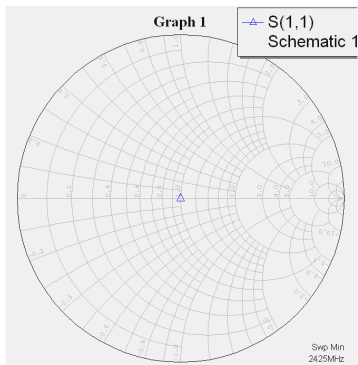


Figura 6. Respuesta simulada del adaptador de simple sección de línea a una frecuencia puntual de 2,425 GHz.

La simulación de la adaptación del circuito es perfecta; el circuito una vez implementado puede ser visualizado en la figura 7.



Figura 7. Fotografía del adaptador de simple sección.

Los resultados medidos en el analizador vectorial de redes pueden ser visualizados en la figura 8.

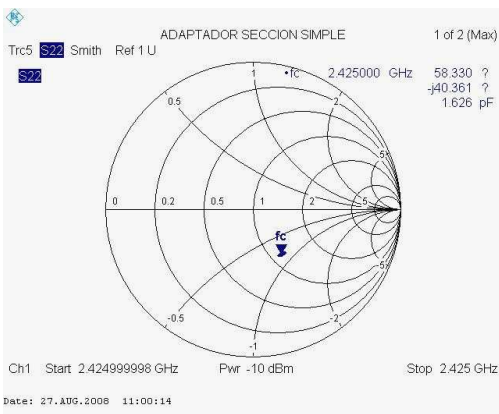


Figura 8. Respuesta del adaptador de sección simple medida en el analizador vectorial de redes a una frecuencia puntual de 2,425 GHz.

#### 4.2. ADAPTADOR DE IMPEDANCIAS DE DOBLE SECCIÓN.

Se realiza el diseño de un adaptador de impedancias que permita adaptar una línea de entrada de 50 Ohms a una carga de 110 Ohms, a una frecuencia de 2,425 GHz y se usa el mismo sustrato anterior. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Línea	Z (Ω)	LR	Ancho (mm)	Largo (mm)
Entrada	50	-	3,39	10
Adaptadora Alta	100	0,104λ	0,82	8,13
Adaptadora Baja	30	0,036λ	7,16	2,58
Carga	110	-	0,63	10

Tabla 2. Dimensiones físicas de las líneas del adaptador de doble sección.

El Layout o visualización real del adaptador puede ser apreciado en la figura 9.

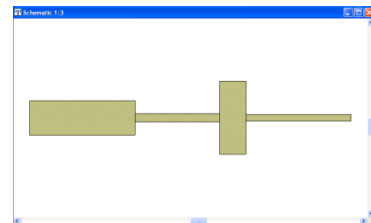


Figura 9. Layout del adaptador de doble sección.

La respuesta simulada del adaptador puede ser apreciada en la figura 10, donde se han medido sus pérdidas por retorno para ver la respectiva adaptación.

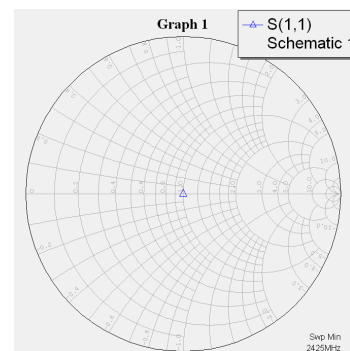


Figura 10. Respuesta simulada del adaptador de doble sección de línea a una frecuencia puntual de 2,425 GHz.

La adaptación del circuito es excelente en forma simulada; el circuito una vez implementado puede ser visualizado en la figura 11.

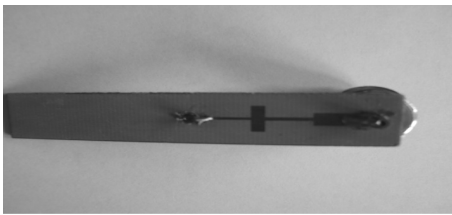


Figura 11. Fotografía del adaptador de doble sección

Los resultados medidos en el analizador vectorial de redes pueden ser visualizados en la figura 12.



