



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

### **ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES**

#### **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SET DE BALUNS DE ALTAS FRECUENCIAS UTILIZANDO TECNOLOGÍAS MICROSTRIP Y MMIC PARA EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES Y MICROONDAS EN LA FIE-ESPOCH”**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN:**

Tipo: PROPUESTA TECNOLÓGICA

Presentado para optar al grado académico de:

### **INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES**

**AUTOR:** GABRIEL EDUARDO PARREÑO MERINO

**DIRECTOR:** Ing. HUGO OSWALDO MORENO AVILES PhD.

Riobamba – Ecuador

2019

**© 2019, Gabriel Eduardo Parreño Merino**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, GABRIEL EDUARDO PARREÑO MERINO, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 07 de noviembre de 2019

**Gabriel Eduardo Parreño Merino**

**060438515-3**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES**

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de investigación: Tipo Propuesta Tecnológica “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SET DE BALUNS DE ALTAS FRECUENCIAS UTILIZANDO TECNOLOGÍAS MICROSTRIP Y MMIC PARA EL LABORATORIO DE COMUNICACIONES Y MICROONDAS EN LA FIE-ESPOCH”, de responsabilidad del señor GABRIEL EDUARDO PARREÑO MERINO, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Washington Luna

**DECANO DE LA FACULTAD DE  
INFORMÁTICA Y  
ELECTRÓNICA**

\_\_\_\_\_

Ing. Patricio Romero

**DIRECTOR DE LA ESCUELA DE  
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,  
TELECOMUNICACIONES Y REDES**

\_\_\_\_\_

Ing. Hugo Moreno

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

\_\_\_\_\_

Ing. Pedro Infante

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

## **DEDICATORIA**

A mi madre, Flora Susana. Por el apoyo incondicional que me ha brindado toda la vida, por estar ahí siempre en los buenos y en los malos momentos, por los tiempos difíciles que tuvimos que pasar y sin embargo supimos salir adelante, por los sacrificios realizados para con sus hijos sin esperar nada a cambio. Sin duda merece todo mi respeto y cariño.

A mi padre que en paz descansa, Noé Gabriel. Sé que estaría muy orgulloso.

A mi hermana, Marivel Alexandra. Por cuidarme siempre, por sus palabras de aliento cuando algo iba mal, por asegurarse que nada me falte, por no socaparme nada y hacerme entender las cosas a tiempo, por ser un ejemplo que seguir para mí. A ti toda mi admiración y gratitud.

A mis abuelitos que en paz descansen y a mi tía Isabel. Mi familia querida.

Gabriel

## **AGRADECIMIENTO**

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, gracias por haberme abierto sus puertas y así lograr cumplir mis metas en sus respetadas aulas.

A los docentes de la querida escuela de Ingeniería en Electrónica Telecomunicaciones y Redes, por haber compartido sus conocimientos y experiencia con nosotros.

Al Ingeniero Hugo Moreno, por el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de este proyecto, por la paciencia y disponibilidad en los momentos más oportunos, mi total agradecimiento.

A Francisco Oñate que en paz descanse, por todo el apoyo moral y económico, por sus consejos y gran amistad brindados desde que yo era un niño, por su gran sentido del humor y por ser un hombre correcto. Estaré siempre agradecido.

A mis grandes amigos José Luis y Gabriela, por todos los momentos buenos y malos que hemos pasado, por el apoyo incondicional que nos dimos siempre y por ser la calidad de personas que son, muchas gracias.

A mis amigos y compañeros de estudio a lo largo de la carrera, por todas las malas noches de estudios y proyectos, por los momentos de ocio, por las veces que hasta nos ha tocado cocinar juntos y por todos los momentos que hemos compartido. Mis más sinceros agradecimientos y que logren todo lo que se propongan en la vida.

Gabriel

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
INDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
<b>CAPITULO I</b>	
<b>1. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.2.1. <i>Sistematización del problema.....</i>	2
1.3. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN APLICATIVA.....	4
1.5. OBJETIVOS.....	5
1.5.1. <i>Objetivo general .....</i>	5
1.5.2. <i>Objetivos específicos.....</i>	5
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. HISTORIA E IMPORTANCIA DE LOS BALUNS EN LAS TELECOMUNICACIONES.....</b>	<b>6</b>
2.1.1. <i>Historia de las telecomunicaciones .....</i>	6
2.1.2. <i>Importancia de los baluns en las telecomunicaciones .....</i>	6
2.2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO .....	8
2.2.1. <i>Designación de las bandas de frecuencia.....</i>	9
2.2.2. <i>Microondas .....</i>	10
2.2.3. <i>Aplicaciones de radiofrecuencia y microondas .....</i>	11
2.3. TÉCNICAS DE ACOPLAMIENTO DE ANTENAS .....	12
2.3.1. <i>RF Balun .....</i>	13
2.3.1.1. <i>Diferentes configuraciones de balun .....</i>	16
2.4. TECNOLOGÍAS DE CIRCUITOS DE MICROONDAS .....	19
2.4.1. <i>Tecnología Microstrip .....</i>	19

<b>2.4.2.</b>	<b><i>Baluns Microstrip</i></b> .....	21
2.4.2.1.	<i>Balun de anillo</i> .....	22
<b>2.4.3.</b>	<b><i>Tecnología MMIC</i></b> .....	25
2.4.3.1.	<i>Estructura MMIC</i> .....	25
2.4.3.2.	<i>Ventajas de la tecnología MMIC</i> .....	26
<b>2.4.4.</b>	<b><i>Baluns MMIC</i></b> .....	27
2.4.4.1.	<i>Balun MTX2-73+</i> .....	27
2.4.4.2.	<i>Balun MTX2-143+</i> .....	29
<b>2.5.</b>	<b>ANSOFT DESIGNER</b> .....	30
2.5.1.	<i>Gestión de diseño</i> .....	31
2.5.2.	<i>Sistema / Planar EM Simulación y verificación del diseño</i> .....	31
<b>2.6.</b>	<b>MATERIALES Y EQUIPOS</b> .....	32
<b>2.6.1.</b>	<b><i>Materiales</i></b> .....	32
2.6.1.1.	<i>Roger RO4000 ® Series</i> .....	32
2.6.1.2.	<i>Conector SMA</i> .....	35
<b>2.6.2.</b>	<b><i>Equipos</i></b> .....	36
2.6.2.1.	<i>RF/Microwave Signal Generator (Anritsu MG3690C)</i> .....	36
2.6.2.2.	<i>Spectrum Analyzer (Anritsu MS2724C)</i> .....	37
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	40
<b>3.1.</b>	<b>MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS</b> .....	40
3.1.1.	<i>Materiales</i> .....	40
3.1.2.	<i>Equipos</i> .....	41
<b>3.2.</b>	<b>MÉTODOS Y TÉCNICAS</b> .....	41
<b>3.2.1.</b>	<b><i>Métodos</i></b> .....	41
3.2.1.1.	<i>Diagnóstico</i> .....	41
3.2.1.2.	<i>Población y Muestra</i> .....	42
3.2.1.3.	<i>Diseño del método estadístico para la selección del material</i> .....	43
<b>3.2.2.</b>	<b><i>Técnicas</i></b> .....	44
3.2.2.1.	<i>Diseño de Baluns de alta frecuencia con tecnología Microstrip</i> .....	45
3.2.2.1.1.	<i>Diseño 1 de Balun a 2,4 GHz</i> .....	45
3.2.2.1.2.	<i>Diseño 2 de Balun a 2,4 GHz</i> .....	57
3.2.2.2.	<i>Diseño de pistas para implementar Baluns con tecnología MMIC</i> .....	63
3.2.2.2.1.	<i>Balun de 2 a 7 GHz (MTX2-73+)</i> .....	63
3.2.2.2.2.	<i>Balun de 5.5 a 13.5 GHz (MTX2-143+)</i> .....	69

## CAPÍTULO IV

<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b> .....	76
<b>4.1.</b>	<b>RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO</b> .....	76
<b>4.2.</b>	<b>RESULTADOS DE LA SELECCIÓN DEL MATERIAL</b> .....	78
<b>4.2.1.</b>	<i>Análisis para el material ROGER RO4350B</i> .....	78
<b>4.2.2.</b>	<i>Análisis para el material ROGER RO4003C</i> .....	80
<b>4.3.</b>	<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN</b> .....	83
<b>4.3.1.</b>	<i>Resultados de baluns de alta frecuencia con tecnología Microstrip</i> .....	84
<b>4.3.1.1.</b>	<i>Resultado del Diseño 1 de Balun a 2,4 GHz</i> .....	85
<b>4.3.1.2.</b>	<i>Resultado del Diseño 2 de Balun a 2,4 GHz</i> .....	89
<b>4.3.2.</b>	<i>Resultado de Baluns de alta frecuencia con tecnología MMIC</i> .....	94
<b>4.3.2.1.</b>	<i>Resultado del Balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz</i> .....	94
<b>4.3.2.2.</b>	<i>Resultado del Balun MMIC MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz</i> .....	98
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	102
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	104
	<b>GLOSARIO</b>	
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Bandas de frecuencia de la unión internacional de telecomunicaciones .....	9
<b>Tabla 2-2:</b> Estándar IEEE designaciones de letras para las bandas de frecuencia de radar y satélite .....	10
<b>Tabla 3-2:</b> Especificaciones eléctricas MTX2-73+.....	28
<b>Tabla 4-2:</b> Especificaciones eléctricas MTX2-143+.....	29
<b>Tabla 5-2:</b> Materiales de grado comercial para aplicaciones de microondas.....	33
<b>Tabla 6-2:</b> Dimensiones de referencia para conectores de tramo final de SMA hembra - Contacto Redondo.....	35
<b>Tabla 7-2:</b> Especificaciones de salida (Anritsu MG3692C).....	37
<b>Tabla 8-2:</b> Parámetros de configuración (Spectrum Master™ MS2724C).....	38
<b>Tabla 9-2:</b> Frecuencia (Spectrum Master™ MS2724C) .....	39
<b>Tabla 10-2:</b> Rangos de amplitud (Spectrum Master™ MS2724C).....	39
<b>Tabla 1-3:</b> Factores y niveles de estudio para el rendimiento eléctrico del material Roger RO4350B .....	43
<b>Tabla 2-3:</b> Factores y niveles de estudio para el rendimiento eléctrico del material Roger RO4003C .....	44
<b>Tabla 3-3:</b> Especificaciones Diseño 1 de Balun Microstrip a 2,4 GHz.....	45
<b>Tabla 4-3:</b> Especificaciones técnicas del material Roger RO4003C.....	46
<b>Tabla 5-3:</b> Especificaciones Diseño 2 de Balun Microstrip a 2,4 GHz.....	58
<b>Tabla 1-4:</b> Valores de coeficiente térmico en dos niveles de incorporación para RO4350B..	78
<b>Tabla 2-4:</b> Valores de coeficiente térmico en dos niveles de incorporación para RO4003C..	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b> Espectro electromagnético .....	8
<b>Figura 2-2:</b> a) Ejemplos de aplicaciones inalámbricas b) Componentes de RF y propagación de ondas electromagnéticas.....	11
<b>Figura 3-2:</b> Un balun, que es un bloque entre un bloque de un solo extremo y un par diferencial. (a) Del bloque de un solo extremo al par diferencial. (b) De par diferencial a bloque de un solo extremo. ....	14
<b>Figura 4-2:</b> Pérdida de inserción y desplazamiento de fase de un balun ideal. (a) Terminales de un balun. (b) Pérdida por inserción de un balun ideal.....	15
<b>Figura 5-2:</b> Diferentes configuraciones de baluns .....	17
<b>Figura 6-2:</b> Balun y transformadores con núcleo de ferrita .....	18
<b>Figura 7-2:</b> Una línea de microstrip impresa en un sustrato dieléctrico.....	20
<b>Figura 8-2:</b> Línea de transmisión microstrip. (a) Geometría. (b) Campo eléctrico y magnético. ....	21
<b>Figura 9-2:</b> Esquema de un balun de línea microstrip de anillo. ....	22
<b>Figura 10-2:</b> Circuito equivalente de un balun de línea de microstrip de anillo.....	23
<b>Figura 11-2:</b> (a) Balun Transformador MMIC MTX2-73+ (b) Circuito abierto interno. ....	27
<b>Figura 12-2:</b> Datos de rendimiento típicos a 25°C de MTX2-73+ (a) pérdidas por inserción (b) pérdidas de retorno en la entrada (c) desbalance de amplitud (d) desbalance de fase. ....	28
<b>Figura 13-2:</b> (a) Balun Transformador MMIC MTX2-143+ (b) Circuito abierto interno. ....	29
<b>Figura 14-2:</b> Datos de rendimiento típicos a 25°C de MTX2-143+ (a) pérdidas por inserción (b) pérdidas de retorno en la entrada (c) desbalance de amplitud (d) desbalance de fase. ....	30
<b>Figura 15-2:</b> Interacción de las tecnologías de simulación incluidas en Ansoft Designer.....	31
<b>Figura 16-2:</b> Materiales de la serie RO4000 constante dieléctrica vs. temperatura.....	32
<b>Figura 17-2:</b> Materiales de la serie RO4000 constante dieléctrica vs. Frecuencia .....	33
<b>Figura 18-2:</b> Datos medidos de pérdidas por inserción de microstrip (en orden de menor pérdida a mayor pérdida) .....	34
<b>Figura 19-2:</b> Conector de tramo final SMA hembra - Contacto Redondo.....	35
<b>Figura 20-2:</b> Especificaciones físicas del conector de tramo final SMA hembra - Contacto Redondo .....	36

<b>Figura 21-2:</b> Generador de señal RF/Microonda (Anritsu MG3692C) 0.1 Hz a 20 GHz. ....	36
<b>Figura 22-2:</b> Analizador de espectro (Spectrum Master™ MS2724C) .....	37
<b>Figura 1-3:</b> Esquemático del circuito para el Diseño 1 de Balun Microstrip a 2,4 GHz. ....	47
<b>Figura 2-3:</b> Vista superior del Diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz.....	48
<b>Figura 3-3:</b> Inicio de Proyecto Nexxim en Ansoft Designer. ....	49
<b>Figura 4-3:</b> Apilamiento de capas para la simulación de la placa.....	49
<b>Figura 5-3:</b> Selección de material dieléctrico Roger RO 4003c. ....	50
<b>Figura 6-3:</b> Vista preliminar del Diseño 1 del balun microstrip de alta frecuencia. ....	50
<b>Figura 7-3:</b> Combinación de las pistas para Diseño 1 del balun microstrip. ....	51
<b>Figura 8-3:</b> Resultado del Diseño 1 de las pistas preliminares para el balun microstrip de alta frecuencia.....	51
<b>Figura 9-3:</b> Calculo del ancho de la línea de transmisión para un acople de 50Ω.....	52
<b>Figura 10-3:</b> Inclusión de puertos de entrada y salida para poder realizar la simulación. ....	52
<b>Figura 11-3:</b> Cálculo de coordenadas cartesianas de los puntos P0 al P10 para el Diseño 1 de Balun Microstrip. ....	53
<b>Figura 12-3:</b> Calculo de coordenadas cartesianas de los puntos P19 al P37 para el Diseño 1 de Balun Microstrip. ....	53
<b>Figura 13-3:</b> Calculo de coordenadas cartesianas de los puntos P0 al P11 para el slot del Diseño 1 de Balun Microstrip. ....	54
<b>Figura 14-3:</b> Diseño 1 de balun microstrip a una frecuencia central de 2,4 GHz.....	54
<b>Figura 15-3:</b> Vista en 3D del Diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	55
<b>Figura 16-3:</b> Exportación del archivo de Ansoft Designer a AutoCAD DXF. ....	55
<b>Figura 17-3:</b> Resultado final del diseño 1 de balun microstrip en .dxf AutoCAD. ....	56
<b>Figura 18-3:</b> Implementación del diseño 1 de Balun microstrip a 2,4 GHz. (a) Vista frontal (b) Vista posterior.....	57
<b>Figura 19-3:</b> Vista superior del Diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz.....	58
<b>Figura 20-3:</b> Calculo de coordenadas cartesianas de los puntos P0 al P13 para el Diseño 2 de Balun Microstrip. ....	59
<b>Figura 21-3:</b> Calculo de coordenadas cartesianas de los puntos P14 al P28 para el Diseño 2 de Balun Microstrip. ....	60
<b>Figura 22-3:</b> Diseño 2 de balun microstrip a una frecuencia central de 2,4 GHz. ....	60
<b>Figura 23-3:</b> Vista en 3D del Diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	61
<b>Figura 24-3:</b> Resultado final del diseño 2 de balun microstrip en .dxf AutoCAD. ....	61

<b>Figura 25-3:</b> Implementación del diseño 2 de Balun microstrip a 2,4 GHz. (a) Vista frontal (b) Vista posterior.....	62
<b>Figura 26-3:</b> Vista superior del diseño de las pistas para implementar Balun de 2 a 7 GHz con tecnología MMIC.....	64
<b>Figura 27-3:</b> Coordenadas cartesianas del puerto 1 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.....	64
<b>Figura 28-3:</b> Coordenadas cartesianas del puerto 2 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.....	65
<b>Figura 29-3:</b> Coordenadas cartesianas del puerto 3 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.....	65
<b>Figura 30-3:</b> Coordenadas cartesianas del puesto a tierra para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.....	66
<b>Figura 31-3:</b> Coordenadas cartesianas de la línea de prueba para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.....	66
<b>Figura 32-3:</b> Diseño de pistas de balun MMIC MTX2-73+ a frecuencias de 2 a 7 GHz.....	67
<b>Figura 33-3:</b> Vista en 3D del diseño de pistas para balun MMIC MTX2-73+.....	67
<b>Figura 34-3:</b> Resultado final del diseño de pistas para balun MMIC MTX2-73+ con extensión .dxf AutoCAD.....	68
<b>Figura 35-3:</b> Implementación de Balun MMIC MTX2-73+ para trabajar de 2 a 7 GHz. a) Vista frontal b) Vista posterior.....	69
<b>Figura 36-3:</b> Vista superior del diseño de las pistas para implementar Balun de 5.5 a 13.5 GHz con tecnología MMIC.....	70
<b>Figura 37-3:</b> Coordenadas cartesianas del puerto 1 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.....	70
<b>Figura 38-3:</b> Coordenadas cartesianas del puerto 2 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.....	71
<b>Figura 39-3:</b> Coordenadas cartesianas del puerto 3 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.....	71
<b>Figura 40-3:</b> Coordenadas cartesianas de los puntos 0 al 13 del puesto a tierra para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.....	72
<b>Figura 41-3:</b> Coordenadas cartesianas de los puntos 14 al 27 del puesto a tierra para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.....	72
<b>Figura 42-3:</b> Diseño de pistas de balun MMIC MTX2-143+ a frecuencias de 5.5 a 13.5 GHz.....	73
<b>Figura 43-3:</b> Vista en 3D del diseño de pistas para balun MMIC MTX2-143+.....	73

<b>Figura 44-3:</b> Resultado final del diseño de pistas para balun MMIC MTX2-143+ con extensión .dxf AutoCAD.....	74
<b>Figura 45-3:</b> Implementación de Balun MMIC MTX2-143+ para trabajar de 5.5 a 13.5 GHz. a) Vista frontal b) Vista posterior. ....	75
<b>Figura 1-4:</b> Diagrama de conexión para mediciones de los Balun de alta frecuencia. ....	83
<b>Figura 2-4:</b> Sondas SMA macho 50Ω.....	83
<b>Figura 3-4:</b> Adaptador Hembra para RX 50Ω .....	84
<b>Figura 4-4:</b> Prueba de los equipos de TX y RX. ....	84
<b>Figura 5-4:</b> Configuración para medir el balun implementado del diseño 1 a 2,4 GHz con tecnología Microstrip. ....	85
<b>Figura 6-4:</b> Configuración de conexión para mediciones de balun de alta frecuencia MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz. ....	95
<b>Figura 7-4:</b> Configuración de conexión para mediciones de balun MMIC MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz.....	98

## INDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-4:</b> Resultados de la encuesta sobre el impacto de la implementación de baluns de alta frecuencia en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH. ....	77
<b>Gráfico 2-4:</b> Significancia del factor de disipación tangencial en el rendimiento eléctrico del material RO4350B .....	79
<b>Gráfico 3-4:</b> Efectos principales para coeficiente térmico del material en función de factores para el material RO4350B .....	79
<b>Gráfico 4-4:</b> Significancia del factor de disipación tangencial en el rendimiento eléctrico del material RO4003C .....	82
<b>Gráfico 5-4:</b> Efectos principales para coeficiente térmico del material en función de factores para el material RO4003C .....	82
<b>Gráfico 6-4:</b> Coeficiente de reflexión $S(1,1)$ para diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz. ..	86
<b>Gráfico 7-4:</b> Carta de Smith del acople de impedancia normalizada a $50\Omega$ para el diseño 1 de balun microstrip. ....	86
<b>Gráfico 8-4:</b> Simulación del coeficiente de transmisión $S(1,2)$ y $S(1,3)$ . ....	87
<b>Gráfico 9-4:</b> Medición del coeficiente de transmisión $S(1,2)$ y $S(1,3)$ . ....	87
<b>Gráfico 10-4:</b> Simulación del parámetro $S(2,3)$ para el diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	88
<b>Gráfico 11-4:</b> Medición del parámetro $S(2,3)$ para el diseño 1 de balun microstrip.....	88
<b>Gráfico 12-4:</b> Simulación de desfase entre los parámetros $S(1,2)$ y $S(1,3)$ en el diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	89
<b>Gráfico 13-4:</b> Configuración de conexión para medición del diseño 2 de balun con tecnología Microstrip a 2,4 GHz. ....	90
<b>Gráfico 14-4:</b> Simulación para el coeficiente de reflexión $S(1,1)$ del diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	90
<b>Gráfico 15-4:</b> Carta de Smith para acople de impedancia normalizada a $50\Omega$ para diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	91
<b>Gráfico 16-4:</b> Simulación de parámetros del coeficiente de transmisión $S(1,2)$ y $S(1,3)$ para el diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	91
<b>Gráfico 17-4:</b> Medición de los coeficientes de transmisión $S(1,2)$ y $S(1,3)$ para el diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	92
<b>Gráfico 18-4:</b> Simulación del parámetro $S(2,3)$ para el diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz. ....	93
<b>Gráfico 19-4:</b> Medición del parámetro $S(2,3)$ del diseño 2 de balun microstrip. ....	93

<b>Gráfico 20-4:</b> Simulación del desfase entre los parámetros $S(1,2)$ y $S(1,3)$ del diseño 2 de balun microstrip para frecuencias de 2,4 GHz. ....	94
<b>Gráfico 21-4:</b> Pérdidas por inserción de balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz. ....	95
<b>Gráfico 22-4:</b> Medición de pérdidas por inserción $S(1,2)$ en Balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz. ....	96
<b>Gráfico 23-4:</b> Medición de pérdidas por inserción $S(1,3)$ en Balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz. ....	97
<b>Gráfico 24-4:</b> Desbalance de amplitud para balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz. ....	97
<b>Gráfico 25-4:</b> Medición del desbalance de amplitud para balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz. ....	98
<b>Gráfico 26-4:</b> Pérdidas por inserción de balun MMIC MTX2-143+ de 4 a 14 GHz. ....	99
<b>Gráfico 27-4:</b> Medición de las pérdidas por inserción $S(1,2)$ de balun MMIC MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz. ....	99
<b>Gráfico 28-4:</b> Medición de las pérdidas por inserción $S(1,3)$ de balun MMIC MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz. ....	100
<b>Gráfico 29-4:</b> Desbalance de amplitud de balun MMIC MTX2-143+ de 4 a 14 GHz. ....	101
<b>Gráfico 30-4:</b> Medición de desbalance de amplitud para balun MMIC MTX2-143+ de 13.5 a 12.5 GHz. ....	101

## **ANEXOS**

**Anexo A:** Encuesta

**Anexo B:** Datasheet MMIC Balun MTX2-73+

**Anexo C:** Datasheet MMIC Balun MTX2-143+

**Anexo D:** SMA 50 Ohm Connectors

**Anexo E:** Mediciones en los equipos de TX y RX

**Anexo F:** Código en Matlab

**Anexo G:** Implementación del set de Baluns de Alta Frecuencia

## **RESUMEN**

El objetivo del trabajo de titulación fue diseñar e implementar un set de baluns de altas frecuencias utilizando tecnologías Microstrip y Circuitos Integrados Monolíticos de Microondas (MMIC) para el laboratorio de comunicaciones y microondas en la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Previa investigación para determinar el impacto que tendría la implementación del set de baluns, se diseñó un método estadístico experimental para determinar el efecto del rendimiento eléctrico del material de Rogers RO4350B y RO4003C, datos que fueron procesados con el software Statgraphics Centurion, lo cual ayudó en la elección del material. Se realizó dos diseños de Baluns con tecnología Microstrip y la simulación a 2,4 GHz con el software Ansoft Designer, implementándose así cinco dispositivos de este tipo. Con el mismo software se realizó el diseño de las pistas y la implementación de cinco baluns de (2 a 7) GHz y cinco baluns de (5.5 a 13.5) GHz, con tecnología MMIC. Siendo un total de quince dispositivos implementados. Los resultados de la investigación acerca del impacto de la implementación de los dispositivos fueron satisfactorios. Se procedió a elegir el material de Rogers RO4003C para el diseño e implementación, por su alta eficiencia eléctrica y gran desempeño en altas frecuencias. Las mediciones fueron realizadas con el analizador de espectros Anritsu MS2724C, inyectando la señal a la entrada de los baluns con el generador de señales Anritsu MG3692C, datos que fueron procesados con el software Matlab. Los dispositivos trabajaron a las frecuencias propuestas, se obtuvo la variación de fase requerida en la salida, bajas pérdidas de inserción y bajo desbalance de amplitud. En conclusión, los resultados fueron los esperados. Se recomienda utilizar el material adecuado para la implementación de dispositivos de alta frecuencia y diferentes técnicas de revelado para circuitos impresos.

**PALABRAS CLAVE:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <TELECOMUNICACIONES>, <SIMETRIZADOR DE SEÑALES>, <ALTA FRECUENCIA>, <BALUN>, <MICROSTRIP>, <CIRCUITOS INTEGRADOS MONOLÍTICOS DE MICROONDAS (MMIC)>.

## **ABSTRACT**

The objective of the degree work was to design and implement a set of high-frequency baluns using Microstrip technologies and Microwave Monolithic Integrated Circuits (MMIC) for the communications and microwave laboratory at the Faculty of Informatics Science and Electronics of the Chimborazo Polytechnic Higher School. After research to determine the impact of the implementation of the balun set, an experimental statistical method was designed to determine the effect of the electrical performance of Rogers material RO4350B and RO4003C, data that were processed with Statgraphics Centurion software, which helped in the choice of material. Two baluns designs were made with Microstrip technology and 2.4 GHz simulation with Ansoft Designer software, thus implementing five such devices. The same software carried out the design of the tracks and the implementation of five baluns of (2 to 7) GHz and five baluns of (5.5 to 13.5) GHz, with MMIC technology. A total of fifteen devices are deployed. The results of the research on the impact of the implementation of the devices were satisfactory. Rogers RO4003C material was chosen for design and implementation, for its high electrical efficiency and high frequency performance. Measurements were performed with the Anritsu MS3692C spectrum analyzer, injecting the signal into the baluns input with the Anritsu MS3692C signal generator, data that was processed with Matlab Software. The devices worked at the proposed frequencies, obtained the required phase variation in the output, low insertion losses and low amplitude imbalance. In conclusion, the results were as expected. It is recommended to use the right material for the implementation of high frequency devices and different disclosure techniques for printed circuits.

**KEYWORDS:** <TECHNOLOGY AND SCIENCES OF ENGINEERING>, <TELECOMMUNICATIONS>, <SIGNAL SIMETRIZER>, <HIGH FREQUENCY>, <BALUN>, <MICROSTRIP>, <MICROWAVE MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS (MMIC)>.

# CAPITULO I

## 1. MARCO REFERENCIAL

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de telecomunicaciones los dispositivos utilizados para las transmisiones inalámbricas como Filtros, Mezcladores, Atenuadores, Antenas, Baluns, entre otros, se han visto en la necesidad de estar en continua mejora tecnológica. La utilización de la tecnología Microstrip en los dispositivos de alta frecuencia ha venido tomando fuerza en los últimos años, ya que el tamaño reducido es un factor primordial en áreas como la aeronáutica, satélites, comunicaciones móviles y en general para aplicaciones de frecuencias en rangos de las microondas y ondas milimétricas, con la principal ventaja de que no cuesta mucho su fabricación.

Balun es una combinación de palabras entre (Balanced) y (Unbalanced). La naturaleza de una antena dipolo es la de ser balanceada, esto quiere decir que las corrientes que circulan a través de sus brazos son equivalentes en amplitud, pero opuestas en fase, el inconveniente se da al momento de alimentar la antena con un cable coaxial ya que se estaría desadaptando el balance del sistema. Esto se debe a que el un lado de la antena está conectado al conductor central del coaxial y el otro lado a la malla. La malla normalmente está conectada a tierra en el otro lado al transmisor, haciéndola una línea desbalanceada. Esta configuración desbalanceada puede hacer que alguna corriente regrese por la malla desde la antena ocasionando pérdidas en la potencia de transmisión. Para evitar este problema se utiliza el Balun, dispositivo que adapta la línea de alimentación desbalanceada del coaxial a la antena balanceada. Los Baluns con tecnología MMIC ocasionalmente son utilizados para alimentar antenas, pero su función primordial es proporcionar señales equilibradas para ayudar a cancelar señales no deseadas provenientes de mezcladores en los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

El presente trabajo busca diseñar e implementar un set de baluns con tecnologías Microstrip y MMIC utilizando materiales específicos para trabajar en altas frecuencias, ya que actualmente en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH no se dispone de este tipo de dispositivos. La investigación y construcción de estas unidades será objeto de estudio y práctica en el laboratorio para las futuras generaciones de maestros y estudiantes gracias a la implementación en dicho lugar y así fomentar el desarrollo de este tipo de tecnologías en el país.

El Capítulo I detalla la introducción, así como también la formulación del problema, la justificación del trabajo de titulación y los objetivos. En el Capítulo II se aborda la investigación teórica de los temas más relevantes y necesarios para el desarrollo del presente proyecto. En el

Capítulo III se detallan los materiales y métodos utilizados, así como las técnicas que se llevaron a cabo para realizar el proyecto. En el Capítulo IV se detallan los resultados obtenidos del diagnóstico, la selección del material y la implementación del set de Baluns de alta frecuencia.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo diseñar e implementar un set de baluns de altas frecuencias utilizando tecnologías Microstrip y MMIC para el laboratorio de comunicaciones y microondas en la FIE-ESPOCH?

### ***1.2.1. Sistematización del problema***

- ¿Existe algún tipo de material específico para la construcción de un set de baluns que tenga las mejores características para operar en altas frecuencias?
- ¿Se diseñará y construirá un set de baluns mediante los parámetros que exigen las altas frecuencias para el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH?
- ¿Cuál será el diseño más apropiado de un balun con tecnología Microstrip que se necesita para trabajar en altas frecuencias?
- ¿Qué tipos de dispositivos MMIC cumplirán con los requerimientos básicos que se necesita para la implementación de un set de baluns para aplicaciones de banda estrecha?

### 1.3. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Cuando se conecta una línea equilibrada (dipolo) a una no equilibrada (coaxial) existe una diferencia de corrientes debido a la naturaleza asimétrica de la alimentación. Este desequilibrio en las corrientes afecta negativamente sobre el diagrama de radiación de la antena dipolo y la impedancia de entrada.

Para corregir el desequilibrio presentado en las antenas dipolo se utiliza un simetrizador o balun. La complejidad de este tipo de dispositivos es que no existe ninguna técnica que permita su diseño directo. El objetivo es hacer que el camino de las corrientes hacia los terminales del dipolo sea el mismo y conseguir así la simetría buscada (Verdú, 2006, pp. 41,42).

Estos dispositivos se pueden clasificar en dos categorías: a parámetros concentrados y a parámetros distribuidos. Los Balun a parámetros concentrados se fabrican con inductores y capacitores, se pueden mencionar: el Balun choke o de corriente, Balun coaxial, Balun bazooka, etc.; estos se emplean para anchos de bandas estrechos y no proveen transformaciones de impedancias, a diferencia del Balun de ferrita que provee transformaciones de impedancia como 4:1 o 1:4, 1:1, entre otras, para banda ancha. Los Balun a parámetros distribuidos son los que utilizan tecnología planar como la microstrip, la CPW (guía de onda coplanar), y la CPS (línea de cinta coplanar).

De acuerdo con lo mencionado implementar un set de dispositivos de tipo balun para trabajar en altas frecuencias resulta indispensable para el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH ya que son muy útiles en redes de acoplamiento y dependiendo de la utilidad que se les quiere dar pueden construirse a bajo precio y con una relación de materiales relativamente pequeña.

Además, los baluns se pueden encontrar en circuitos diferenciales de estado sólido, como amplificadores y mezcladores, donde la red de acoplamiento está obligada a lograr la máxima transferencia de potencia para la carga. Por esto y muchas otras aplicaciones útiles, la investigación sobre estos componentes es muy amplia y se torna de gran interés para los estudios de las telecomunicaciones.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

Los baluns de alta frecuencia son utilizados en aplicaciones de banda estrecha como telefonía celular y redes inalámbricas como WLAN, WiMAX, WiBRO, ISM, RADAR entre otros. Permiten una excelente transmisión de potencia de la señal de entrada a salida y se adapta a los requisitos de espacio reducido para diseños de PCB.

La implementación de este material de estudio en el Laboratorio de Comunicaciones y Microondas de la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH permitirá a docentes y estudiantes realizar sus prácticas con dispositivos de altas frecuencias realizados en materiales con características específicas para el caso.

En la actualidad se pueden encontrar diversos tipos de materiales para realizar placas de circuito impreso por lo que se busca el material más acorde a las necesidades que se han presentado ya que se va a trabajar con constantes dieléctricas específicas.

### **FR-4 vs. Roger**

El material FR-4 proporcionan el estándar base para sustratos de PCB, brindando un equilibrio ampliamente efectivo entre costo, capacidad de fabricación, propiedades eléctricas, durabilidad y rendimiento. Pero cuando las propiedades eléctricas y el rendimiento avanzado son fundamentales para sus diseños, los materiales de Rogers Corporation ofrecen:

- Menor pérdida dieléctrica
- Baja pérdida de señal eléctrica
- Amplia gama de valores Dk (constante dieléctrica) (2.55-10.2)
- Baja emisión de gases para aplicaciones espaciales

Son compatibles con RoHS y son compatibles con los métodos de procesamiento sin plomo; de hecho, se pueden procesar con los mismos métodos que para FR-4 para minimizar los costos de producción y con características muy adecuadas para los exigentes circuitos de RF / microondas (Rogers Corporation, 2015a).

En vista de las características de los materiales anteriormente descritos se puede notar que el material de Rogers es el más apropiado para trabajar en diseños de dispositivos para altas frecuencias, por sus excelentes prestaciones.

## **1.5. OBJETIVOS**

### ***1.5.1. Objetivo general***

Diseñar e implementar un set de Baluns de altas frecuencias utilizando tecnologías Microstrip y MMIC para el laboratorio de comunicaciones y microondas en la FIE-ESPOCH.

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

- Diseñar balun con tecnología Microstrip para trabajar dentro del rango de frecuencias de [2-7] GHz.
- Simular balun con tecnología Microstrip para constatar las frecuencias a las que va a trabajar.
- Implementar un set de baluns de cinco unidades con tecnología Microstrip en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH.
- Implementar dos sets de baluns con tecnología MMIC de cinco unidades cada uno para trabajar dentro del rango de frecuencias de [2-7] GHz y de [5.5-13.5] GHz en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH.
- Verificar el funcionamiento del set de baluns para trabajar en altas frecuencias utilizando tecnologías Microstrip y MMIC.
- Realizar las pruebas del comportamiento y evaluar los dispositivos de altas frecuencias.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. HISTORIA E IMPORTANCIA DE LOS BALUNS EN LAS TELECOMUNICACIONES

##### 2.1.1. *Historia de las telecomunicaciones*

Entre 1864 y 1873, James Clerk Maxwell (1831-1894), un físico teórico escocés, demostró que cuatro ecuaciones relativamente simples podían describir completamente los campos eléctricos y magnéticos y su interacción. Describió cómo las cargas y las corrientes pueden producir una onda de radio electromagnética. En 1887, en el laboratorio de investigación de un joven físico alemán, Heinrich Hertz, el primer radiotransmisor comenzó a trabajar brevemente en un radio de pocos metros. Alexander Popov (1859-1906) demostró su instrumento para la detección y registro de oscilaciones eléctricas el 7 de mayo de 1895. En la primavera del mismo año, Guglielmo Marconi (1874-1937) llevó a cabo sus experimentos inalámbricos al aire libre y pronto descubrió que una colina intermedia no era una barrera para la recepción de ondas electromagnéticas. Según las estadísticas de la UIT (UIT 2015), en diciembre de 2014 había más de 7.000 millones de abonados a la telefonía móvil-celular en los 228 Estados Miembros de la UIT, lo que equivale al 100% de la población mundial (Mazar, 2016, p. 1).

##### 2.1.2. *Importancia de los baluns en las telecomunicaciones*

El balun es un recurso utilizado para compensar las impedancias en una antena dipolo o un simple alambre alimentado al centro con los extremos abiertos, la cual es denominada antena balanceada. En este tipo de antena, las corrientes que fluyen en una de las mitades de la antena son igual o equivalente en la otra mitad, pero son opuestas en fase. Fase se describe como la posición relativa de dos puntos en una onda o en dos ondas diferentes en un punto particular en el tiempo. Desde que estas dos corrientes están en fase opuesta, una está en la mitad positiva del ciclo y la otra está en la mitad negativa del ciclo.

En una antena balanceada no importa el lado que se conecte a tierra debido a que la antena es balanceada respecto de la tierra. Cuando se alimenta una antena dipolo al centro con cable coaxial, se está inadaptando el balance del sistema. Esto sucede porque un lado de la antena está conectado

al conductor central o interior del coaxial y el otro está conectado a la malla. Normalmente la malla protectora está conectada a tierra en el transmisor o transceptor, haciéndola una línea no balanceada. Es esta condición de no balanceo puede permitir a alguna corriente del irradiante a regresarse por la malla del coaxial desde la antena. Esto puede causar serios problemas de antena y definitivamente deben ser evitados (Federachi, 2018).

Cuando un sistema de antena no es adaptado a la impedancia característica del transmisor, alguna parte de la potencia es reflejada desde la antena. La potencia que viaja desde el transmisor hacia la antena se conoce como la potencia transmitida. Cuando esa potencia llega a la antena de un sistema inadaptado, algo de ella se refleja de vuelta hacia atrás por la línea de transmisión, también algo de esa potencia es irradiado por la antena lo que, por supuesto no es requerido. La potencia que regresa hacia el transmisor desde la antena es conocida como potencia reflejada. Cuando la potencia transmitida y la potencia reflejada pasan una a la otra en la línea de transmisión, causa que aparezcan en la línea ondas estacionarias de voltaje. Cuando esto ocurre, la corriente y el voltaje de RF (radiofrecuencia) no son uniformes a lo largo de la línea.

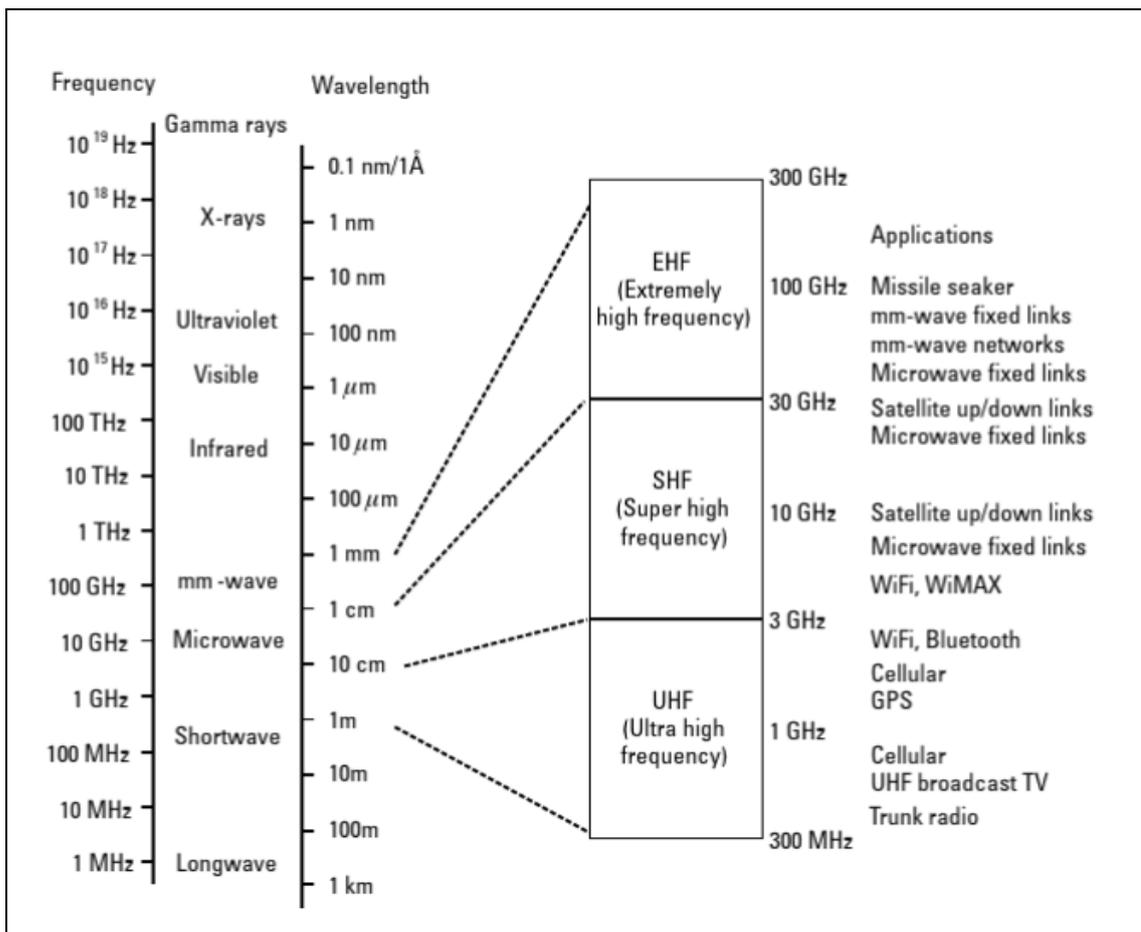
La radiofrecuencia es un medio intangible que transporta comunicaciones electrónicas inalámbricas: un servicio en red de interés económico general (similar al transporte, el gas y la electricidad). La regulación de la radiofrecuencia es de importancia nacional en la teoría, la política y la práctica. Los avances tecnológicos, la innovación, la penetración de nuevas tecnologías, la potencia económica y militar están directamente relacionados con la regulación inalámbrica. Las radiofrecuencias sirven para mejorar las condiciones económicas y sociales de una nación.

El espectro de radiofrecuencia es un recurso natural; sin embargo, existe consenso en que las telecomunicaciones inalámbricas necesitan regulación a nivel nacional, regional y mundial. Según Mazar (2016, p.1) la primera frase de la Constitución de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (UIT 2015) reconoce plenamente "el derecho soberano de cada Estado a regular sus telecomunicaciones". El derecho soberano de los Estados a actuar con independencia en su territorio está consagrado en el derecho internacional general.

La radiofrecuencia es un recurso nacional limitado, al igual que el agua, la tierra, el gas y los minerales. Al igual que éstas, es escasa; sin embargo, la radiofrecuencia es renovable y no está a punto de agotarse. Requiere un uso óptimo; de no hacerlo en tiempo real, se trata de un despilfarro económico de un recurso nacional (Mazar, 2016, p. 1).

## 2.2. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El espectro electromagnético es el rango de todas las frecuencias de radiación electromagnética posibles. El espectro electromagnético es teóricamente infinito, aunque en realidad se extiende desde la longitud de onda más corta (definida en la mecánica cuántica como la longitud de Planck) hasta el tamaño del universo.



**Figura 1-2:** Espectro electromagnético

Fuente: (Wells, 2010, p. 2)

El término radiofrecuencia (RF) es un término genérico utilizado para cubrir todas las bandas, tanto altas como bajas, que se utilizan para los servicios de transmisión radioeléctrica. Tradicionalmente, se considera que las frecuencias de microondas ocupan la banda SHF (superalta frecuencia) y las ondas milimétricas las bandas EHF (frecuencia extremadamente alta), como se puede apreciar en la Figura 1-2 (Wells, 2010, pp. 2-3).

### 2.2.1. Designación de las bandas de frecuencia

La región del espectro electromagnético designada como banda de microondas se extiende de 3 GHz a 30 GHz, mientras que la banda de ondas milimétricas se extiende de 30 GHz a 300 GHz. En la Tabla 1-2 se muestra la porción de radiofrecuencia del espectro electromagnético definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Las regiones de microondas y de ondas milimétricas están cubiertas por las bandas de super alta frecuencia (SHF) y de frecuencia extremadamente alta (EHF) en el espectro de la UIT.

En los Estados Unidos se utilizan comúnmente las designaciones de letras IEEE, que figuran en la Tabla 2-2. Bajo esta definición, se puede considerar que la región de microondas comienza en la banda S y se extiende a la banda Ka, mientras que la región de ondas milimétricas se extiende desde la banda Ka hasta la banda de ondas milimétricas, que no tiene una designación de letra estándar.

La Tabla 1-2 muestra el espectro de microondas y de ondas milimétricas definido por la UIT y la IEEE. Las frecuencias entre 300 GHz y 3000 GHz no tienen una designación y generalmente se denominan simplemente frecuencias de terahercios (THz) (Nanzer, 2012, p. 7).

**Tabla 1-2:** Bandas de frecuencia de la unión internacional de telecomunicaciones

Número de banda	Designación	Frecuencias
1	Extremely low frequency (ELF)	3-30 Hz
2	Super low frequency (SLF)	30-300 Hz
3	Ultra low frequency (ULF)	300-3000 Hz
4	Very low frequency (VLF)	3-30 KHz
5	Low frequency (LF)	30-300 KHz
6	Medium frequency (MF)	300-3000 KHz
7	High frequency (HF)	3-30 MHz
8	Very high frequency (VHF)	30-300 MHz
9	Ultra high frequency (UHF)	300-3000 MHz
10	Super high frequency (SHF)	3-30 GHz
11	Extremely high frequency (EHF)	30-300 GHz
12	-	300-3000 GHz

**Fuente:** (Nanzer, 2012, p. 7)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

**Tabla 2-2:** Estándar IEEE designaciones de letras para las bandas de frecuencia de radar y satélite

<b>Designación</b>	<b>Frecuencias</b>
HF	3-30 MHz
VHF	30-300 MHz
UHF	300-1000 MHz
L	1-2 GHz
S	2-4 GHz
C	4-8 GHz
X	8-12 GHz
Ku	12-18 GHz
K	18-26.5 GHz
Ka	26.5-40 GHz
V	40-75 GHz
W	75-110 GHz
mmw	110-300 GHz

**Fuente:** (Nanzer, 2012, p. 8)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

### **2.2.2. Microondas**

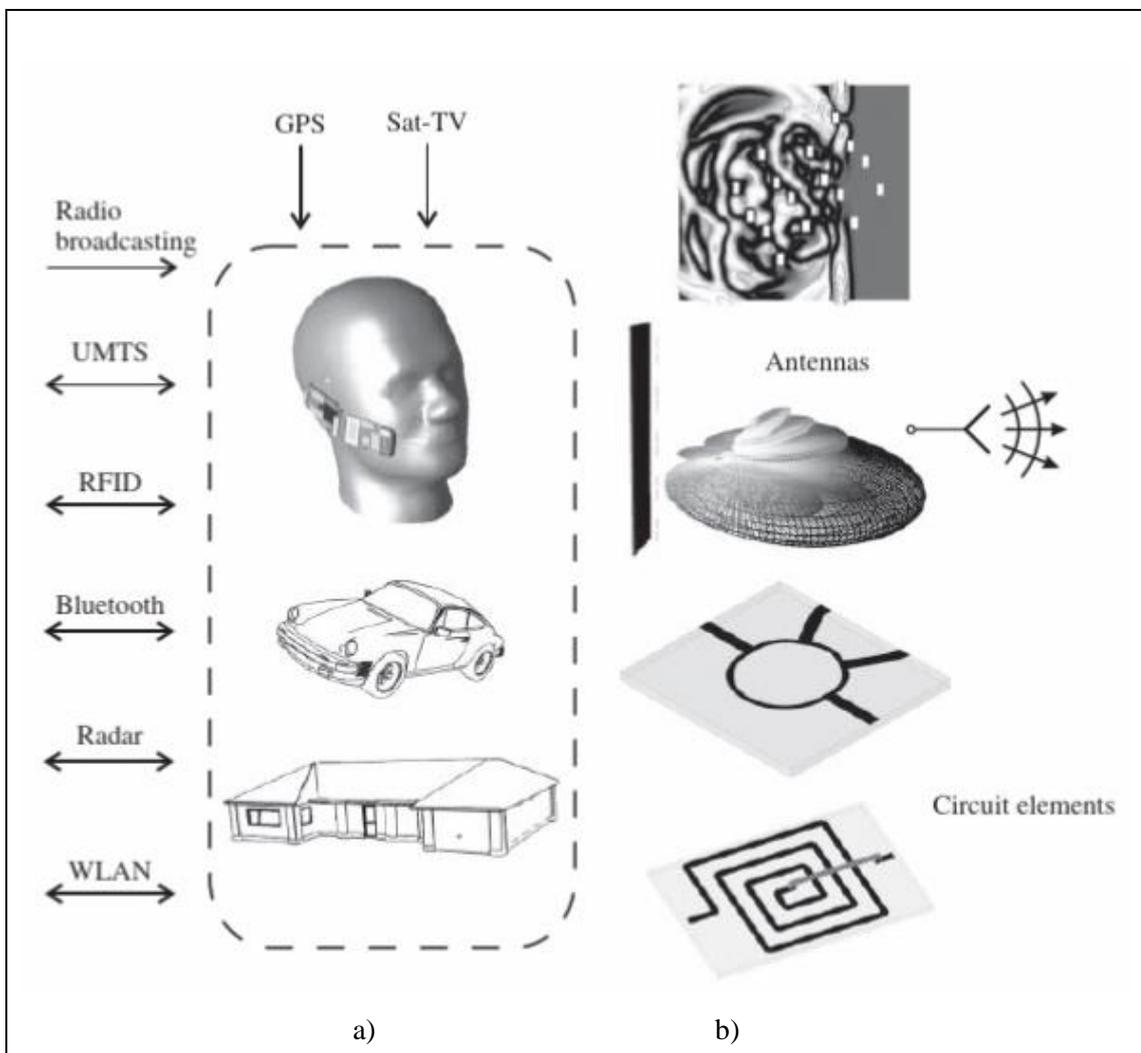
Las frecuencias de microondas se refieren a la gama de frecuencias desde 300 MHz hasta 300 GHz, o equivalente a la gama de longitudes de onda desde 1 metro hasta 1 milímetro. Desde las dimensiones de circuito y componentes de circuito diseñados para operar en frecuencias de microondas pueden ser fácilmente comparables a la longitud de onda.