Figura 12. Respuesta del adaptador de sección doble medida en el analizador vectorial de redes a una frecuencia puntual de 2,425 GHz.

### 4.3. FILTRO PASA BANDA DE LINEAS ACOPLADAS

Se utiliza un filtro tipo Butterworth de orden 3 de 2,403 a 2,447 GHz con impedancias de entrada y salida de 50 ohms.

Haciendo los cálculos de las impedancias par e impar para las líneas acopladas de este filtro se obtienen los resultados que muestra la tabla 3.

I	Zo(even) <sub>i</sub> (Ω)	Zo(odd) <sub>i</sub> (Ω)
1	60,14	43,12
2	51,11	48,83
3	51,11	48,83
4	60,14	43,12

Tabla 3. Impedancias en modo par (even) e impar (odd) para las secciones del filtro de líneas acopladas.

Realizando cálculos con el sustrato a usar, se obtienen las dimensiones para los 4 pares de líneas acopladas como se muestra en la tabla 4.

i	W <sub>i</sub> (mm)	S <sub>i</sub> (mm)	L <sub>i</sub> (mm)
1	2,99	0,99	18,11
2	3,3	5,3	17,84
3	3,3	5,3	17,84
4	2,99	0,99	18,11

Tabla 4. Dimensiones físicas de las secciones del filtro de líneas acopladas.

El layout o visualización real del filtro puede ser apreciado en la figura 13.

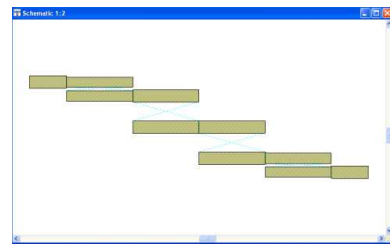


Figura 13. Layout del filtro de líneas acopladas.

La respuesta simulada de este filtro puede apreciarse en la figura 14, donde se han medido las pérdidas por inserción y por retorno.

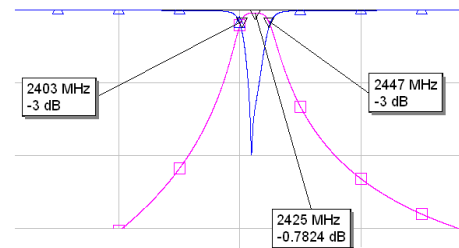


Figura 14. Respuesta del filtro de líneas acopladas.

Como se puede ver la respuesta simulada es bastante exacta, las frecuencias de corte están en su lugar, mostrando una banda de paso entre 2,403 y 2,447 GHz, además se presentan pocas pérdidas en la frecuencia central.

Las pérdidas por inserción medidas se pueden apreciar en la figura 15, donde la respuesta azul corresponde a S12 y la respuesta verde a S21.

Se puede apreciar un buen comportamiento pasa banda aunque no exacto, respuesta simétrica con frecuencia central en 2,4126 GHz, frecuencia de corte inferior en 2,3789 GHz y frecuencia de corte superior en 2,4467 GHz, aunque no se debe ignorar que el filtro presenta pérdidas de -5,3 dB en la frecuencia central.

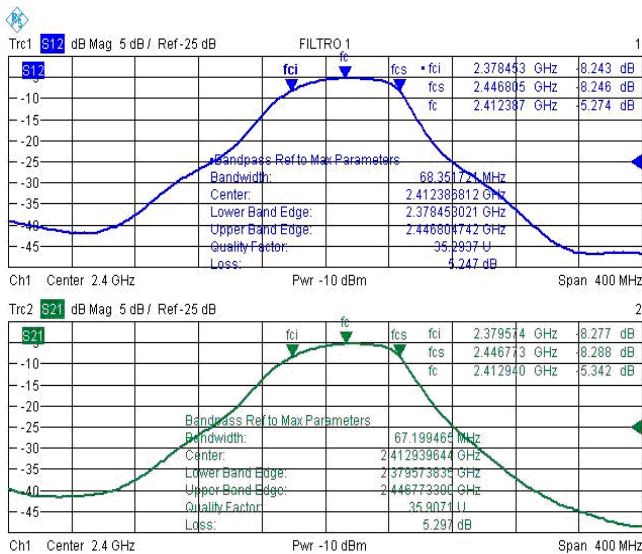


Figura 15. Pérdidas por inserción del filtro

Las pérdidas por retorno medidas se pueden apreciar en la Figura 16, donde la respuesta azul corresponde a S11 y la respuesta verde a S22.