En el análisis de circuitos agrupados, la suposición principal es que la corriente a través de un brazo en serie y el voltaje a través de ramas paralelas no cambian con la distancia porque las dimensiones de los circuitos son extremadamente pequeñas en comparación con la longitud de onda de la señal. Como resultado, los voltajes de los nodos y las corrientes de bucle se vuelven suficientes para analizar dichos circuitos.

Sin embargo, si las dimensiones de los componentes del circuito se vuelven comparables a la longitud de onda de la señal, la suposición ya no se mantiene; es decir, la corriente a través de un componente y la tensión a través de ramas paralelas varían a medida que uno se mueve a lo largo del circuito. Esto se debe principalmente al tiempo de propagación finita requerido para que una perturbación eléctrica, como la corriente y el voltaje, se mueva en un circuito.

Por lo tanto, la naturaleza distribuida del circuito debe ser tomada en cuenta en las frecuencias de microondas para modelar con precisión el cambio de fase y la atenuación de las señales mientras viajan a lo largo del circuito. Para tener en cuenta los cambios de corriente y tensión a lo largo de una línea conductora o a través de un componente de circuito, estos elementos pueden modelarse, desde el punto de vista del circuito, mediante la resistencia conectada en serie y en paralelo  $R$ , inductancia  $L$ , capacitancia  $C$ , y conductancia  $G$  por unidad de longitud, distribuida a lo largo de la línea o componente de circuito (Kinayman, 2005, p. 1).

### 2.2.3. Aplicaciones de radiofrecuencia y microondas



**Figura 2-2:** a) Ejemplos de aplicaciones inalámbricas b) Componentes de RF y propagación de ondas electromagnéticas

Fuente: (Gustrau, 2012, p. 2)

Hoy en día, en casa o en movimiento, cada uno de nosotros utiliza cada vez más dispositivos que emplean tecnología inalámbrica. La Figura 2-2 muestra una selección de aplicaciones de comunicación, navegación, identificación y detección inalámbricas.

Las aplicaciones incluyen la comunicación terrestre de voz y datos, es decir, las redes celulares y las redes de comunicación inalámbricas, así como la comunicación terrestre y los sistemas de radiodifusión por satélite. Los sistemas de identificación inalámbrica (RFID) dentro de las bandas ISM gozan de una creciente popularidad entre el tráfico de carga y las empresas de logística. En cuanto al campo de la navegación, cabe destacar el GPS, que ya está instalado en numerosos vehículos y dispositivos móviles. También en el sector de la automoción, los sistemas de radar se utilizan para monitorizar las áreas circundantes o sirven como sensores para los sistemas de asistencia al conductor (Gustrau, 2012, p. 2).

La tecnología de alta frecuencia siempre ha sido de gran importancia en el campo de las aplicaciones de radio, aunque recientemente los métodos de diseño de RF han empezado a desarrollarse como un factor crucial en los circuitos digitales rápidos. Debido a la creciente velocidad de procesamiento de los circuitos digitales, se producen señales de alta frecuencia que, a su vez, crean demanda de métodos de diseño de RF.

En el futuro se verá una progresión creciente de la tendencia de aplicar componentes y sistemas de tecnología de alta frecuencia a nuevas áreas de aplicación. El desarrollo y mantenimiento de estos sistemas requiere un amplio conocimiento del comportamiento en alta frecuencia de elementos básicos (por ejemplo, resistencias, condensadores, inductores, líneas de transmisión, transistores), componentes (por ejemplo, antenas y su alimentación mediante técnicas de acoplamiento), circuitos (por ejemplo, filtros, amplificadores, mezcladores), incluidas cuestiones físicas como la propagación de ondas electromagnéticas (Gustrau 2012, p. 1).

### **2.3. TÉCNICAS DE ACOPLAMIENTO DE ANTENAS**

El funcionamiento de un sistema de antenas en una gama de frecuencias no depende completamente de la respuesta de frecuencia del propio elemento de antena, depende de las características de frecuencia de la combinación línea de transmisión-elemento de antena. En la práctica, la impedancia característica de la línea de transmisión suele ser real, mientras que la del elemento de antena es compleja. También la variación de cada uno en función de la frecuencia no es la misma. Por lo tanto, deben diseñarse redes de acoplamiento eficientes que intenten emparejar las características de los dos dispositivos en la gama de frecuencias deseada.

Hay muchas redes de acoplamiento que pueden utilizarse para conectar la línea de transmisión al elemento antena y que pueden diseñarse para proporcionar características de frecuencia aceptables (Balanis, 2016, p. 513). En el presente apartado se tratará sobre la técnica de acoplamiento con baluns.

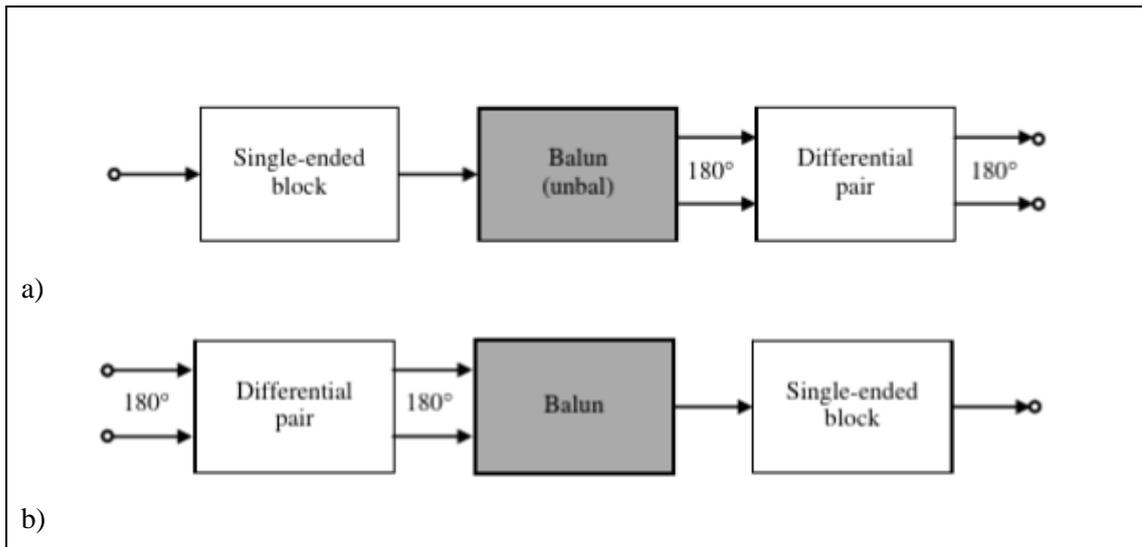
### **2.3.1. RF Balun**

Una línea de transmisión de dos cables (dos líneas de conductores paralelos) es una línea simétrica, mientras que un cable coaxial está intrínsecamente desequilibrado. Debido a que los conductores internos y externos (dentro y fuera de él) del coaxial no están acoplados a la antena de la misma manera, proporcionan el desequilibrio. El resultado es un flujo neto de corriente a tierra en la parte exterior del conductor. Los dispositivos que pueden utilizarse para equilibrar sistemas intrínsecamente desequilibrados, cancelando o ahogando la corriente exterior, se conocen como baluns (Balanis, 2016, p. 521).

Un balun es un bloque de transformación entre una etapa de un solo extremo y un par diferencial. Un balun que transforma una señal de una etapa de un solo extremo a un par diferencial divide una señal de un solo extremo en un par de señales diferenciales de la misma magnitud, pero con una diferencia de fase de 180 grados. Se llama divisor como se muestra en la Figura 3-2(a).

Un par diferencial desempeña algunas funciones especiales en el transporte o manipulación de una señal. Por ejemplo, la capacidad de rechazo de modo común existe potencialmente en un par diferencial pero no en una etapa de un solo extremo. Un balun que transforma una señal de un par diferencial a una etapa de un solo extremo combina un par de señales diferenciales de la misma magnitud, pero con una diferencia de fase de 180° como señal de un solo extremo. Se llama combinador como se muestra en la Figura 3-2(b). La conversión de un par diferencial a una etapa de un solo extremo simplifica tanto la simulación como la prueba de un bloque.

La palabra "Balun" es un portmanteau formado por las palabras "balanced" y "unbalanced", en el que equilibrado implica una configuración diferencial y desequilibrado representa una configuración de un solo extremo. A veces, los autores se refieren al tipo de balun en la Figura 3-2(a) como un "divisor" y al tipo de balun en la Figura 3-2(b) como un "combinador". El divisor es un combinador invertido, y viceversa (Li, 2012, p. 547).



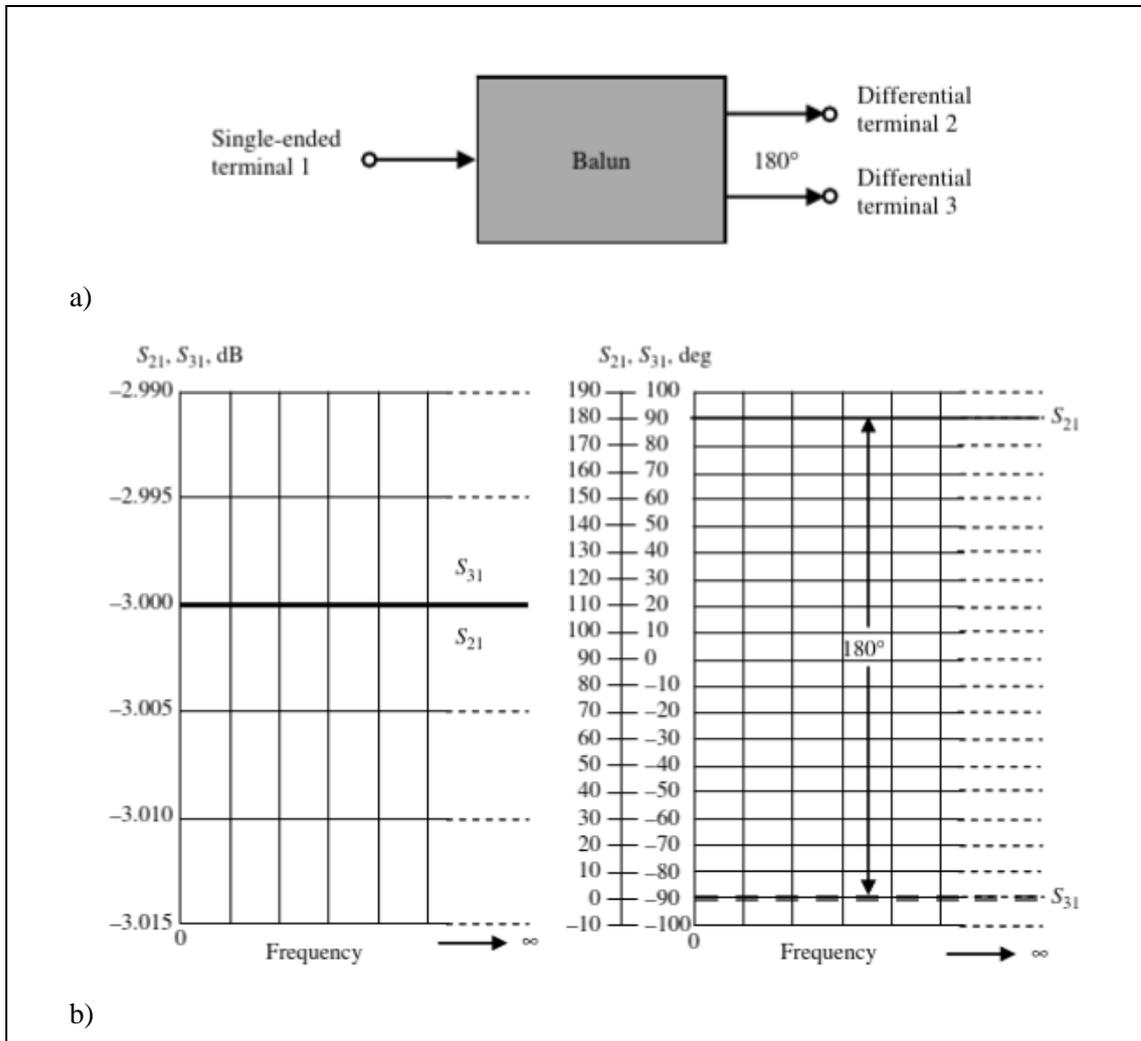
**Figura 3-2:** Un balun, que es un bloque entre un bloque de un solo extremo y un par diferencial. (a) Del bloque de un solo extremo al par diferencial. (b) De par diferencial a bloque de un solo extremo.

**Fuente:** (Li, 2012, p. 548)

El balun es usualmente implementado por partes pasivas y, si es así, puede ser llamado un balun pasivo. Sin embargo, también hay disponibles baluns activos, en los que el bloque contiene tanto partes activas como pasivas. En este apartado, la discusión se enfoca a los baluns pasivos. La Figura 4-2 representa las características principales de un balun ideal, que se pueden resumir de la siguiente manera:

- Hay tres terminales: una terminal de un solo extremo y dos terminales diferenciales. Típicamente, la impedancia que se mira en los tres terminales es de  $50 \Omega$ . Sin embargo, también son posibles otros valores, en los que las impedancias del terminal de un solo extremo y de los dos terminales diferenciales difieren; sin embargo, las impedancias de los dos terminales diferenciales deben mantenerse iguales.
- En los dos terminales diferenciales, las magnitudes de la señal son iguales pero sus fases se mantienen en diferencia de  $180^\circ$ . El valor absoluto de la fase en los tres terminales depende del tipo de balun y del punto de tierra de referencia, GND, en el bloque del circuito. En la Figura 4-2(b) se proporcionan dos ordenaciones de fase para diferentes escalas de fase.
- La pérdida total de inserción desde el terminal de un solo extremo hasta los terminales diferenciales es cero. Esto implica que la potencia de la señal en cada terminal diferencial es 3 dB menor que la del terminal de un solo extremo porque la potencia de la señal en el terminal de un solo extremo es la suma de las potencias de la señal en los dos terminales diferenciales. En realidad, en un divisor la potencia de la señal en cada terminal diferencial es inferior en

más de 3 dB a la potencia de la señal en el terminal de un solo extremo porque la pérdida de inserción nunca es cero en un balun práctico.



**Figura 4-2:** Pérdida de inserción y desplazamiento de fase de un balun ideal. (a) Terminales de un balun. (b) Pérdida por inserción de un balun ideal.

Fuente: (Li, 2012, p. 549)

En las últimas décadas se han desarrollado una gran variedad de baluns de radiofrecuencia, entre los que más destacan son los de Transformador, LC y de línea Microstrip.

En la etapa de simulación del diseño de circuitos de RF, el balun de transformador ideal es un buen candidato para un bloque de transformación entre bloques de pares de un solo extremo y diferenciales. La mayor ventaja del balun de transformador es su respuesta en frecuencia con un ancho de banda casi infinito. Además, la pérdida de inserción del balun se puede ajustar a cero ya que es un balun ideal.

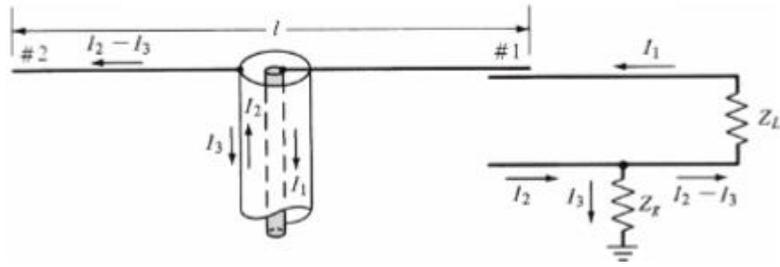
En la etapa de prueba, se recomiendan los baluns de LC y línea Microstrip. La mayor ventaja de un balun LC es su simplicidad: se puede implementar en un laboratorio de forma rápida y sencilla. Sorprendentemente, en lugar de una respuesta de banda estrecha, como cabría esperar, el balun de LC se comporta con una respuesta en frecuencia de banda razonablemente ancha. En comparación con el balun LC, la respuesta de frecuencia en un balun de línea de microstrip es más amplia. Además, su principal ventaja es su bajo costo, ya que sus partes básicas son las líneas de microstrip. De hecho, estos tres tipos de balun se han vuelto populares en el diseño de circuitos de RF, aunque también se pueden encontrar otros tipos en aplicaciones prácticas (Li, 2012, pp. 548,549).

### 2.3.1.1. Diferentes configuraciones de balun

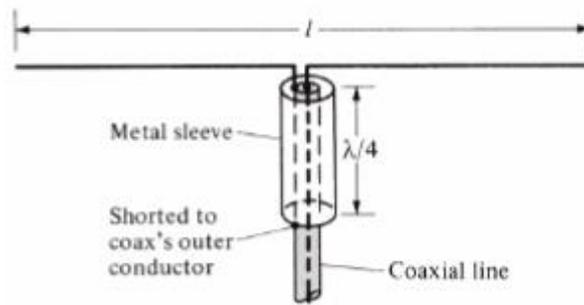
Un tipo de balun es el que se muestra en la Figura 5-2(b), referido generalmente como un balun de bazooka. Mecánicamente se requiere que una manga metálica de  $\lambda/4$  de largo, y en cortocircuito en un extremo, encapsula la línea coaxial. Eléctricamente, la impedancia de entrada en el extremo abierto de esta línea de transmisión en cortocircuito de  $\lambda/4$ , que es equivalente a  $Z_g$ , será muy grande (idealmente infinito). De esta manera, la corriente  $I_3$  se ahogará, si no se elimina por completo, y el sistema estará casi equilibrado.

Otro tipo de balun es el que se muestra en la Figura 5-2(c). Requiere que un extremo de una sección de una línea de transmisión se conecte al blindaje exterior de la línea coaxial principal mientras que el otro se conecta al lado del dipolo que está conectado al conductor central. Este balun se utiliza para cancelar el flujo de  $I_3$ . Su funcionamiento puede explicarse de la siguiente manera: En la Figura 5-2(a) los voltajes entre cada lado del dipolo y la tierra son iguales en magnitud, pero  $180^\circ$  fuera de fase, produciendo así un flujo de corriente en el exterior de la línea coaxial. Si las dos corrientes  $I_1$  y  $I_2$  son iguales en magnitud,  $I_3$  sería cero. Puesto que el brazo #2 del dipolo está conectado directamente al blindaje del coaxial mientras que el brazo #1 está débilmente acoplado a él, produce una corriente mucho mayor  $I_2$ . Por lo tanto, hay relativamente poca cancelación en las dos corrientes (Balanis, 2016, p. 522).

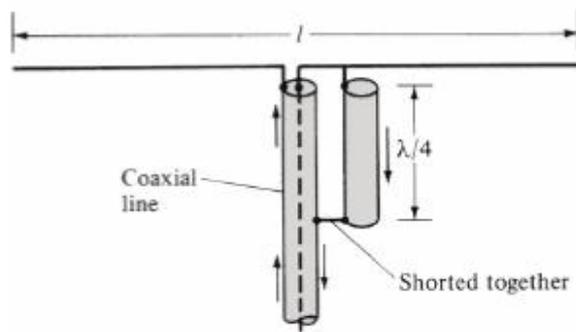
Las dos corrientes,  $I_1$  y  $I_2$ , se pueden igualar en magnitud si el conductor central del coaxial se conecta directamente al blindaje exterior. Si esta conexión se realiza directamente en los terminales de la antena, la línea de transmisión y la antena se cortocircuitarían, eliminando así cualquier radiación. Sin embargo, la conexión indirecta de conductores paralelos de la Figura 5-2(c) proporciona la cancelación de corriente deseada sin eliminar la radiación. El flujo de corriente en el escudo exterior de la línea principal se cancela en el extremo inferior de la sección  $\lambda/4$  (donde los dos se unen) por la corriente igual en magnitud, pero en desfase, en la sección  $\lambda/4$  de



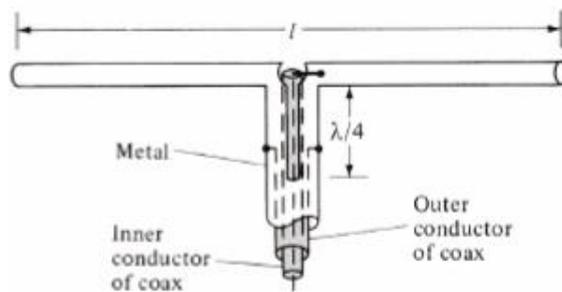
a) Línea coaxial desbalanceada



b) Balun Bazooka (1:1)



c) Balun coaxial  $\lambda/4$  (1:1)



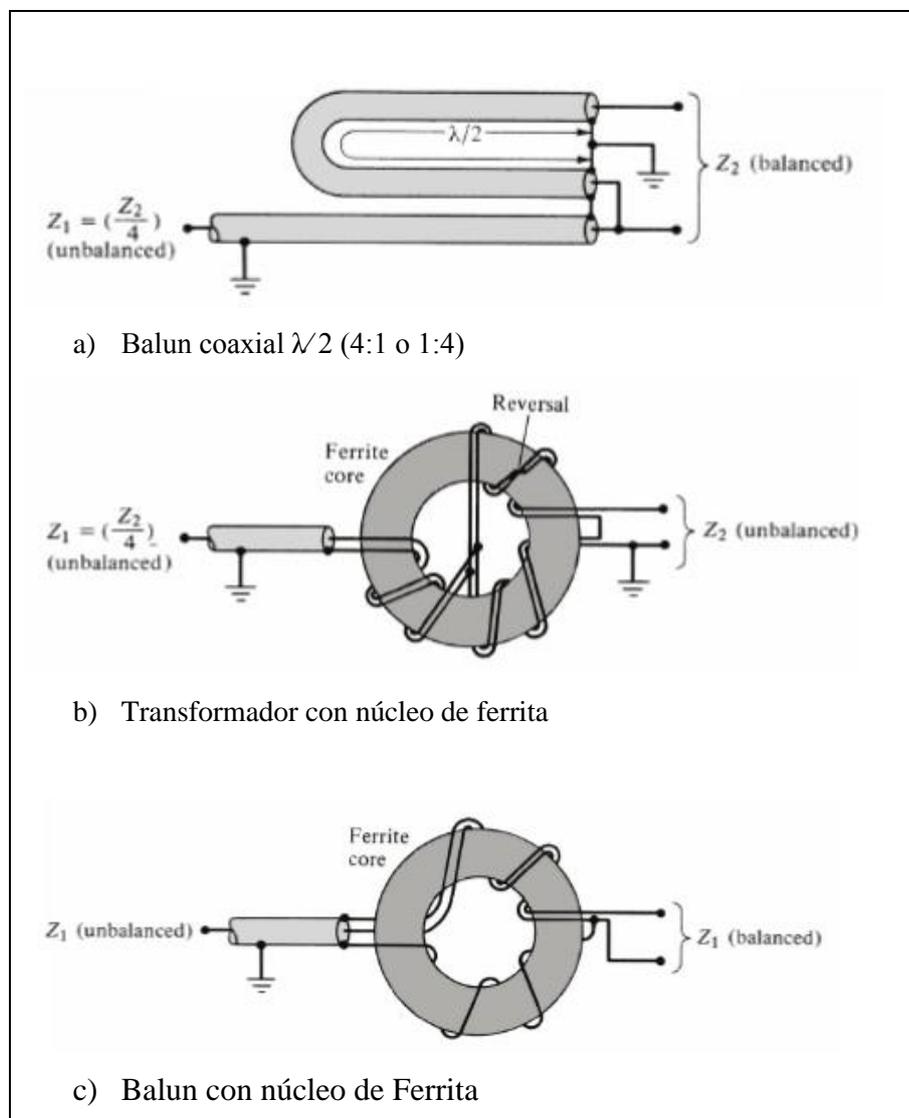
d) Balun coaxial (1:1)

**Figura 5-2:** Diferentes configuraciones de baluns

Fuente: (Balanis, 2016, p. 522)

la línea auxiliar. Idealmente, entonces no hay flujo de corriente en la superficie exterior del blindaje exterior de la parte restante de la línea coaxial principal. Cabe destacar que no es necesario realizar la línea auxiliar paralela  $\lambda/4$  de longitud para conseguir el equilibrio. Se realiza  $\lambda/4$  para evitar que se altere el funcionamiento normal de la antena (Balanis, 2016, p. 522).

Una construcción compacta del balun en la Figura 5-2(c) es la de la Figura 5-2(d). El manguito metálico exterior está partido y una parte de él se retira por los lados opuestos. Las partes opuestas restantes de la manga exterior representan eléctricamente las dos líneas de transmisión en cortocircuito  $\lambda/4$  líneas de transmisión paralelas de la Figura 5-2(c). Todos los baluns mostrados en la Figura 5-2 son dispositivos de banda estrecha.



**Figura 6-2:** Balun y transformadores con núcleo de ferrita

Fuente: (Balanis, 2016, p. 523)

Se pueden construir dispositivos que proporcionen no sólo el equilibrio sino también transformaciones de impedancia de aumento. Uno de estos dispositivos es el balun coaxial  $\lambda/4$ , con una transformación de impedancia 4:1, de la Figura 6-2(a). La sección en forma de U de la línea coaxial debe ser  $\lambda/2$  de largo (Balanis, 2016, p. 522).

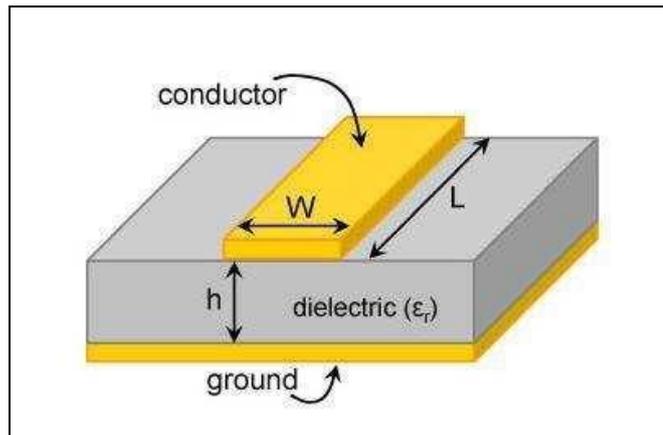
Debido a que todos los transformadores de impedancia de los baluns que se han mostrado hasta ahora son dispositivos de banda estrecha, el ancho de banda puede aumentarse empleando núcleos de ferrita en su construcción. Dos de estos diseños, uno un transformador 4:1 o 1:4 y el otro un balun 1:1, se muestran en las Figuras 6-2(b)(c). El núcleo de ferrita tiene una tendencia a mantener altos niveles de impedancia en un amplio rango de frecuencias. Un buen diseño y construcción puede proporcionar anchos de banda de 8 o incluso 10 a 1. Los baluns coaxiales en espiral, contruidos enrollando la propia línea coaxial para formar un balun, pueden proporcionar anchos de banda de 2 ó 3 a 1 (Balanis, 2016, p. 523).

## **2.4. TECNOLOGÍAS DE CIRCUITOS DE MICROONDAS**

Mucho del equipo de comunicación moderno tiene por lo menos una forma de circuito impreso de microondas. Además, casi todos los dispositivos eléctricos tienen una placa de circuito impreso (PCB), que puede ser clasificada como una contraparte de baja frecuencia de un circuito impreso de microondas, aunque con la demanda cada vez mayor de velocidad de la señal, la frontera entre estos dos se ha ido difuminando constantemente en algunas aplicaciones. Una vez concebidos como un medio de transporte de señales entre componentes de circuitos, los circuitos impresos de microondas se renuevan continuamente para mantenerse al día con la tecnología (Kinayman, 2005, p. 141).

### **2.4.1. Tecnología Microstrip**

Una línea de microstrip típica se forma usando un conductor superior en una capa dieléctrica con un solo plano de tierra y aire por encima, como se muestra en la Figura 7-2. El conductor superior es básicamente una lámina metálica en forma de rectángulo estrecho, y el plano de tierra es típicamente un plano metálico continuo. La lámina superior y la placa de tierra forman un sistema de línea de transmisión de dos conductores; las corrientes que fluyen por la lámina superior regresan a la fuente a través de la placa de tierra, completando el circuito. Debido a que las capas dieléctricas en la parte superior e inferior de la lámina son diferentes, la microstrip es una estructura no homogénea (Kinayman, 2005, p. 144).



**Figura 7-2:** Una línea de microstrip impresa en un sustrato dieléctrico.

**Fuente:** (Hoyos Nogués, 2009, p. 48)

La geometría de una línea de microstrip se muestra en la Figura 8-2(a). Un conductor de ancho  $W$  se imprime sobre un sustrato dieléctrico delgado y conectado a tierra de espesor  $d$  y permitividad relativa  $\epsilon_r$ ; en la Figura 8-2(b) se muestra un esquema de las líneas de campo.

Si el sustrato dieléctrico no estuviera presente ( $\epsilon_r = 1$ ), tendríamos una línea de dos hilos consistente en un conductor de banda plana sobre un plano de tierra, incrustado en un medio homogéneo (aire). Esto constituiría una línea de transmisión TEM simple con velocidad de fase  $v_p = c$  y constante de propagación  $\beta = k_0$ .

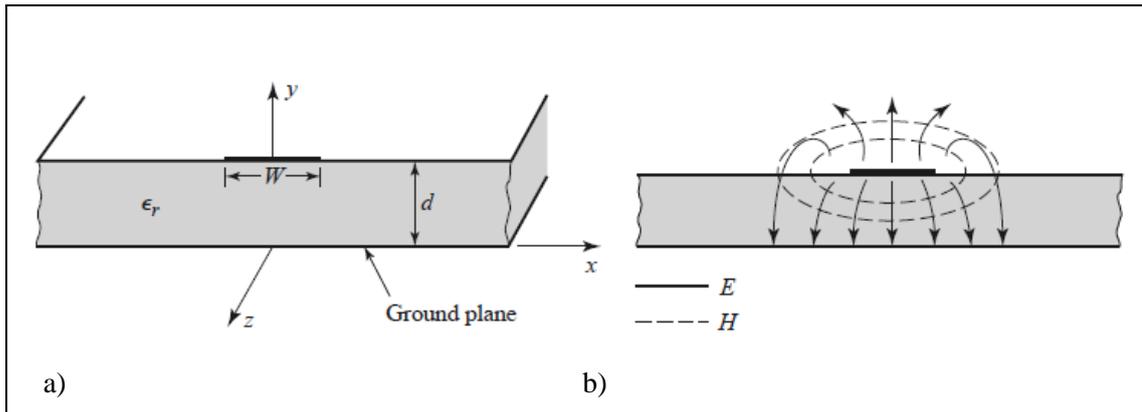
La presencia del dieléctrico, en particular, el hecho de que el dieléctrico no llena el por encima de la tira ( $y > d$ ), complica el comportamiento y el análisis de la línea microstrip. A diferencia de la stripline, donde todos los campos están contenidos dentro de una región dieléctrica homogénea, microstrip tiene algunas (normalmente la mayoría) de sus líneas de campo en la región dieléctrica entre la tira y el plano de tierra y alguna fracción en la región del aire por encima del sustrato. Para esta razón la línea de microstrip no puede soportar una onda TEM pura ya que la velocidad de fase de los campos TEM en la región dieléctrica serían  $c/\sqrt{\epsilon_r}$ , mientras que la velocidad de fase de los campos TEM en la región del aire sería  $c$ , por lo que una condición de emparejamiento de fase en la interfaz dieléctrico-aire sería imposible de hacer cumplir (Pozar, 2012, p. 147).

En la actualidad, los campos exactos de una línea de microstrip constituyen una onda híbrida TM-TE y requieren técnicas de análisis más avanzadas de las que se van a realizar aquí. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, sin embargo, el sustrato dieléctrico es eléctricamente muy delgado ( $d \ll \lambda$ ), y por eso los campos son cuasi-TEM. En otras palabras, los campos son esencialmente los mismos que aquellos de la carcasa estática (DC). Así, buenas aproximaciones para la velocidad de fase, constante de propagación, y la impedancia característica pueden obtenerse a

partir de soluciones estáticas o cuasiestáticas. Entonces la velocidad de fase y la constante de propagación pueden expresarse como:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad \text{Ecuación 2-2}$$



**Figura 8-2:** Línea de transmisión microstrip. (a) Geometría. (b) Campo eléctrico y magnético.

Fuente: (Pozar, 2012, p. 147)

donde  $\epsilon_e$  es la constante dieléctrica efectiva de la línea microstrip. Debido a que algunas de las líneas de campo están en la región dieléctrica y otras en el aire, la constante dieléctrica efectiva satisface la relación:

$$1 < \epsilon_e < \epsilon_r$$

y depende de la constante dieléctrica del sustrato, el espesor del sustrato, el ancho del conductor y la frecuencia (Pozar, 2012, p. 147).

#### 2.4.2. Baluns Microstrip

En el rango bajo de RF, la aplicación de líneas microstrip en el diseño de circuitos está restringida por su tamaño. En el alto rango de RF, sin embargo, la aplicación de líneas microstrip está recibiendo más y más atención cada año. Una línea de microstrip puede reemplazar piezas individuales, como inductores y condensadores, e incluso una simple red. Por ejemplo, en muchos

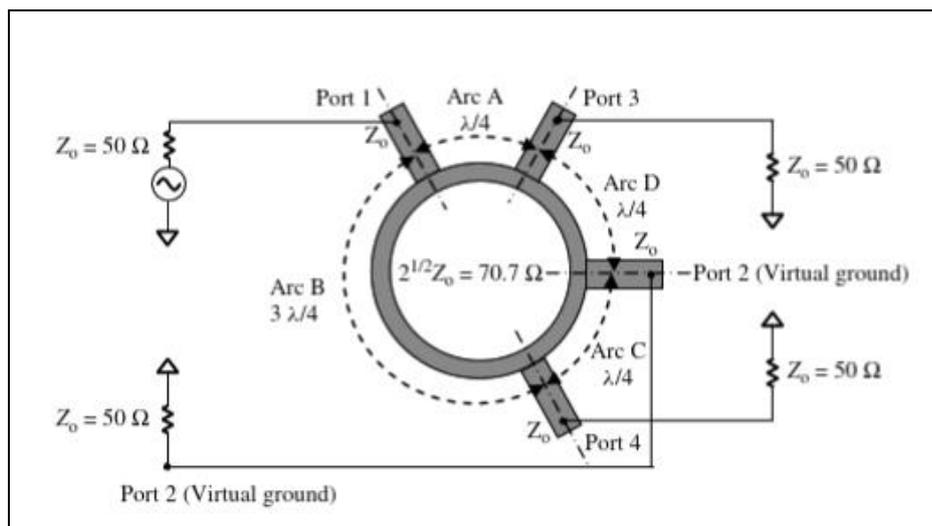
bloques de circuitos de RF como el LNA o el PA, la recomendación es implementar todas las redes de adaptación de impedancia de entrada y salida por medio de líneas microstrip porque:

- En general, el modelo de simulación de una línea de microstrip es más preciso que el de las partes discretas;
- La tolerancia de una línea de microstrip es más fácil de controlar que la de otras partes;
- Lo más importante es que la aplicación de la línea de microstrip es la más rentable, especialmente en el diseño de módulos de RF o en el diseño de bloques de RF de piezas discretas (Li, 2012, p. 580).

En las últimas décadas se han desarrollado muchos baluns del tipo de línea microstrip. Sería imposible describirlos todos. En su lugar, se muestra un ejemplo a continuación.

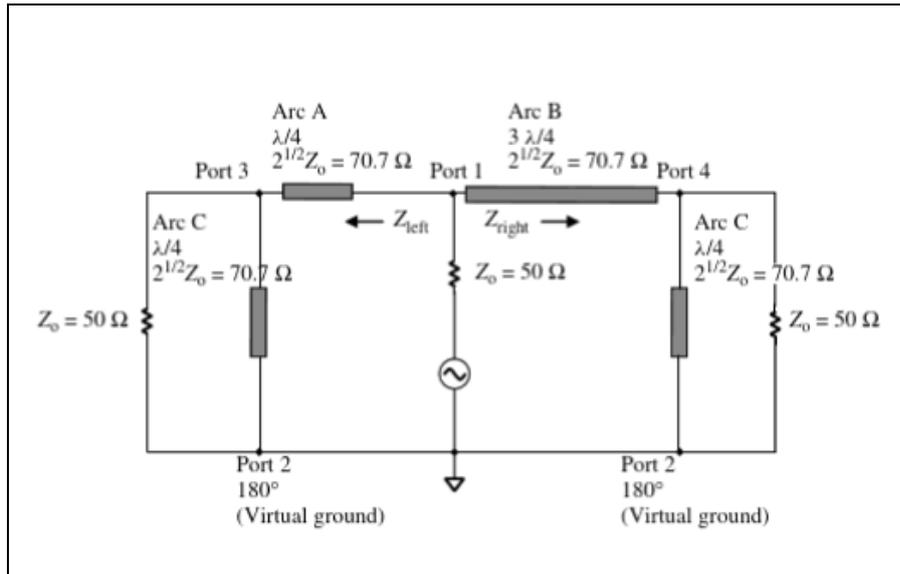
#### 2.4.2.1. Balun de anillo

El balun de línea de microstrip de anillo es un balun simple pero sofisticado aplicado en el rango de frecuencia desde UHF hasta decenas de gigahertz. Es una parte importante en el diseño de circuitos de RF o en las pruebas de bloques de RF. Como se muestra en la Figura 9-2, el cuerpo principal del balun de la línea de microstrip de anillo es un anillo metálico en el PCB en un diseño de módulo de RF o en el sustrato de IC en un chip de IC.



**Figura 9-2:** Esquema de un balun de línea microstrip de anillo.

**Fuente:** (Li, 2012, p. 581)



**Figura 10-2:** Circuito equivalente de un balun de línea de microstrip de anillo

Fuente: (Li, 2012, p. 581)

La circunferencia del anillo es igual a 1,5 veces la longitud de onda de la longitud eléctrica, y su anchura debe elegirse de modo que su impedancia caracterizada sea igual a  $2^{1/2}Z_0$ . La impedancia caracterizada de las cuatro cintas debe ser igual a la impedancia de origen o de carga  $Z_0 = 50 \Omega$ . El arco del anillo es de un cuarto de longitud de onda desde el puerto 1 al puerto 3, del puerto 3 al puerto 2 y del puerto 2 al puerto 4, pero tiene tres cuartos de longitud de onda desde el puerto 4 al puerto 1. Si se elige el puerto 1 como puerto de entrada de un solo extremo, entonces el puerto 2 es una conexión a tierra virtual porque está a una distancia de media longitud de onda del puerto 1. Los puertos 3 y 4 se asignan como los dos puertos diferenciales. La Figura 10-2 muestra su circuito equivalente (Li, 2012, p. 580)

- El puerto 2 es una tierra virtual.
- La impedancia que se mira desde el puerto 3 hacia el puerto 2 es:

$$Z_3 = Z_0 = 50 \Omega \quad \text{Ecuación 3-2}$$

donde  $Z_3$  = la impedancia que se mira desde el puerto 3 hacia el puerto 2, porque el arco d es un cuarto de la longitud de onda desde el puerto 2 conectado a tierra virtual, de modo que su impedancia es infinita.

- La impedancia que se mira desde el puerto 4 hacia el puerto 2 es:

$$Z_4 = Z_0 = 50 \Omega \quad \text{Ecuación 4-2}$$

donde  $Z_4$  = la impedancia que se mira desde el puerto 4 hacia el puerto 2, porque el arco c es un cuarto de la longitud de onda desde el puerto 2 conectado a tierra virtual, de modo que su impedancia es infinita (Li, 2012, p. 581).

- La impedancia que se mira desde el puerto 1 hacia el arco a o arco b es:

$$Z_a = Z_b = 2Z_0 = \frac{(2^{1/2}Z_0)^2}{Z_0} = 100 \Omega \quad \text{Ecuación 5-2}$$

porque el arco a y el arco b son múltiplos impares de cuartos de longitud de onda, donde:

$Z_a$  = la impedancia mirando del puerto 1 hacia el arco a

$Z_b$  = la impedancia mirando del puerto 1 hacia el arco b, y

$2^{1/2}Z_0$  = la impedancia característica de la línea microstrip

- La impedancia que se mira hacia afuera desde el puerto 1 es:

$$Z_1 = Z_a // Z_b \quad \text{Ecuación 6-2}$$

de la Ecuación 6-1, se tiene:

$$Z_1 = Z_0 = 50 \Omega \quad \text{Ecuación 7-2}$$

Por lo tanto, la impedancia que se mira del puerto 1 hacia el anillo coincide con la impedancia de la fuente  $Z_0$ . En relación con el puerto virtual 2 de puesta a tierra, el desplazamiento de fase en el puerto 1 es de  $180^\circ$ . El desplazamiento de fase en el puerto 3 desde el puerto de tierra virtual 2 debe ser  $90^\circ$  porque la longitud del arco a es un cuarto de longitud de onda desde el puerto 1, mientras que el desplazamiento de fase en el puerto 4 desde el puerto de tierra virtual 2 es  $90^\circ$  o  $270^\circ$  porque la longitud del arco b es un cuarto de longitud de onda desde el puerto 2 pero tres cuartos de longitud de onda desde el puerto 1.

El balun de línea de microstrip de anillo es también llamado balun rat-race. Es un balun de banda estrecha, con un ancho de banda relativo generalmente inferior al 15%. Se ha empleado ampliamente en el desarrollo de teléfonos celulares y otros sistemas de comunicación en la actualidad (Li, 2012, p. 582).

### **2.4.3. Tecnología MMIC**

El acrónimo MMIC significa circuito integrado monolítico de microondas. La palabra monolítica (del griego) significa "como una sola piedra" y describe la característica fundamental de las MMIC (es decir, que se fabrican a partir de una sola pieza de material semiconductor). La palabra microondas se refiere a la gama de frecuencias de la señal de CA dentro de la cual se utilizan, que cubre longitudes de onda en el espacio libre de 1 mm a 1 m y corresponde a frecuencias de 300 MHz a 300 GHz. El término circuito integrado (CI) indica que el material semiconductor no contiene un solo diodo o transistor, sino que consiste en un circuito electrónico de dispositivos activos, como transistores, y dispositivos pasivos, como condensadores y resistencias, junto con todas sus interconexiones, para formar un sistema completo.

Los MMIC se utilizan en la mayoría de las aplicaciones que implican la transmisión y recepción de señales de microondas, desde teléfonos celulares, redes inalámbricas de área local (WLAN) y receptores del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el extremo de bajos gigahercios hasta radiómetros de observación de la Tierra y escáneres de seguridad en el extremo de cientos de gigahercios. Tienen aplicaciones en la industria de las comunicaciones dentro de la fibra óptica, comunicaciones por satélite y enlaces punto a punto; en la industria automotriz dentro del peaje automático, identificación vehicular, información sobre el tráfico rodado y sistemas de control de cruceros; y en la industria militar, en el marco de la guerra electrónica, los cabezales de búsqueda de misiles y los sistemas de radar en serie escalonada (Marsh, 2006, pp. 2,3).

#### **2.4.3.1. Estructura MMIC**

La estructura MMIC de GaAs (Arseniuro de Galio) consiste en un sustrato semiconductor: la cara posterior está totalmente metalizada, mientras que todas las diferentes capas necesarias para la realización de los elementos del circuito están depositadas en la parte superior. La realización de una geometría adecuada en las diferentes capas superpuestas (que pueden ser materiales conductores, aislantes, resistivos o dopantes) produce el elemento de circuito deseado. Las reglas de disposición imponen restricciones a la geometría, con el fin de mantener la producción compatible con el proceso de fabricación.

La fábrica que produce MMICs toma el nombre de fundición. El diseñador MMIC puede ser interno o externo a la fundición: en ambos casos opera siguiendo la información sobre la

geometría y los modelos eléctricos de los distintos elementos MMIC, que están escritos en un documento conocido como el manual de fundición (Bianchi, G. & Sorrentino, 2010, p. 640).

#### 2.4.3.2. *Ventajas de la tecnología MMIC*

Los MMIC surgieron porque combinaban transistores de microondas de alto rendimiento con componentes pasivos de baja pérdida y líneas de transmisión y podían formarse como circuitos complejos con múltiples interconexiones utilizando sólo unos pocos pasos de proceso fotolitográfico.

La respuesta de frecuencia de microondas de los transistores también requería que sus dimensiones estuvieran en el orden de los micrones, de modo que el tamaño resultante de los chips fuera de sólo unos pocos milímetros, lo cual es un orden de magnitud menor que el circuito integrado híbrido equivalente de microondas (MIC) de los transistores empaquetados montados sobre sustratos de alúmina.

Las pequeñas dimensiones de las MMIC también significan que tienen un orden de magnitud menor que su equivalente MICs híbridos. Estas dos características de los MMIC los hacen ideales para aplicaciones electrónicas móviles, como teléfonos móviles y ordenadores portátiles, donde la miniaturización y la ligereza son una gran ventaja comercial.

La fiabilidad de las MMIC, aunque siempre es un problema con los nuevos dispositivos sobre nuevos materiales semiconductores, es bien conocida en Si y GaAs, y muchos de los procesos de MMICs y MMIC tienen niveles de fiabilidad tan altos que han sido calificados para aplicaciones espaciales. La naturaleza monolítica y robusta de los MMIC, junto con su pequeño tamaño y peso, los convierte en componentes esenciales para los equipos espaciales.

Su bajo costo también puede ser una ventaja, ya que cuestan un tercio más que el circuito híbrido equivalente, pero esto no siempre está claro en todas las aplicaciones. El alto costo de funcionamiento de una instalación de fabricación de semiconductores significa que el procesamiento de un lote de placas es costoso, y si se utiliza para fabricar sólo un puñado de chips, entonces cada uno de ellos es muy caro.

La ventaja de bajo costo de los MMIC sólo se garantiza cuando se requiere un gran número de chips, y el diseño produce un circuito de alto rendimiento (Marsh, 2006, p. 7).