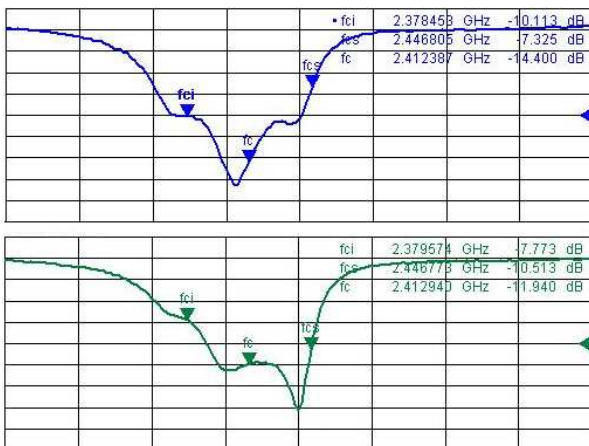


Figura 16. Pérdidas por retorno del filtro

En la figura 16 se puede apreciar falta de simetría en las pérdidas y pérdidas menores a -15 dB en la frecuencia central.

## 5. CONCLUSIONES

Los adaptadores de impedancias muestran un comportamiento perfecto en las simulaciones realizadas, pero al ser medidos en el analizador de redes se puede observar un comportamiento inexacto, esto se puede atribuir a varios factores como: el proceso de soldadura de terminales que generan fenómenos de desadaptación, la calidad de los elementos usados, los conectores utilizados fueron de tipo genérico; no obstante se puede

apreciar que el comportamiento es coherente al de un adaptador y se observa que el adaptador de doble sección presenta un mejor comportamiento que el de simple sección, resultado que está acorde a lo teórico.

En cuanto al filtro, a pesar de haber presentado una buena respuesta con pequeñas discrepancias entre el comportamiento medido y simulado, presenta problemas en cuanto al error medido en el ancho de banda y las pérdidas, pero se debe tener en cuenta que la inexactitud en el proceso de soldado de los conectores y los posibles defectos en el tallado de los mismos trae efectos de desadaptación, los cuales se ven reflejados en la introducción de pérdidas y comportamientos erróneos en este tipo de filtro.

En la parte de diseño para optimizar la respuesta de cualquier circuito se hace necesario realizar un proceso de sintonización a nivel de simulación, pero en la práctica, es decir para aplicaciones reales y funcionales, una vez que los circuitos son fabricados se conectan al analizador de redes se deben calibrar con el fin de variar los parámetros y obtener la respuesta más apropiada.

Se puede observar que el diseño e implementación de este tipo de aplicaciones con la tecnología microstrip no es demasiado complejo, además se obtiene muy buenos resultados para desarrollo de prototipos e implementación de circuitos de RF.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Collin, *Foundations for microwave engineering*, McGraw-Hill, 2° edición. 1992.
- [2] E. Fooks, R. Zakarevicius. *Microwave engineering using microstrip circuits*. Prentice Hall. 1990.
- [3] R. Mahillo, M. González. *Filtro pasa bajo en tecnología microstrip como modelo docente*. Universidad de Valladolid. 2000.
- [4] G. Matthaei, L. Young,, E. Jones. *Microwave filters, Impedance Matching and coupling structures*. Artech House. 1980.
- [5] Ministério de Comunicaciones de la República de Colombia. Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia. Santafé de Bogotá D.C. 2004
- [6] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons. 1998.
- [7] J. D. Krauss, R. J. Marhefka, *Antennas for all applications*. Third Edition. New York, McGraw-Hill. 2001
- [8] C.A. Balanis, *Antenna. Theory, analysis and design*. Second Edition. New York, John Wiley and Sons, Inc. 1997.