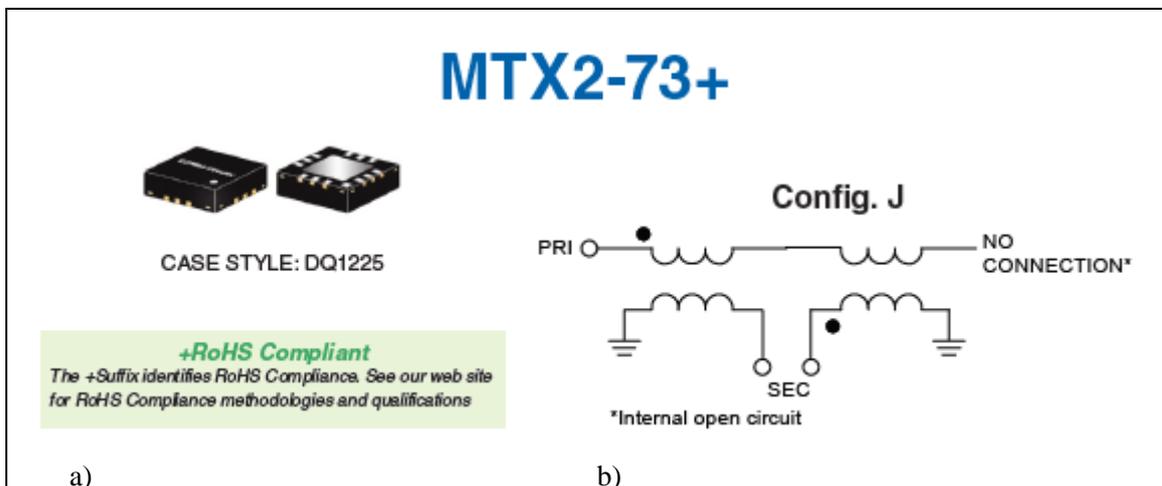
## 2.4.4. Baluns MMIC

### 2.4.4.1. Balun MTX2-73+

MTX2-73+ (Ver Figura 11-2) es un balun transformador MMIC de banda ancha con una relación de impedancia de 2:1 que cubre una amplia gama de frecuencias desde 2 hasta 7 GHz. Este modelo proporciona excelente repetibilidad con baja pérdida de inserción, bajo desbalance de amplitud, bajo desbalance de fase (Ver Figura 12-2) y manejo de potencia de entrada de RF de hasta +34 dBm (2,5W). La unidad viene alojada en un diminuto paquete QFN de 3 x 3 x 0.89mm con baja inductancia, excelente eficiencia térmica y alta clasificación ESD (Descarga electrostática) (MTX2-73+\_dashboard, 2014).

El dispositivo cuenta con certificado +RoHS (Restriction of Hazardous Substances) lo cual se refiere a que restringe ciertas sustancias peligrosas en componentes electrónicos haciéndolo amigable con el medio ambiente. Algunas de sus aplicaciones son:

- WLAN
- WiMAX
- WIBRO
- ISM
- RADAR



**Figura 11-2:** (a) Balun Transformador MMIC MTX2-73+ (b) Circuito abierto interno.

Fuente: (MTX2-73+\_dashboard, 2014)

A continuación, en la Tabla 3-2 se presentan las especificaciones eléctricas de trabajo a 25 °C de acuerdo con las frecuencias de 2 GHz hasta los 7 GHz.

**Tabla 3-2:** Especificaciones eléctricas MTX2-73+

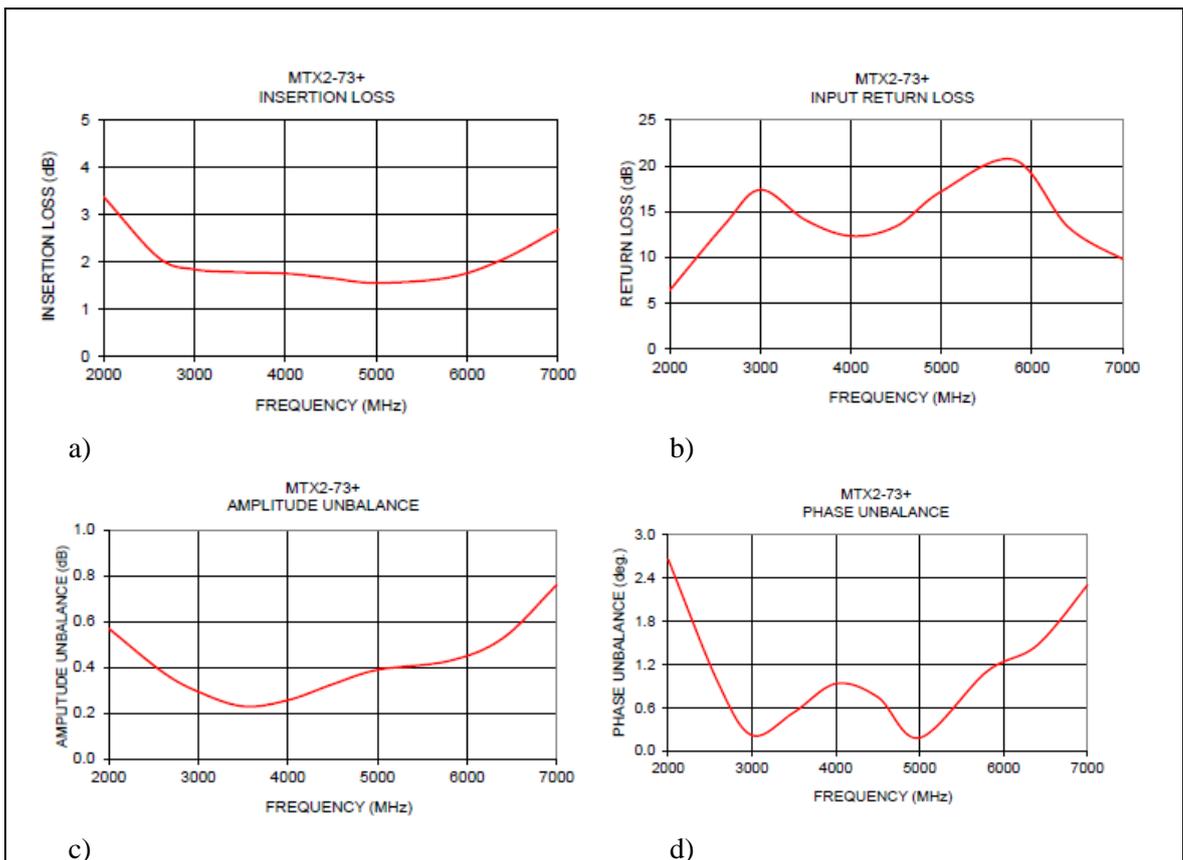
Parámetro	Frecuencia (Mhz)	Min.	Typ.	Max.	Unidad
Radio de impedancia (secundario/primario)			2		
Rango de frecuencia		2000		7000	MHz
Perdidas por inserción. 1	2600-6000	-	0.6	1.0	db
	2000-7000		1.9	2.3	
Desbalance de amplitud	2600-6000	-	0.5	0.9	db
	2000-7000		0.8	1.2	
Desbalance de fase. 2	2600-6000	-	3	5	Grados
	2000-7000		4	7	

1. La pérdida por inserción se refiere a la pérdida en la banda media, 1,5 dB.

2. Relativo a 180°

Fuente: (MTX2-73+\_dashboard, 2014)

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

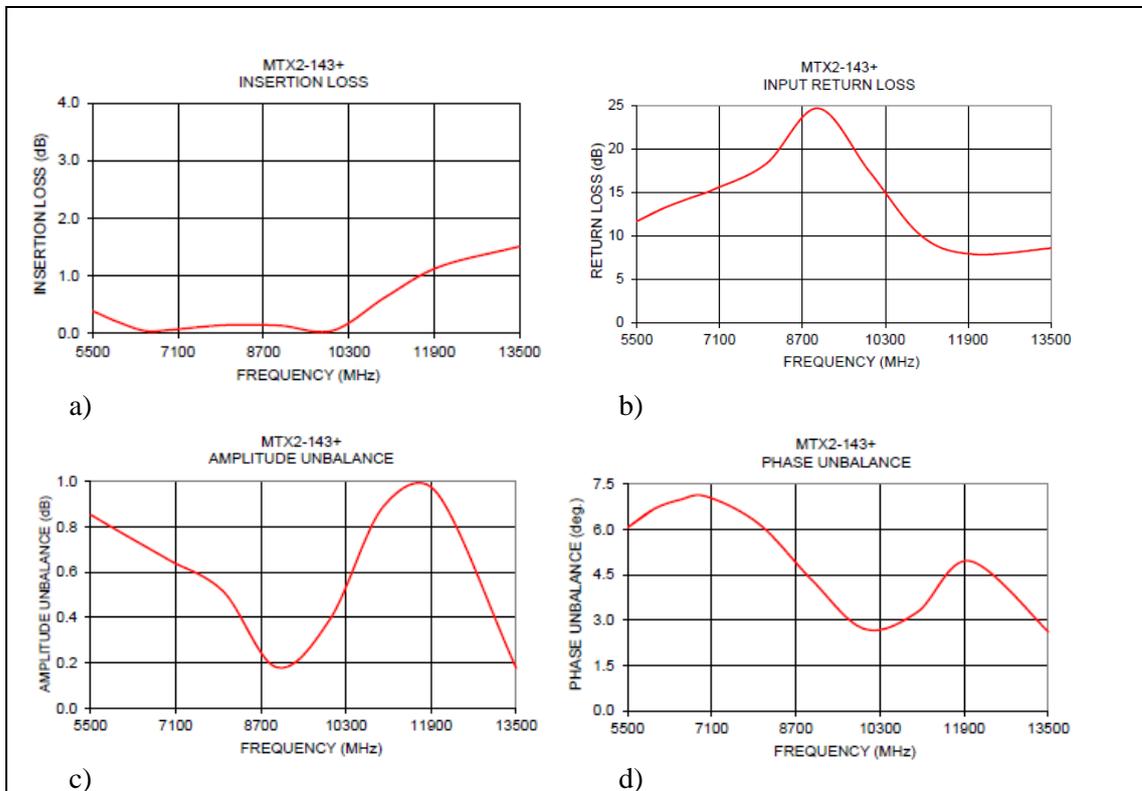


**Figura 12-2:** Datos de rendimiento típicos a 25°C de MTX2-73+ (a) pérdidas por inserción (b) pérdidas de retorno en la entrada (c) desbalance de amplitud (d) desbalance de fase.

Fuente: (MTX2-73+\_dashboard, 2014)



En la Tabla 4-2 se presentan las especificaciones eléctricas de trabajo a 25 °C de acuerdo con las frecuencias de 5.5 GHz hasta los 13.5 GHz.



**Figura 14-2:** Datos de rendimiento típicos a 25°C de MTX2-143+ (a) pérdidas por inserción (b) pérdidas de retorno en la entrada (c) desbalance de amplitud (d) desbalance de fase.

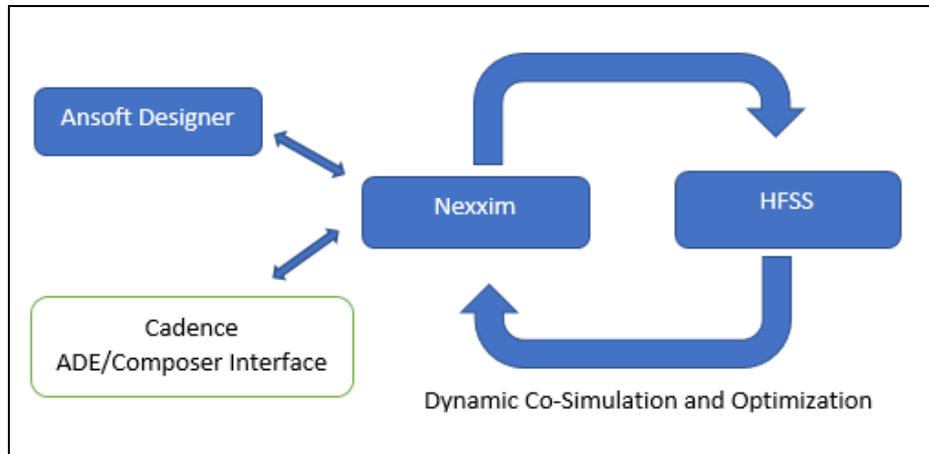
Fuente: (MTX2-143+\_dashboard, 2014)

## 2.5. ANSOFT DESIGNER

Ansoft Designer integra tecnologías de simulación como el simulador de circuitos Nexxim y el simulador de campo electromagnético HFSS 3D (Ver figura 15-2), utilizando Solver on Demand. Esta capacidad de co-simulación dinámica y parametrizada permite lograr diseños óptimos de manera auto-interactiva. La integración se logra no a través de una rígida jerarquía descendente que limita a los diseñadores, sino a través de mecanismos de reconocimiento que permiten a los diseñadores aplicar su creatividad y habilidad para desarrollar soluciones rentables y de alto rendimiento.

Para la verificación analógica / RFIC de alto rendimiento, Ansoft Designer complementa las herramientas existentes de diseño de paquetes IC y diseño avanzado de paquetes con sus soluciones electromagnéticas planas integradas y su simulación dinámica y parametrizada con HFSS y Nexxim. Se puede crear modelos precisos de pasivos en chip e interconexiones de

placa/paquete, combinarlos con circuitos analógicos detallados y simular las verdaderas interacciones entre dispositivos activos no lineales y parásitos pasivos a altas frecuencias (Worm, 2007, p. 3)



**Figura 15-2:** Interacción de las tecnologías de simulación incluidas en Ansoft Designer

Fuente: (Worm, 2007, p. 3).

### 2.5.1. Gestión de diseño

- Gestión de diseño de front-end para las mejores tecnologías de simulación, a saber, simulación de circuito Nexxim y HFSS, Q3D Extractor y SIwave para co-simulación electromagnética paramétrica.
- Validación de diseño con comprobación de reglas de diseño con guión.
- Solver on Demand proporciona simulación de circuito / sistema / EM que incluye HFSS, Q3D Extractor y SIwave con autogeneración de puertos.
- Post-procesamiento integrado de resultados, incluyendo impedancias de Smith Chart diagramas espectrales, diagramas de ojo y diagramas de parámetros de barrido 3D.
- Optimización del diseño, el ajuste y el análisis de parámetros de barrido.
- Análisis estadístico, de sensibilidad y rendimiento.
- Las utilidades de diseño incluyen la combinación de herramientas smith matching y la calculadora de la línea de transmisión vinculada a la simulación EM.

### 2.5.2. Sistema / Planar EM Simulación y verificación del diseño

- 3D planar EM (método de Momentos) proporciona una co-simulación paramétrica dinámica para el parámetro S, Y y Z directo, y extracción SPICE de onda completa, análisis de radiación de campo cercano y lejano.

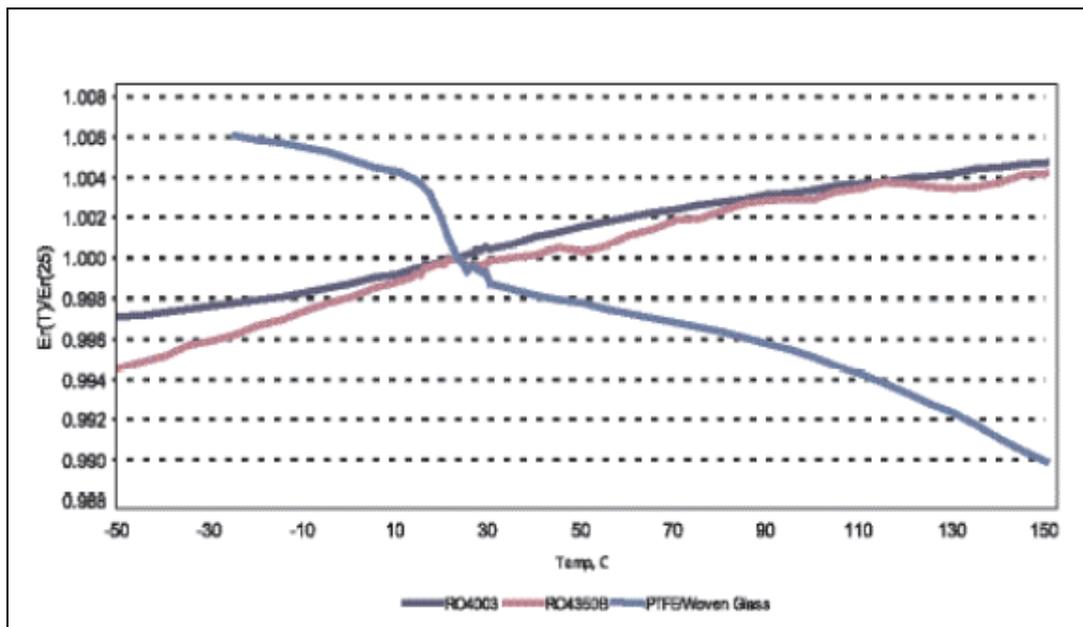
- Simulación del sistema (dominios de tiempo, frecuencia y mixtos), los bancos de prueba aplican formas de onda de banda base para simular métricas de comunicación como ACPR, EVM, BER y diagramas de ojo (Worm, 2007, pp. 3,4).

## 2.6. MATERIALES Y EQUIPOS

### 2.6.1. Materiales

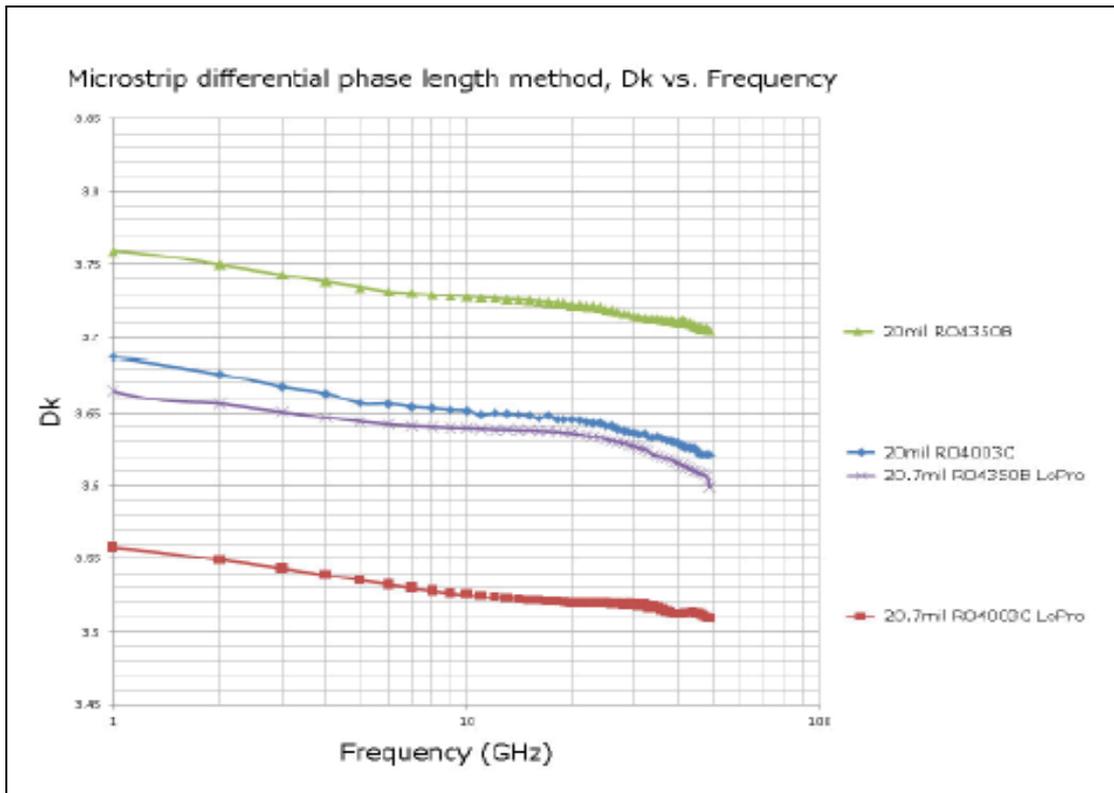
#### 2.6.1.1. Roger RO4000® Series

Los laminados cerámicos de hidrocarburo RO4000® están diseñados para ofrecer un rendimiento superior en alta frecuencia y fabricación de circuitos de bajo coste. El resultado es un material de baja pérdida que puede fabricarse utilizando procesos estándar de epoxi/vidrio (FR-4) ofrecidos a precios competitivos. La selección de laminados típicamente disponible para los diseñadores se reduce significativamente una vez que las frecuencias de operación aumentan a 500 MHz y más. El material RO4000 posee las propiedades que necesitan los diseñadores de circuitos de microondas de radiofrecuencia y redes de adaptación y líneas de transmisión de impedancia controlada. El coeficiente de temperatura del dieléctrico está entre las más bajas de cualquier material de placa de circuito impreso (Figura 16-2), y el dieléctrico es estable en una amplia gama de frecuencias (Figura 17-2). Esto lo convierte en un sustrato ideal para aplicaciones de banda ancha (Rogers Corporation, 2015a).



**Figura 16-2:** Materiales de la serie RO4000 constante dieléctrica vs. temperatura

Fuente: (Rogers Corporation, 2015a)



**Figura 17-2:** Materiales de la serie RO4000 constante dieléctrica vs. Frecuencia

**Fuente:** (Rogers Corporation, 2015a)

Rogers Corporación ha realizado una evaluación de la pérdida por inserción de una línea de transmisión de microstrip en varios materiales. Los materiales seleccionados van desde el FR4 estándar (epoxi disfuncional) hasta los laminados más sofisticados a base de PTFE (GX y RO3003™). El objetivo de la evaluación fue cuantificar las pérdidas en los circuitos de los distintos tipos de materiales. Esto permitiría comprender mejor las limitaciones de frecuencia de cada tipo de material (Rogers Corporation, 2015b). Los materiales seleccionados con sus constantes dieléctricas se presentan en la Tabla 5-2.

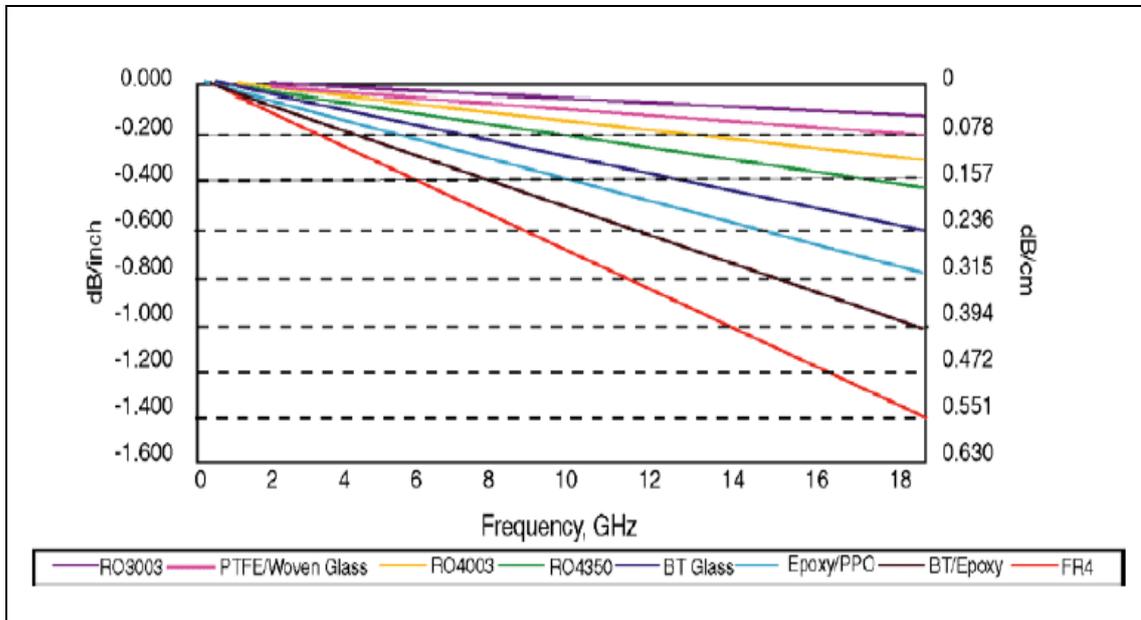
**Tabla 5-2:** Materiales de grado comercial para aplicaciones de microondas

Material	$\epsilon_r$
RO3003™ (PTFE/ceramic)	3.0
GX (PTFE/woven glass)	2.4 - 2.6
RO4003C™ (Hydrocarbon/woven glass)	3.38
BT	3.7 - 3.9
Epoxy/PPO	3.95
BT/Epoxy	4.0
FR4 (Difuncional Epoxy)	4.5

**Fuente:** (Rogers Corporation, 2015b)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

En el análisis realizado de las diversas mediciones resultantes para obtener una caracterización lineal de las pérdidas por inserción frente a la frecuencia, se puede observar en la Figura 18-2 los datos para los seis materiales a varias frecuencias.



**Figura 18-2:** Datos medidos de pérdidas por inserción de microstrip (en orden de menor pérdida a mayor pérdida)

**Fuente:** (Rogers Corporation, 2015b)

El material RO4003C proporciona pérdidas comparables a las del material RO3003 y GX. Es evidente un gran aumento de las pérdidas al pasar al siguiente material, el vidrio BT. El material con más pérdidas es el FR4 (epoxi disfuncional), con 4,5 veces más pérdidas que el laminado RO4003C. En general, cuando se selecciona un material durante las etapas de diseño, se toma en cuenta los problemas como:

- Control de  $\epsilon_r$
- Pérdidas del material
- Estabilidad térmica eléctrica y mecánica
- Fabricabilidad y
- Costo, para reducir el tiempo de ciclo del diseño.

En la actualidad hay muchos materiales que están siendo evaluados para aplicaciones comerciales de alta frecuencia, pero una vez que el rendimiento y el costo son evaluados, las opciones se reducen a unos pocos, RO3003, GX y RO4003C entre ellos. Los materiales RO4003C no sólo proporcionan las características eléctricas necesarias, sino que también pueden fabricarse con procesos estándar de epoxi/vidrio, lo que reduce los costes de fabricación. En general, los

materiales RO4003C combinan las mejores propiedades eléctricas con facilidad de fabricación a un coste competitivo para aplicaciones comerciales (Rogers Corporation 2015b).

### 2.6.1.2. Conector SMA

El conector de tramo final de la Figura 19-2 se debe conectar a la tarjeta de circuito impreso insertando el borde de la placa entre las patas y luego soldar, el conductor central se debe soldar en la parte del diseño de la señal de la placa y los demás conductores a tierra. Para un rendimiento óptimo de alta frecuencia, la transición del conector a la placa de circuito debe ajustarse para un VSWR bajo.



**Figura 19-2:** Conector de tramo final SMA hembra - Contacto Redondo

**Fuente:** (Johnson Components, 2016, p. 5)

**Tabla 6-2:** Dimensiones de referencia para conectores de tramo final de SMA hembra - Contacto Redondo

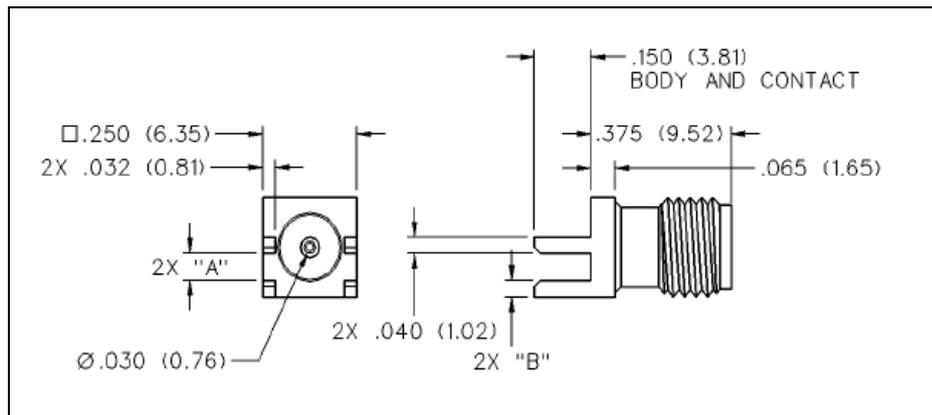
<b>VSWR &amp; Rango de frecuencia</b>	<b>Espesores de la placa</b>	<b>Bañado en oro</b>	<b>Niquelado</b>	<b>"A"</b>	<b>"B"</b>
VSWR: N/A 0-18 GHz	0.62 (1.57)	142-0701-851	142-0701-856	0.68 (1.73)	0.83 (2.11)
	0.42 (1.07)	142-0701-841	142-0701-846	0.48(1.22)	0.103 (2.62)
	0.47 (1.19)	142-0711-881	142-0711-886	0.53 (1.35)	0.098 (2.24)

**Fuente:** (Johnson Components, 2016, p. 5)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

Para compensar la transición de coaxial a microstrip, los anchos de "A" y "B" que se muestran en la Figura 20-2, deben ajustarse en función del espesor de la placa de circuito impreso. Cuando se ajusta correctamente, esta técnica produce un VSWR bajo en un ancho de banda amplio. Se

determinan las dimensiones del conector y de la placa experimentalmente para lograr un bajo VSWR (normalmente menos de 1,5 hasta 18 GHz). La placa de circuito utilizada para calcular los valores de la Tabla 6-2 es FR4 de doble cara con 1 oz. de cobre por ambos lados. El cobre que se deja en la parte inferior de la placa es para crear un plano de tierra para la estructura de microstrip de 50 Ohm. Dichas dimensiones son información de referencia para conectores de tramo final de SMA. Otros ajustes pueden ser necesarios dependiendo de la aplicación. Todas las dimensiones están expresadas en pulgadas (Johnson Components, 2016, p. 2).



**Figura 20-2:** Especificaciones físicas del conector de tramo final SMA hembra - Contacto Redondo

Fuente: (Johnson Components, 2016, p. 5)

## 2.6.2. Equipos

### 2.6.2.1. RF/Microwave Signal Generator (Anritsu MG3690C)



**Figura 21-2:** Generador de señal RF/Microonda (Anritsu MG3692C) 0.1 Hz a 20 GHz.

Fuente: (Anritsu, 2019)

El *MG3690C* (Ver Figura 21-2) es un generador de señal que ofrece una cobertura de frecuencia insuperable, ruido de fase baja, potencia de salida nivelada, pureza espectral, velocidad de conmutación, rendimiento de modulación, tamaño, capacidad de actualización, fiabilidad, y servicio. Los generadores de señal son configurables para una amplia gama de aplicaciones.

Todas las especificaciones y características se aplican a los generadores de señal *MG3690C* y superiores. Las especificaciones que se darán en la Tabla 7-2 describen el rendimiento de la máquina *MG3692C* para  $25 \pm 10$  °C. Las especificaciones "típicas" describen el rendimiento esperado, pero no garantizado (Anritsu, 2019).

**Tabla 7-2:** Especificaciones de salida (Anritsu *MG3692C*)

<b>Cobertura de frecuencia</b>	0.1 Hz a 20 GHz
<b>Unidades de potencia</b>	Unidades de salida seleccionables como dBm o mV. La selección de mV asume una carga de 50 Ω. Toda la entrada y visualización de datos están en las unidades seleccionadas.
<b>Resolución de potencia de salida</b>	0.01 dB o 0.001 mV
<b>Impedancia de salida</b>	50 Ω nominal
<b>Salida SWR (Nivelación interna)</b>	< 2.0 típico
<b>Estabilidad de nivel de potencia con temperatura</b>	± 0.04 dB/°C typical
<b>Conector RF</b>	SMA (hembra)

**Fuente:** (Anritsu, 2019)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

### 2.6.2.2. Spectrum Analyzer (Anritsu *MS2724C*)



**Figura 22-2:** Analizador de espectro (Spectrum Master™ *MS2724C*)

**Fuente:** (Anritsu, 2013)

El *Spectrum Master™ MS2724C* (Ver Figura 22-2) es un analizador de espectro portátil de alto rendimiento de Anritsu, proporciona el rendimiento necesario para las mediciones más exigentes en entornos físicos y de RF. El *Spectrum Master™* es el instrumento ideal para realizar mediciones rápidas y confiables, ya sea para monitoreo de espectro, pruebas de transmisión, análisis de interferencias, mediciones de RF y microondas, cumplimiento normativo o Wi-Fi y redes inalámbricas (Anritsu, 2013).

### Mediciones:

- Medición de intensidad de campo (utiliza tablas de calibración de antenas para medir dBm / m<sup>2</sup>, dBW / m<sup>2</sup>, V / m, A / m, Watt / m<sup>2</sup>, Watt / cm<sup>2</sup> o dBmV / m)
- Ancho de banda ocupado (de 99% a 1% canal de potencia de una señal)
- Potencia del canal (mide la potencia total en un ancho de banda específico)
- ACPR (relación de potencia del canal adyacente)
- Demodulación de AM / FM / SSB (FM ancha / estrecha, SSB superior / inferior), (solo salida de audio)
- C / I (relación portadora a interferencia)
- Máscara de emisión (recuperar líneas límite como máscara de emisión)

**Tabla 8-2:** Parámetros de configuración (*Spectrum Master™ MS2724C*)

<b>Frecuencia</b>	Centro / Inicio / Parada, Spam, Paso de frecuencia, Estándar de señal, Canal #
<b>Amplitud</b>	Nivel de referencia (RL), escala, atenuación nivel/ automático, compensación de RL, preamplificación activada / desactivada, detección
<b>Spam</b>	Span, Span Subida/Bajada (1-2-5), Span completo, Span cero, último Span
<b>Ancho de banda</b>	RBW, Auto RBW, VBW, Auto VBW, RBW/VBW, Span/RBW
<b>Archivo</b>	Guardar, recuperar, eliminar, gestión de directorios
<b>Borrar</b>	Archivo seleccionado, todas las mediciones, todos los archivos de modo, todo el contenido
<b>Opciones de aplicación</b>	Impedancia (50 Ω, 75 Ω, Otro)

Fuente: (Anritsu 2013)

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

**Tabla 9-2:** Frecuencia (Spectrum Master™ MS2724C)

<b>Rango de frecuencia</b>	9 kHz a 20 GHz (sintonizable a 0 Hz), preamplificador de 100 kHz a 20 GHz
<b>Resolución de sintonización</b>	1 Hz
<b>Span de Frecuencia</b>	10 Hz a 20 GHz incluyendo cero span
<b>Tiempo de barrido</b>	10 $\mu$ s a 600 segundos en span cero
<b>Precisión de tiempo de barrido</b>	$\pm$ 2% en span cero

**Fuente:** (Anritsu 2013)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

**Tabla 10-2:** Rangos de amplitud (Spectrum Master™ MS2724C)

<b>Rango dinámico</b>	> 104 dB @ 2.4 GHz, 2/3 (TOI-DANL) en 1 Hz RBW
<b>Medición de rango</b>	DANL a +30 dBm
<b>Rango de visualización</b>	1 a 15 dB / div en pasos de 1 dB, se muestran diez divisiones
<b>Rango de nivel de referencia</b>	-150 dBm a +30 dBm
<b>Resolución de atenuación</b>	0 a 65 dB, pasos de 5 dB
<b>Unidades de amplitud</b>	Modos de escala de registro: dBm, dBV, dBmv, dB $\mu$ V Modos de escala lineal: nV, $\mu$ V, mV, V, kV, nW, $\mu$ W, mW, W, kW

**Fuente:** (Anritsu 2013)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se detalla el diseño, simulación e implementación de un set de Baluns de altas frecuencias. Este set dispondrá de cinco Baluns con tecnología Microstrip para trabajar en la frecuencia de 2,4 GHz; cinco Baluns con Tecnología MMIC y Microstrip para trabajar dentro del rango de frecuencias de 2 a 7 GHz y cinco Baluns con Tecnología MMIC y Microstrip para trabajar dentro del rango de frecuencias de 5,5 a 13,5 GHz. Dispositivos que son muy importantes para las telecomunicaciones en las etapas de transmisión y recepción de señales en frecuencias de microondas, dotando así al laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH de este tipo de dispositivos implementados con material específico para el estudio y practica de futuros estudiantes y profesionales.

#### 3.1. MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

##### 3.1.1. *Materiales*

La selección del material correcto juega un papel muy importante a la hora de implementar Baluns de alta frecuencia ya que estos circuitos requieren ser construidos con materiales que tengan un control estricto de la constante dieléctrica, así como de bajas pérdidas. En la actualidad existen muchos tipos de materiales para aplicaciones de altas frecuencias, pero habiendo tomado en cuenta las necesidades del presente proyecto y el rendimiento eléctrico del material se ha decidido utilizar Roger RO4003C, este material no solo proporciona las características eléctricas necesarias, sino que también se puede realizar placas de circuito impreso con procesos estándar por lo que reduce el coste, a continuación, se enlista los materiales más importantes utilizados:

- Roger RO4003C
- Conectores SMA 50 Ohm
- Pigtailes Coaxial RG316 Male to Male
- MMIC Baluns MTX2-73+
- MMIC Baluns MTX2-143+
- Dremel, discos de corte para dremel
- Cautín tipo lápiz y estaño.

### **3.1.2. Equipos**

Los equipos enlistados a continuación se encuentran disponibles para el uso y práctica en el ámbito de las telecomunicaciones y análisis de señales de docentes y estudiantes en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH:

- RF/Microwave Signal Generator (Anritsu MG3690C)
- Spectrum Analyzer (Anritsu MS2724C)

## **3.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS**

Para desarrollar el diseño e implementación de los dispositivos de altas frecuencias propuestos en el presente trabajo se aplicarán los métodos: descriptivo, transversal y de laboratorio. Los cuales se basan en el reconocimiento minucioso del objeto o caso de estudio, un estudio estadístico y las pruebas de laboratorio, por lo que se irán resolviendo paulatinamente las interrogantes expuestas en el planteamiento del problema.

Después de la familiarización con las tecnologías y las técnicas de diseño e implementación de los dispositivos, se realizará el análisis de los datos obtenidos para dar una explicación de su comportamiento en altas frecuencias, y así finalmente concluir si la implementación del set electrónico fue satisfactoria.

### **3.2.1. Métodos**

#### **3.2.1.1. Diagnóstico**

En la actualidad el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH está en constante proceso de actualización y renovación de equipos y material de estudio en las diferentes ramas de la ciencia de las telecomunicaciones. En su defecto, el incompleto material existente para el estudio y practica de las altas frecuencias han puesto en evidencia la necesidad de implementar dispositivos complementarios como son los Baluns de alta frecuencia con tecnologías Microstrip y MMIC que aporten y apoyen al desarrollo académico y tecnológico de estudiantes y profesionales de las telecomunicaciones, para lo cual se debe realizar una encuesta y así conocer más a fondo la situación problemática.

La encuesta debe ser realizada a estudiantes de la Facultad de Informática y Electrónica carrera de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la ESPOCH, de los niveles de entre quinto semestre y decimo semestre por el motivo de que a partir de ahí reciben asignaturas afines a la investigación. El objetivo es determinar si es factible y el impacto que tendrá implementar un set de Baluns de Alta Frecuencia en el Laboratorio de Comunicaciones y Microondas de la FIE-ESPOCH.

### 3.2.1.2. Población y Muestra

De acuerdo con los datos obtenidos de la Escuela de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la ESPOCH, hay un total de 485 estudiantes legalmente matriculados a la fecha, de los cuales 188 son alumnos de quinto a decimo semestre de la carrera de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes y 297 son alumnos de primer a cuarto semestre de la nueva malla académica de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones. Por lo que se ha tomado como población los 188 estudiantes de los niveles superiores.

Para el cálculo del tamaño de la muestra para la población finita y conocida se tiene:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot N \cdot p \cdot q}{i^2(N-1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q} \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Donde:

$n$ : tamaño muestral

$N$ : tamaño de la población

$Z_{\alpha}$ : valor correspondiente a la distribución de Gauss (nivel de confianza)

$p$ : prevalencia esperada del parámetro a evaluar en caso de ser desconocido ( $p = 0,5$ ), que hace mayor el tamaño muestral

$q$ :  $1 - p$  (si  $p = 70\%$ ,  $q = 30\%$ )

$i$ : error que se prevé cometer (Bolaños, 2012, p. 5)

Entonces:

Partiendo de la Ecuación 1-3, tomando en cuenta los 188 estudiantes de la población y con un nivel de confianza de 94% se tiene:

$$n = \frac{Z_a^2 \cdot N \cdot p \cdot q}{i^2(N-1) + Z_a^2 \cdot p \cdot q} = \frac{1,881^2 \cdot 188 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,06^2(1,881^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5)} = 106,753$$

$$n = 107$$

Finalmente, en base a los cálculos realizados se ha determinado que la encuesta se debe realizar a 107 estudiantes de los niveles de quinto a decimo semestre de la carrera de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y redes.

### 3.2.1.3. Diseño del método estadístico para la selección del material

La selección del material más adecuado para la implementación de baluns de alta frecuencia se da a partir de las propiedades eléctricas y físicas que estos puedan presentar de fábrica. El material debe tener tolerancia dieléctrica baja y baja pérdida, excelente rendimiento eléctrico que permita aplicaciones con frecuencias de funcionamiento altas, que sea ideal para aplicaciones de banda ancha, que tenga propiedades eléctricas estables frente a la frecuencia, bajo coeficiente térmico de la constante dieléctrica y propiedades físicas como el espesor del dieléctrico.

La constante dieléctrica y la tangente de pérdidas son parámetros fundamentales en el diseño de dispositivos de microondas basados en dieléctricos. Es necesario conocer el valor que tienen a las frecuencias y temperatura de trabajo para las que se diseña el dispositivo. La velocidad de propagación, la longitud de onda y la impedancia característica dependen de la constante dieléctrica, y las pérdidas se relacionan con la tangente de pérdidas. Cualquier anomalía en las propiedades de estos materiales provoca una degradación del comportamiento eléctrico del dispositivo (Malo et al., 2010, p. 1).

**Tabla 1-3:** Factores y niveles de estudio para el rendimiento eléctrico del material Roger RO4350B

Factores	Nivel		Variable Respuesta
	Bajo	Alto	
X1: Constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ )	3,47	3,49	Coeficiente Térmico [ppm/°C]
X2: Permitividad relativa - diseño( $\epsilon_r$ )	3,65	3,67	
X3: Factor de disipación tan ( $\delta$ )	0,0036	0,0038	

**Fuente:** (Rogers Corporation, 2015a)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

Partiendo de los datos obtenidos del datasheet del material Roger RO4350B se incorporó el factor de disipación tangencial en niveles de 0.00360 y 0.00380, una permitividad relativa en el diseño de 3.65 y 3.67 con una constante dieléctrica en el proceso de fabricación (Rogers Corporation, 2015) según el nivel de 3,470 (Nivel Bajo) y 3,490 (Nivel Alto). Se aplicó un diseño experimental factorial multinivel 2<sup>3</sup>, y se controló el efecto rendimiento eléctrico del material a través de la variable coeficiente térmico, según la Tabla 1-3. Los resultados fueron procesados estadísticamente con el software Statgraphics™ Centurion.

De igual forma partiendo de los datos obtenidos del datasheet del material roger RO4003C se incorporó el factor de disipación tangencial en niveles de 0.0026 y 0.0028, una permitividad relativa de 3.54 y 3.56 con una constante dieléctrica según el nivel de 3.37 (Nivel Bajo) y 3.39 (Nivel Alto). Se aplicó el mismo diseño experimental que en el material anterior, y se controló el efecto rendimiento eléctrico del material a través de la variable coeficiente térmico, según la Tabla 2-3. Los resultados fueron procesados estadísticamente con el software anteriormente indicado.

**Tabla 2-3:** Factores y niveles de estudio para el rendimiento eléctrico del material Roger RO4003C

Factores	Nivel		Variable Respuesta
	Bajo	Alto	
X1: Constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ )	3,37	3,39	Coeficiente Térmico [ppm/°C]
X2: Permitividad relativa - diseño ( $\epsilon_r$ )	3,54	3,56	
X3: Factor de disipación tan ( $\delta$ )	0,0026	0,0028	

**Fuente:** (Rogers Corporation, 2015a)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

### 3.2.2. Técnicas

Para detallar las técnicas utilizadas en la etapa de diseño se ha visto conveniente dividir en dos partes, la etapa de diseño de Baluns de alta frecuencia con tecnología Microstrip y la etapa del diseño de pistas para implementar Baluns con tecnología MMIC. Para el diseño y simulación de Baluns con tecnología Microstrip y el diseño de pistas para implementar Baluns con tecnología MMIC se utilizará el software Ansoft Designer, ya que este nos permitirá seleccionar los parámetros específicos que se necesitan para el diseño dando precisión en los resultados finales. Cabe resaltar que el procedimiento para el diseño de los dispositivos es muy similar por lo que se mencionará los pasos más importantes y las especificaciones de los parámetros que varían.

### 3.2.2.1. Diseño de Baluns de alta frecuencia con tecnología Microstrip

Para el diseño de Baluns con tecnología Microstrip dentro del rango de frecuencias de 2 a 7 GHz, se ha escogido la frecuencia de 2,4 GHz por el motivo de ser una banda libre, lo cual no se necesita tener ninguna licencia para transmitir, siendo así una frecuencia muy utilizada por algunas de las tecnologías inalámbricas de hoy en día como son Wifi, Bluetooth, Zigbee, RFID, por mencionar algunas de las más importantes; otra razón es el tamaño, ya que mientras más alta es la frecuencia más se reducen las líneas de transmisión y en el país actualmente aún no se cuenta con la tecnología necesaria para la implementación de pistas tan reducidas. Se propone dos diseños a la misma frecuencia para poder realizar una comparación de resultados de pros y contras de un diseño frente al otro.

#### 3.2.2.1.1. Diseño 1 de Balun a 2,4 GHz

En el artículo que se ha tomado como referencia para la realización de este apartado (Zhang et al., 2014) se encuentra el proceso de diseño para la implementación de un balun microstrip de impedancia compleja. En el presente trabajo se propone una impedancia real de acople a  $50 \Omega$  tanto en la entrada como en la salida, una frecuencia central de 2,4 GHz y una diferencia de fase en la salida de  $180^\circ$  como se muestra en la Tabla 3-3, así como también se detallará el otro tipo de diseño en el apartado siguiente.

**Tabla 3-3:** Especificaciones Diseño 1 de Balun Microstrip a 2,4 GHz

<b>Diseño 1 de Balun Microstrip a 2,4 GHz</b>	
Tipo	Pasivo
Frecuencia central	2,4 GHz
Ancho de banda / -10 dB	0.33 GHz
Impedancia de E/S	$50 \Omega$
Relación de impedancias n:m	1:1
Desfase en la salida	$180^\circ$

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

Para realizar la configuración en microstrip la longitud de la línea de retardo es  $\lambda_{ef}/4$ . Las líneas de transmisión están diseñadas sobre el material de Roger RO4003C, por lo que la constante dieléctrica  $\epsilon$  ya no es 1 ( $\epsilon$  del aire), en este momento la  $\epsilon$  tiene un valor medio entre la  $\epsilon$  del aire y la  $\epsilon$  del sustrato del diseño, a la cual se denomina constante dieléctrica efectiva  $\epsilon_{ef}$ . La constante dieléctrica efectiva cumple la siguiente relación:

$$\lambda_{ef} = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Mediante la herramienta Ansoft Designer se puede determinar una constante dieléctrica efectiva  $\epsilon_{ef} = 2.781$  por lo que la longitud de onda efectiva será  $\lambda_{ef} = 74.96 \text{ mm}$ , de igual forma se puede determinar el ancho de la pista para conseguir una impedancia de  $50\Omega$ . En este caso ese valor es de  $W_0 = 3.388 \text{ mm}$ .

En la Tabla 4-3 se da un listado de las especificaciones técnicas del material RO4003C el cual cumple con las características necesarias para la implementación de baluns de alta frecuencia propuestas en el presente trabajo como también evidencian los resultados del apartado 4.2.

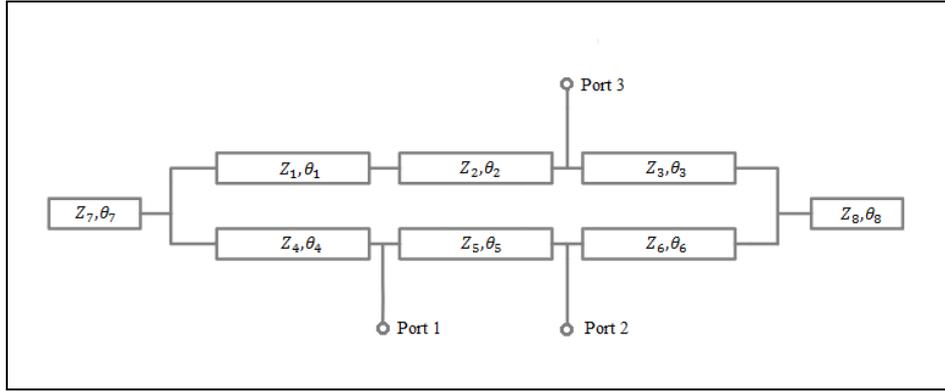
**Tabla 4-3:** Especificaciones técnicas del material Roger RO4003C

<b>Roger RO4003C</b>	
Dimensión	152x228 mm
Constante dieléctrica	3.38
Factor de disipación tan/F	0.0027/10 GHz
Espesor	1.524mm

**Fuente:** (Rogers Corporation, 2015a)

**Realizado por:** Parreño Gabriel 2019

En la Figura 1-3 se muestra el esquemático del Diseño 1 de balun microstrip. Está conformado por tres pares de líneas de impedancia ( $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$ ) con sus respectivas longitudes eléctricas ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ ) y un par de stubs para el cortocircuito ( $Z_7, \theta_7; Z_8, \theta_8$ ). El puerto de entrada *Port1* y los Puertos de salida *Port2* y *Port3*, deben tener un acople de  $50\Omega$ .



**Figura 1-3:** Esquemático del circuito para el Diseño 1 de Balun Microstrip a 2,4 GHz.

**Fuente:** (Zhang et al., 2014)

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

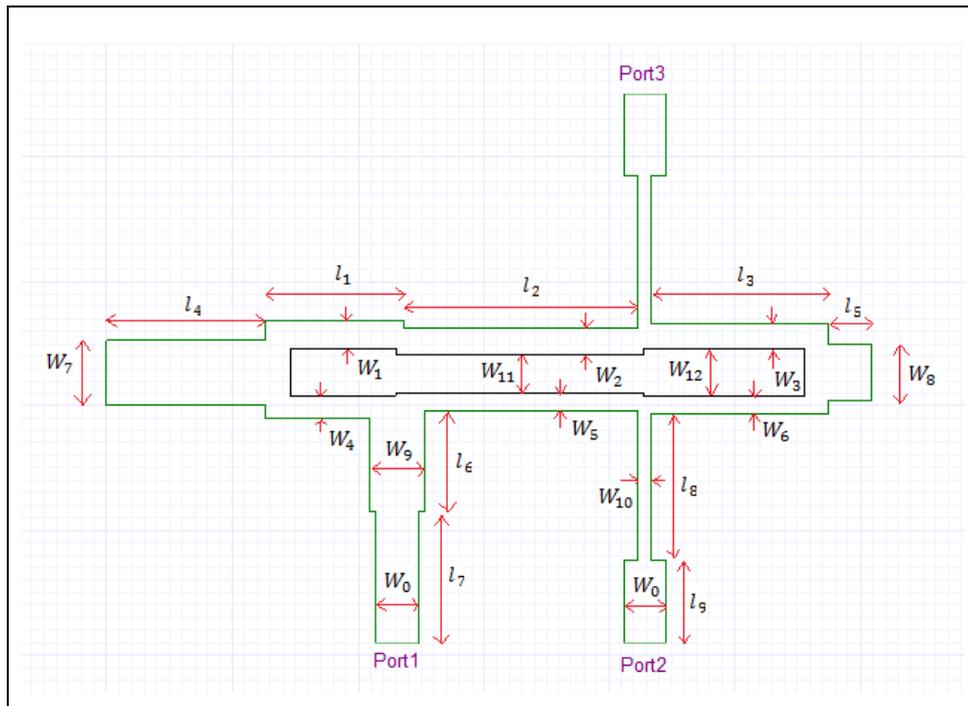
El balun se diseña para una frecuencia central de 2.4 GHz, en el material que posteriormente será implementado Roger RO4003C el cual tiene una constante dieléctrica de 3.38 con un espesor de 1.524mm como se ve en la Tabla 4-3. Las longitudes eléctricas  $\theta_1 = \theta_4$ ,  $\theta_3 = \theta_6$  se deben elegir entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , tomando en cuenta que  $\theta_2 = \theta_5 = 90^\circ$ , para provocar el desfase de  $180^\circ$  requerido a la salida. Las impedancias para este material en específico deben ser elegidas entre  $15\Omega$  y  $125\Omega$  puesto que una impedancia fuera de este rango sería físicamente imposible de implementar.

Utilizando la herramienta Ansoft Designer se procede a calcular los parámetros mostrados en la Figura 2-3, tales que satisfagan las necesidades planteadas. Los cuales finalmente quedarían de la siguiente manera expresados en milímetros (mm):  $W_1 = 2.203$ ,  $l_1 = 11$ ,  $W_2 = 2.144$ ,  $l_2 = 18.74$ ,  $W_3 = 2.051$ ,  $l_3 = 14$ ,  $W_7 = 5.341$ ,  $l_4 = 12.58$ ,  $W_8 = 4.687$ ,  $l_5 = 3.41$ ,  $W_9 = 4.36$ ,  $l_6 = 8.042$ ,  $W_0 = 3.388$ ,  $l_7 = 10.5$ ,  $W_{10} = 1.1$ ,  $l_8 = 11.7$ ,  $l_9 = 6.59$ ,  $W_4 = 1.707$ ,  $W_5 = 1.478$ ,  $W_6 = 1.426$ ,  $W_{11} = 3.198$ ,  $W_{12} = 3.949$ .

Se sabe que longitud eléctrica es:

$$\theta = \beta \cdot l = \frac{2\pi \text{ ó } 360^\circ}{\lambda_{ef}} \cdot l \quad \text{Ecuación 3-3}$$

donde  $\beta$  es la constante de fase de la onda y  $l$  es la distancia a la que están separados de la carga. Por otro lado, la herramienta *Estimate* de Ansoft Designer permite calcular la impedancia que se tiene en un ancho de línea de transmisión determinado para un material específico. Por lo que, los valores para los parámetros de la Figura 1-3, serían los siguientes:  $Z_1 = 64.59\Omega$ ,  $Z_4 = 73.83\Omega$ ,  $\theta_1 = \theta_4 = 52.83^\circ$ ,  $Z_2 = 65.55\Omega$ ,  $Z_5 = 79.2\Omega$ ,  $\theta_2 = \theta_5 = 90^\circ$ ,  $Z_3 = 67.14\Omega$ ,  $Z_6 = 80.55\Omega$ ,  $\theta_3 = \theta_6 = 67.24^\circ$ ,  $Z_7 = 36.91\Omega$ ,  $\theta_7 = 60.42^\circ$ ,  $Z_8 = 40.72\Omega$ ,  $\theta_8 = 16.38^\circ$ . La impedancia entre el puerto 1 y el balun es  $42.70\Omega$  con una longitud eléctrica de  $38.62^\circ$ . La impedancia entre el puerto 2,3 y el balun es de  $90.45\Omega$  con una longitud eléctrica de  $56.19^\circ$ .

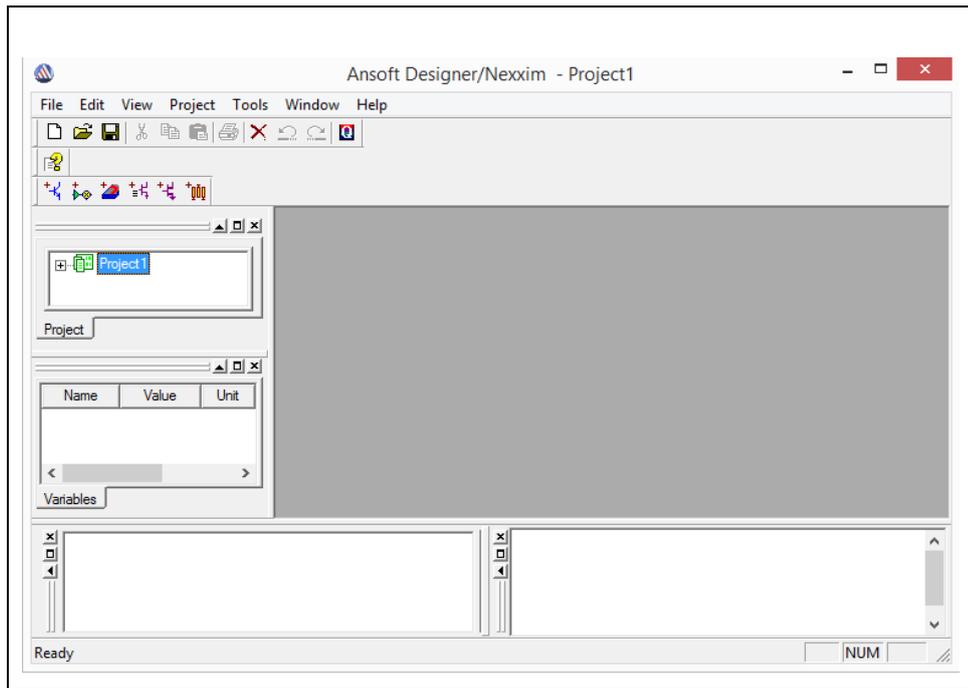


**Figura 2-3:** Vista superior del Diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

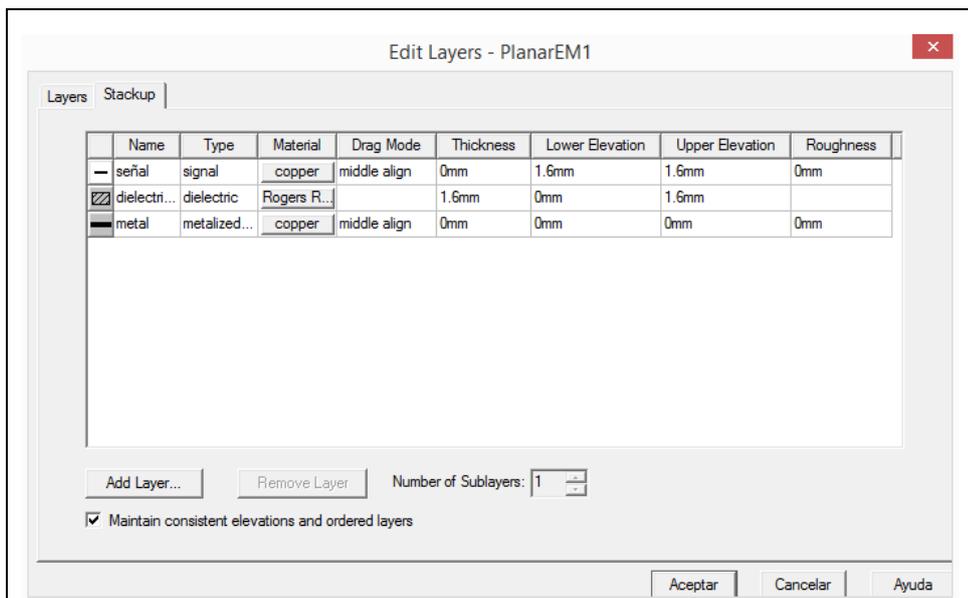
A continuación, el procedimiento realizado para calcular los parámetros de la Figura 2-3:

1. Habiendo instalado ya de antemano la herramienta de software Ansoft Designer se inicializará un nuevo proyecto Nexxim como se puede ver la Figura 3-3. El nuevo proyecto agrega automáticamente el árbol de navegación.
2. Dando clic en el icono  *Insert Planar EM Design* se despliega la pantalla del nuevo diseño en el cual dando clic al icono  *Stackup dialog* añadimos las capas con las cuales estará conformada la placa del balun como se muestra en la Figura 4-3.
3. Ahora seleccionamos el material deseado RO4003 con Permitividad Relativa en el diseño de 3.55, Factor de disipación  $\tan \delta$  0.0027 y espesor de 1.524 mm para la simulación como se muestra en la Figura 5-3.
4. Con el icono  *Draw rectangle* procedemos a realizar el diseño del balun ingresando las líneas de transmisión hasta conseguir la forma deseada como se ve en la Figura 6-3.



**Figura 3-3:** Inicio de Proyecto Nexxim en Ansoft Designer.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

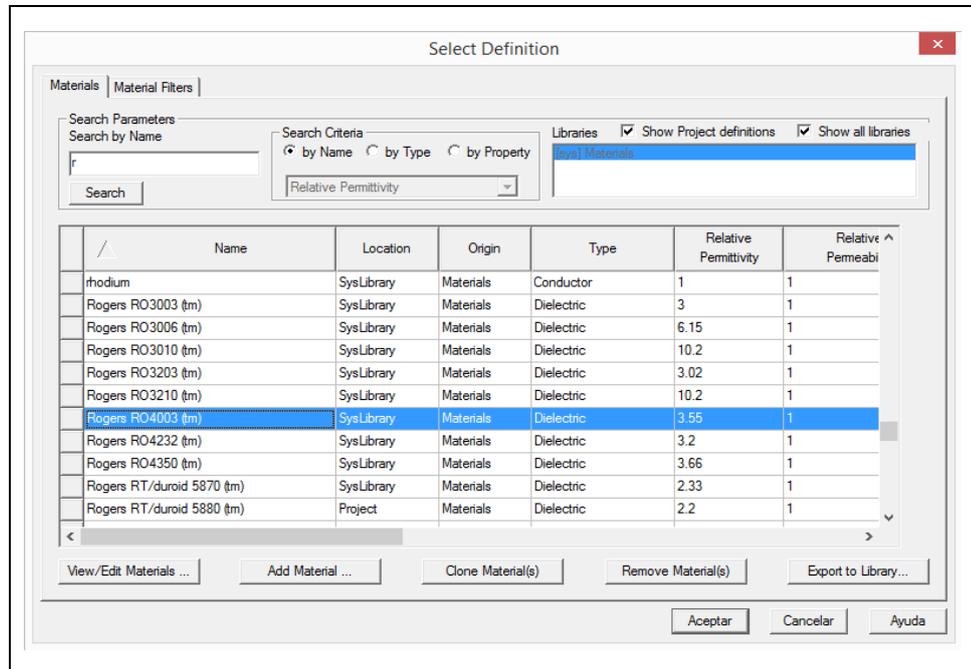


**Figura 4-3:** Apilamiento de capas para la simulación de la placa.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

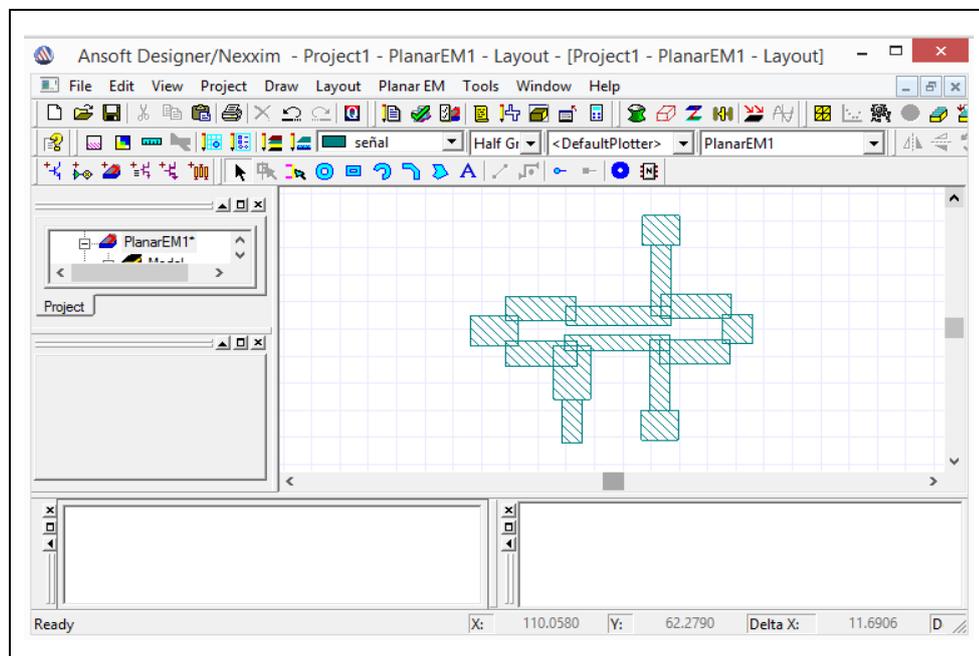
5. Ahora seleccionamos las pistas y las combinamos según la necesidad, todas en un solo cuerpo mediante *Layout>Merge Poligons>Union, Intersection o Subtract*, como se indica en la Figura 7-3.
6. En la Figura 8-3 se tiene el resultado de las pistas preliminares del balun microstrip el cual finalmente cuenta con 38 puntos contados del 0 al 37 y el slot con 12 puntos, cada

uno con sus respectivas coordenadas cartesianas las cuales se procederán a calcular con el fin de obtener las características de la Tabla 3-3.



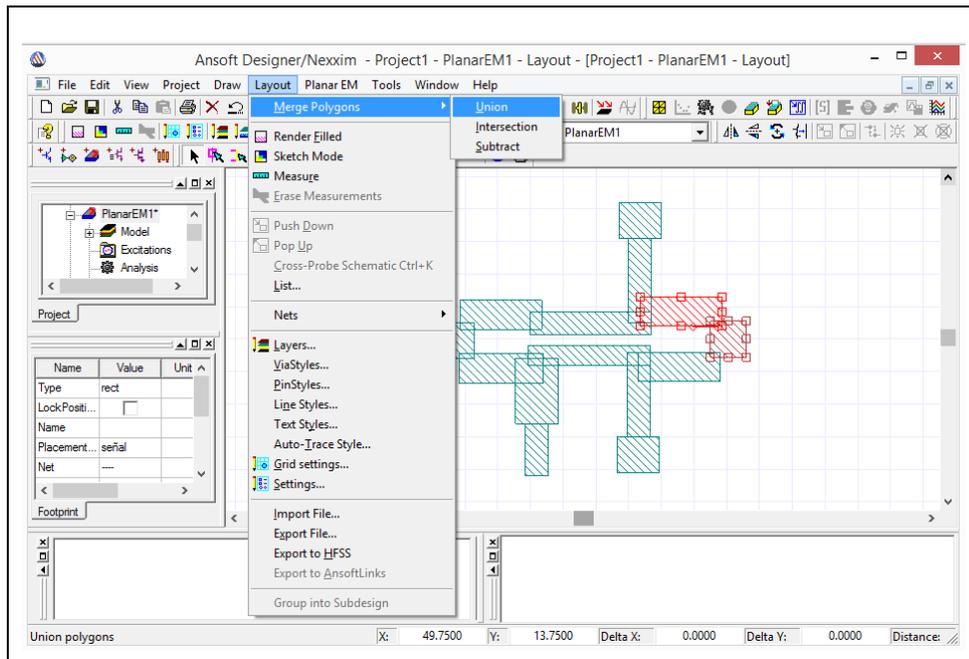
**Figura 5-3:** Selección de material dieléctrico Roger RO 4003c.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 6-3:** Vista preliminar del Diseño 1 del balun microstrip de alta frecuencia.

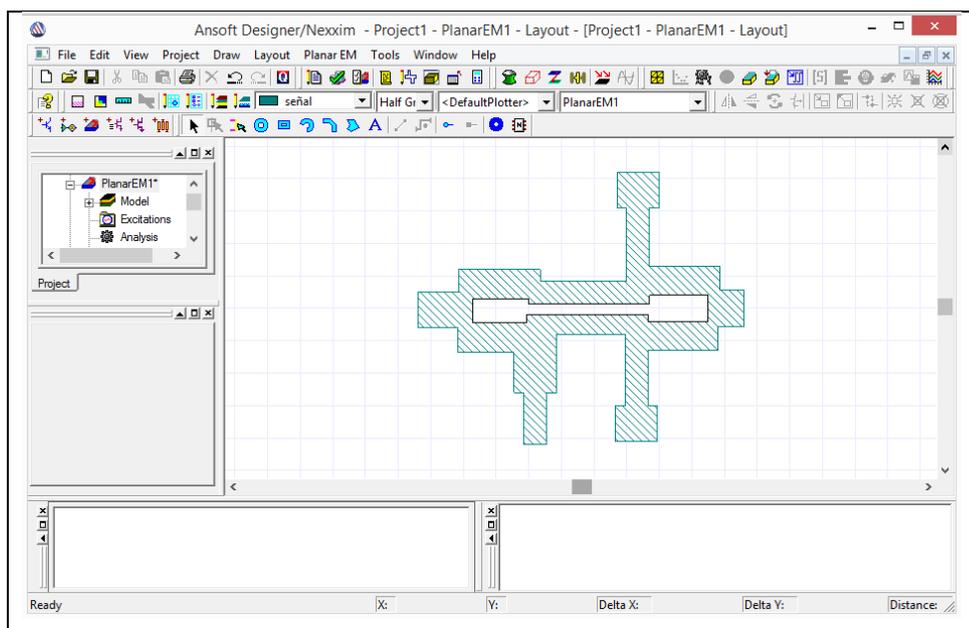
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 7-3:** Combinación de las pistas para Diseño 1 del balun microstrip.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

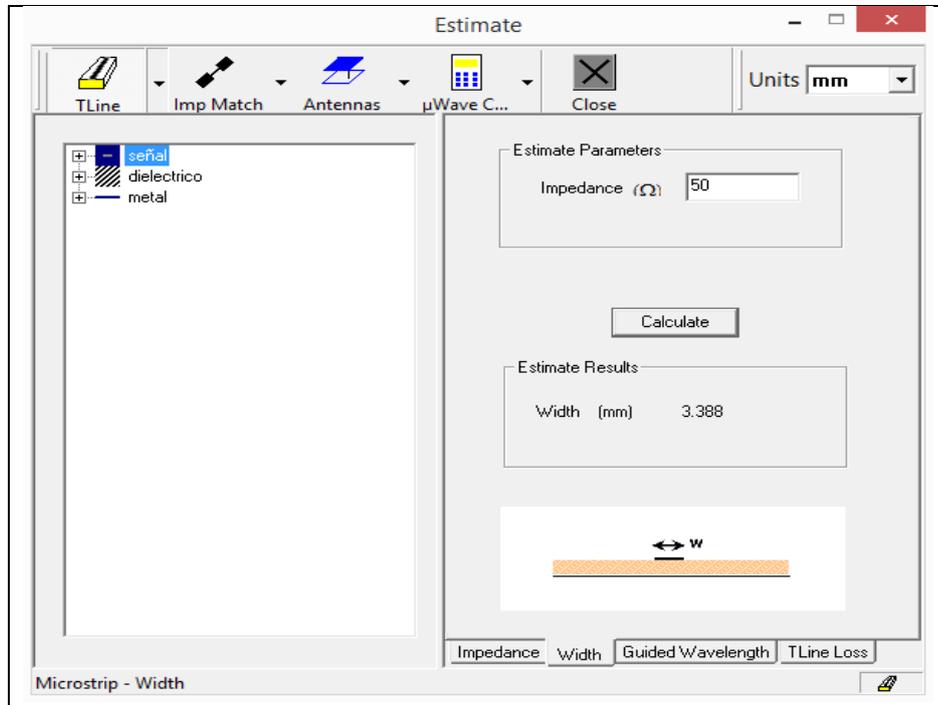
- Para calcular la impedancia de acople en los puertos de entrada y salida se debe ingresar en la herramienta *Estimate* dando clic en el icono  con el cual calculamos el ancho de línea de transmisión  $W_0 = 3.338 \text{ mm}$  para el material Roger R04003, como se indica en la Figura 9-3.



**Figura 8-3:** Resultado del Diseño 1 de las pistas preliminares para el balun microstrip de alta frecuencia.

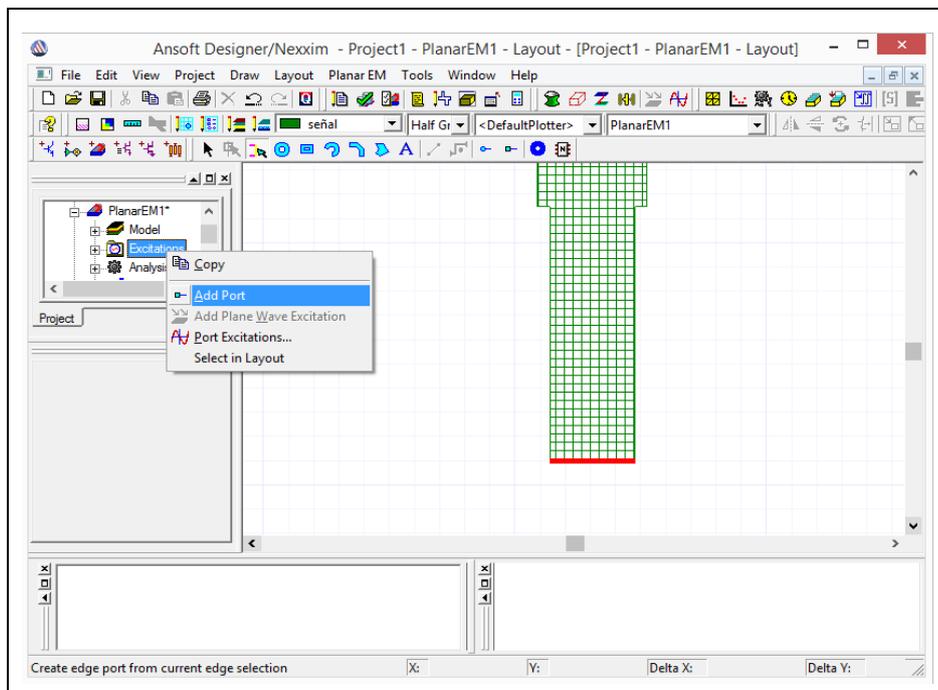
**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

8. Ahora añadimos los puertos. Dando clic en el icono *Select edges*  marcamos la línea de transmisión y seleccionamos *Excitations* en el árbol del proyecto para luego añadir los puertos de entrada y salida como se muestra en la Figura 10-3.



**Figura 9-3:** Calculo del ancho de la línea de transmisión para un acople de 50Ω.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 10-3:** Inclusión de puertos de entrada y salida para poder realizar la simulación.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project1 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Pt0	0,0	mm	0mm , 0mm
Pt1	$9.5 \cdot 0.75 + 3.82822353579104 \cdot 0$	mm	12.578223535791mm , 0mm
Pt2	$9.5 \cdot 0.75 + 3.82822353579104 \cdot -1.5 + 0.489$	mm	12.578223535791mm , -1.011mm
Pt3	$11.25 + 9.5 \cdot -5.48 + 1 + 4.62822353579104 \cdot -1.5 + 0.489$	mm	20.898223535791mm , -1.011mm
Pt4	$11.25 + 9.5 \cdot -5.48 + 1 + 4.62822353579104 \cdot -1.50 - 10.52 + 3.5$	mm	20.898223535791mm , -8.52mm
Pt5	$11.25 + 11.25 - 1.464 \cdot -5.48 + 5.82822353579104 \cdot -1.50 - 10.52 + 3.5$	mm	21.384223535791mm , -8.52mm
Pt6	$11.25 + 11.25 - 1.464 \cdot -5.48 + 5.82822353579104 \cdot -1.5 - 10.52 - 14.5$	mm	21.384223535791mm , -19.02mm
Pt7	$11.25 + 11.25 + 0.286 + 1.638 \cdot -5.48 + 5.82822353579104 \cdot -1.5 - 10.5$	mm	24.772223535791mm , -19.02mm
Pt8	$11.25 + 11.25 + 0.286 + 1.638 \cdot -5.48 + 5.82822353579104 \cdot -1.50 - 10$	mm	24.772223535791mm , -8.52mm
Pt9	$11.25 + 11.25 + 0.286 + 3.388 - 1.464 \cdot -5.48 + 1 + 5.02822353579104 \cdot$	mm	25.258223535791mm , -8.52mm
Pt10	$11.25 + 11.25 + 2.21 \cdot -5.48 + 1 + 5.02822353579104 \cdot -1 + 0.522$	mm	25.258223535791mm , -0.478mm
Pt11	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 24.65 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.86322353579104 \cdot -1$	mm	42.318223535791mm , -0.478mm
Pt12	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 24.65 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.86322353579104 \cdot -1$	mm	42.318223535791mm , -12.43mm
Pt13	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 \cdot -2.989 - 13.62 \cdot -2.035 + 6.863223535791$	mm	41.179223535791mm , -12.43mm
Pt14	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 \cdot -2.989 - 13.62 \cdot -2.035 + 6.863223535791$	mm	41.179223535791mm , -19.02mm
Pt15	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 \cdot -1.239 + 1.638 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.863223$	mm	44.567223535791mm , -19.02mm
Pt16	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 \cdot -1.239 + 1.638 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.863223$	mm	44.567223535791mm , -12.43mm
Pt17	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 \cdot -0.8 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 2.035 + 4.87822353$	mm	43.418223535791mm , -12.43mm
Pt18	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 \cdot -0.8 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 2.035 + 4.87822353$	mm	43.418223535791mm , -0.73mm

Show Hidden  
 Aceptar Cancelar

**Figura 11-3:** Cálculo de coordenadas cartesianas de los puntos P0 al P10 para el Diseño 1 de Balun Microstrip.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project1 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Pt19	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 18.05 \cdot -18.66205 \cdot -0.76805 + 2.03$	mm	57.418223535791mm , -0.73mm
Pt20	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 18.05 \cdot -18.66205 \cdot -0.76805 + 2.03$	mm	57.418223535791mm , 0.3135mm
Pt21	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 19.8 + 0.85 \cdot -18.66205 \cdot -0.76805 + 2$	mm	60.828223535791mm , 0.3135mm
Pt22	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 19.8 + 0.85 \cdot -18.66205 \cdot -0.76805 +$	mm	60.828223535791mm , 5mm
Pt23	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 18.05 \cdot -18.66205 \cdot -0.76805 + 2.03$	mm	57.418223535791mm , 5mm
Pt24	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 18.05 \cdot -18.66205 \cdot -0.76805 + 2.03$	mm	57.418223535791mm , 6.696mm
Pt25	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 \cdot -0.75 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.8632235357910$	mm	43.418223535791mm , 6.696mm
Pt26	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 \cdot -0.75 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.8632235357910$	mm	43.418223535791mm , 18.396mm
Pt27	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 - 0.511 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.86322353$	mm	44.567223535791mm , 18.396mm
Pt28	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 - 0.511 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.86322353$	mm	44.567223535791mm , 24.986mm
Pt29	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 1.239 - 5.138 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.86$	mm	41.179223535791mm , 24.986mm
Pt30	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 1.239 - 5.138 \cdot -13.62 \cdot -2.035 + 6.863$	mm	41.179223535791mm , 18.396mm
Pt31	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 1.239 \cdot -3.388 - 0.611 \cdot -13.62 \cdot -2.035$	mm	42.318223535791mm , 18.396mm
Pt32	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 26.50 + 0.91 + 1.239 \cdot -3.388 - 0.611 \cdot -13.62 \cdot -2.035$	mm	42.318223535791mm , 6.341mm
Pt33	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 0.91 + 1.239 \cdot -3.388 - 0.511 - 1.13177646420896$	mm	23.578223535791mm , 6.341mm
Pt34	$11.25 + 11.25 + 3.96 + 0.91 + 1.239 \cdot -3.388 - 0.511 - 1.13177646420896$	mm	23.578223535791mm , 6.848mm
Pt35	$8.75 + 3.82822353579104 \cdot 3.56 + 1.5 + 0.5 + 1.488 \cdot 0.2$	mm	12.578223535791mm , 6.848mm
Pt36	$8.75 + 3.82822353579104 \cdot 3.56 + 0.5 + 1.281$	mm	12.578223535791mm , 5.341mm
Pt37	$3.96 + 0.91 + 1.239 \cdot -3.388 + 1.239 - 1.96 \cdot -2 - 3.82822353579104 + 3$	mm	0mm , 5.341mm

Show Hidden  
 Aceptar Cancelar

**Figura 12-3:** Calculo de coordenadas cartesianas de los puntos P19 al P37 para el Diseño 1 de Balun Microstrip.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project1 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Footprint | Layout Displays

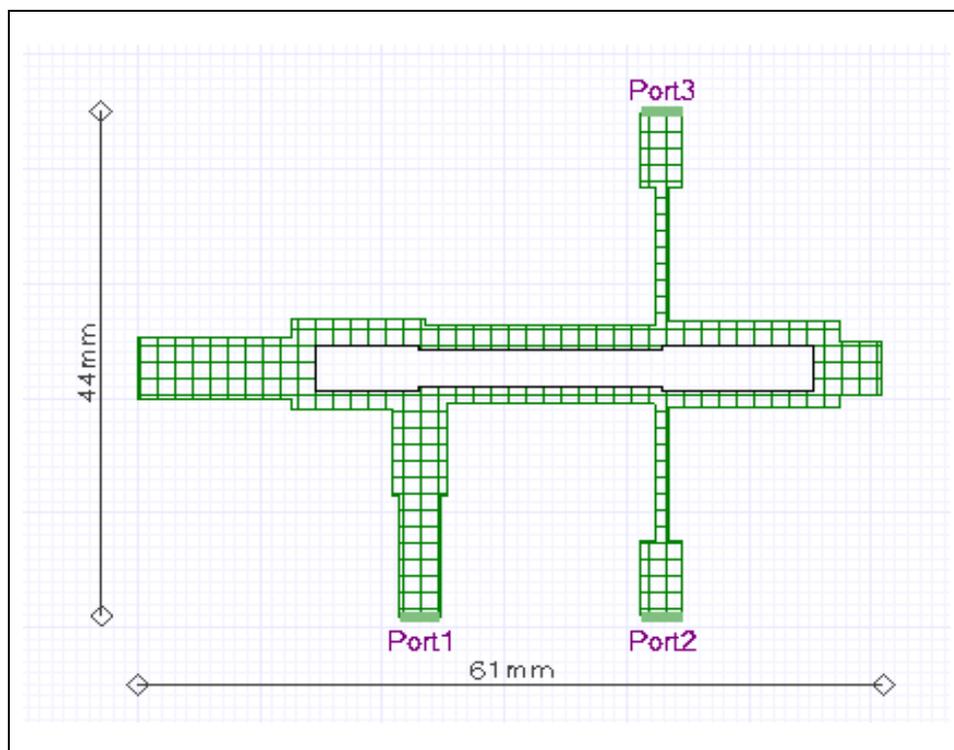
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Type	poly void		
LockPo...	<input type="checkbox"/>		
Name	poly void_3		
Placem...	señal		
Pt0	10.25 + 4.32822353579104 ,0.5 + 0.196	mm	14.578223535791mm , 0.696mm
Pt1	23.053223535791 ,0.5 + 0.196	mm	23.053223535791mm , 0.696mm
Pt2	23.053223535791 ,1 + 2.22044604925031e-016	mm	23.053223535791mm , 1mm
Pt3	35.9019520077854 + 15.75-15.66205 + 6.83832152800564 ,1 + 2...	mm	42.828223535791mm , 1mm
Pt4	42.828223535791 ,0.5 + 0.196	mm	42.828223535791mm , 0.696mm
Pt5	47.9019520077854 + 23.25 -20.16205 +2.035 - 0.2841588400840...	mm	55.278223535791mm , 0.696mm
Pt6	47.9019520077854 + 23.25 -20.16205 +2.035 - 0.2841588400840...	mm	55.278223535791mm , 4.645mm
Pt7	42.828223535791 ,4.645	mm	42.828223535791mm , 4.645mm
Pt8	35.9019520077854 + 15.75-15.66205 + 6.83832152800564 ,2.5 ...	mm	42.828223535791mm , 4.19752653315663...
Pt9	23.053223535791 ,2.5 + 0.5 + 1.19752653315663	mm	23.053223535791mm , 4.19752653315663...
Pt10	23.053223535791 ,3.5+1.841 - 0.696	mm	23.053223535791mm , 4.645mm
Pt11	10.25 + 4.32822353579104 ,3.5+1.841 - 0.696	mm	14.578223535791mm , 4.645mm

Show Hidden

Aceptar Cancelar

**Figura 13-3:** Calculo de coordenadas cartesianas de los puntos P0 al P11 para el slot del Diseño 1 de Balun Microstrip.

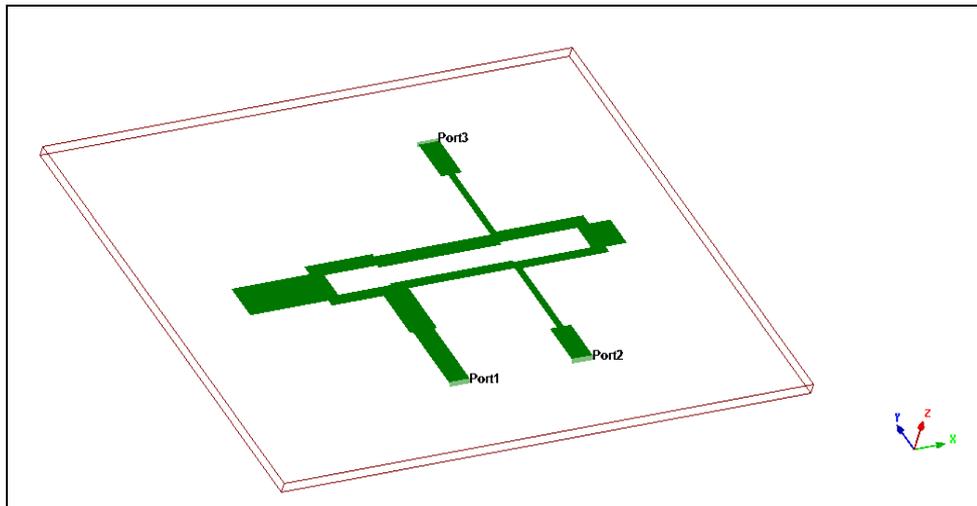
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 14-3:** Diseño 1 de balun microstrip a una frecuencia central de 2,4 GHz.

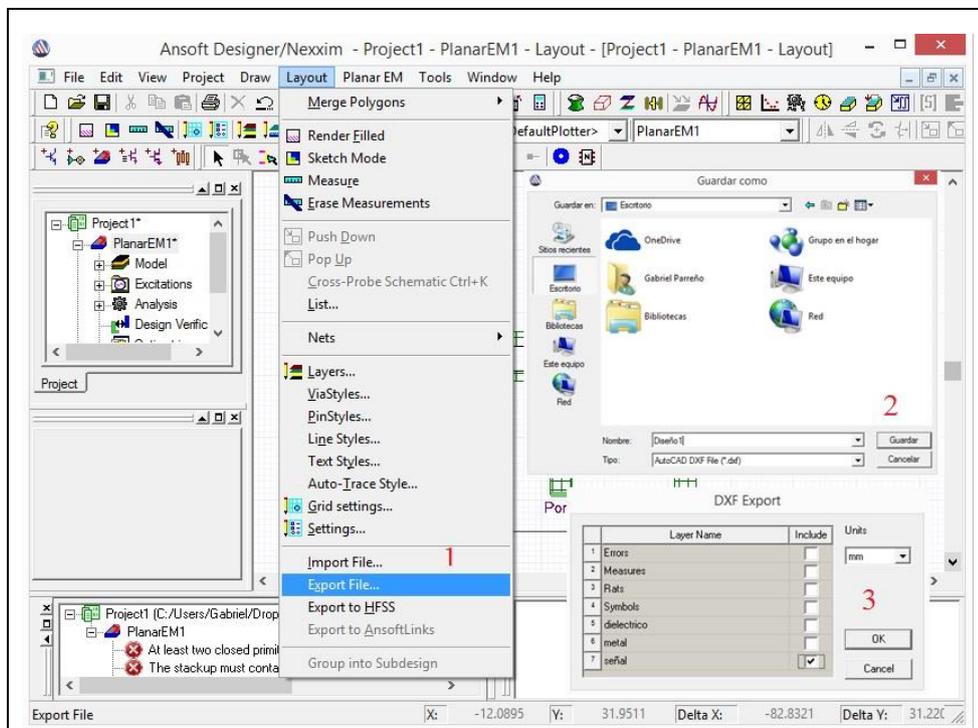
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

9. Se procede a calcular las coordenadas cartesianas para los 38 puntos (Ver Figura 11-3 y Figura 12-3) del Diseño 1 del Balun Microstrip de alta frecuencia y los 12 puntos de slot (Ver Figura 13-3) de tal forma que nos de los resultados esperados, que posteriormente serán analizadas en el capítulo cuatro, y así finalmente conseguir el diseño de la Figura 14-3. En la Figura 15-3 se puede ver el Diseño 1 del balun microstrip en perspectiva.



**Figura 15-3:** Vista en 3D del Diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz.

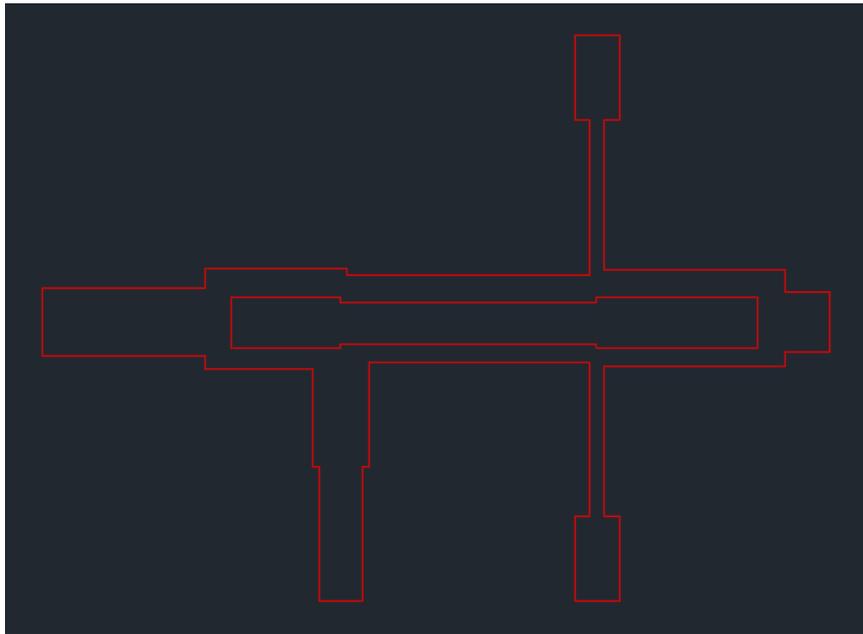
**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019



**Figura 16-3:** Exportación del archivo de Ansoft Designer a AutoCAD DXF.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

Una vez que se tiene el diseño del balun microstrip a 2,4 GHz se debe exportar a AutoCAD, esto es un procedimiento adicional con el fin de ajustar las pistas al tamaño real de la placa Roger RO4003C de doble cara para su implementación posterior. En el paso 1 Mediante la herramienta *Layout* seleccionamos *Export file*, en el paso 2 le damos un nombre al archivo y seleccionamos la extensión de archivos AutoCAD .dxf, procedemos a seleccionar la capa señal en la que se encuentran las pistas del diseño y exportamos el archivo en el directorio seleccionado como se muestra en la Figura 16-3.

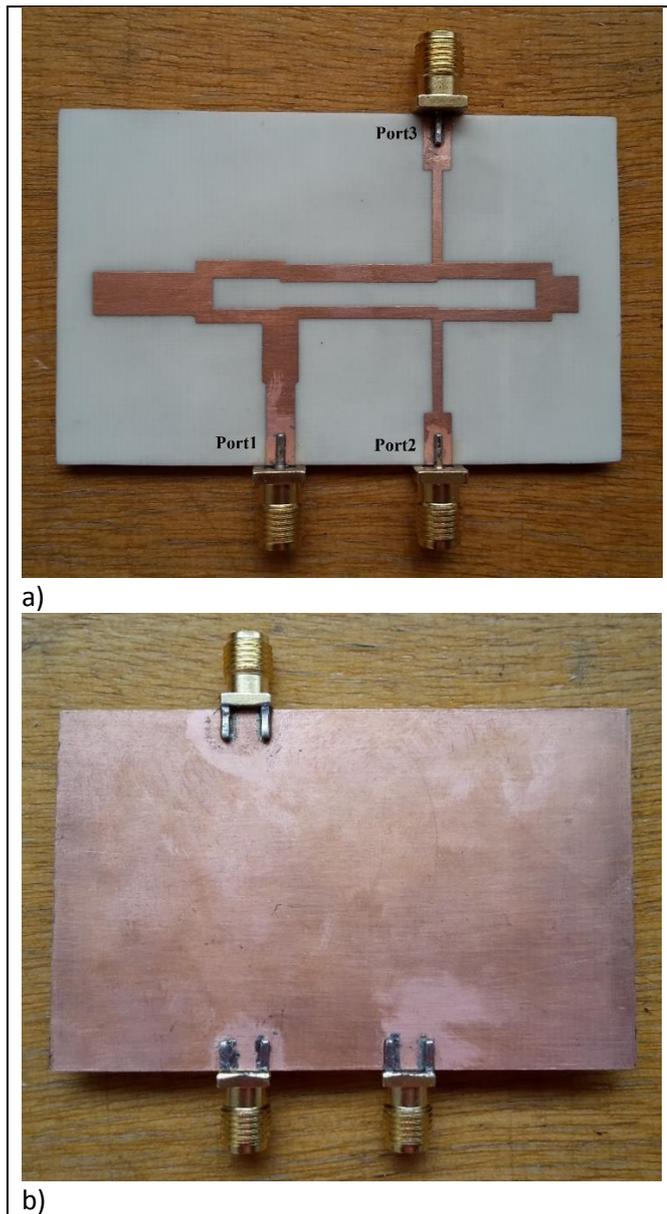


**Figura 17-3:** Resultado final del diseño 1 de balun microstrip en .dxf AutoCAD.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

En la Figura 17-3 se muestra las pistas del diseño exportado en AutoCAD que posteriormente permitirá un archivo con extensión .pdf con las dimensiones específicas para proceder a la implementación del balun de alta frecuencia.

En la práctica el prototipo se implementa con el proceso de foto transferencia al material de Roger RO4003C y utilizando una mezcla de Ácido Clorhídrico con Agua Oxigenada para el revelado de la placa. Otro de los componentes que se ha mencionado en el apartado teórico es el conector de tramo final SMA hembra con una impedancia de  $50\Omega$ , el cual deberá ser soldado en los puertos de entrada y salida como se muestra en la Figura 18-3. Finalmente se obtiene el balun microstrip 1 que opera a una frecuencia central de 2,4 GHz.



**Figura 18-3:** Implementación del diseño 1 de Balun microstrip a 2,4 GHz. (a) Vista frontal (b) Vista posterior.

**Fuente:** Parreño Gabriel, 2019

#### 3.2.2.1.2. Diseño 2 de Balun a 2,4 GHz

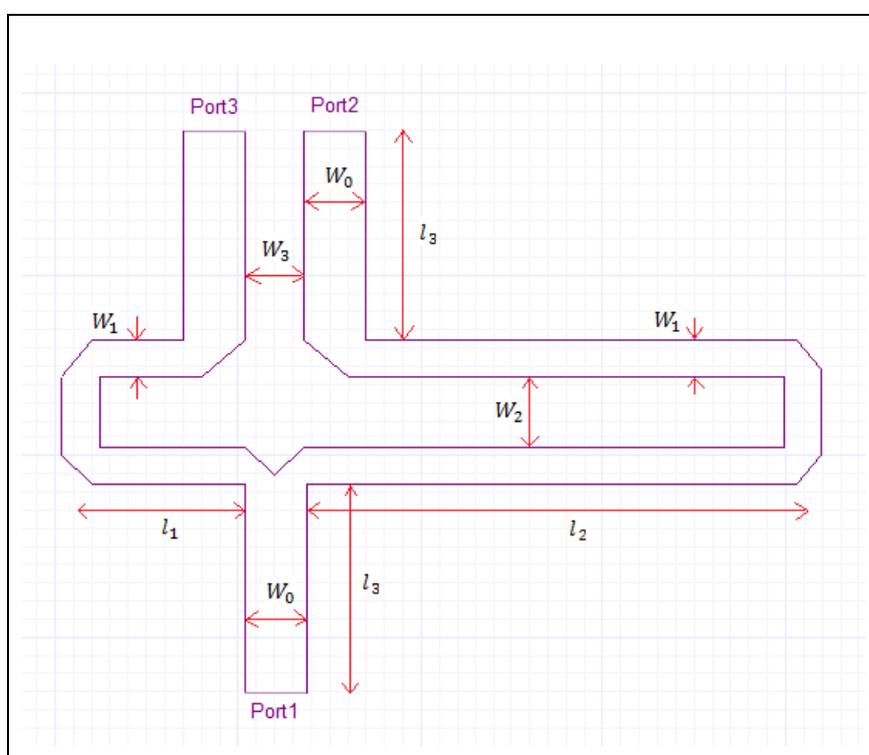
Como se menciona en el apartado anterior, aquí se procederá a realizar un diseño diferente para realizar una comparación entre los dos diseños. En el proyecto de fin de carrera (Viedma, 2012, p. 9) se encuentra un modelo el cual se ha tomado como referencia para realizar el presente diseño con una frecuencia central de 2.4 GHz, una impedancia real tanto en la entrada como en la salida de  $50\Omega$  y un desfase en la salida de  $180^\circ$  como se ve en la Tabla 5-3.

**Tabla 5-3:** Especificaciones Diseño 2 de Balun Microstrip a 2,4 GHz

<b>Diseño 2 de Balun Microstrip a 2,4 GHz</b>	
Tipo	Pasivo
Frecuencia central	2,4 GHz
Ancho de banda / -20db	0.36 GHz
Impedancia de E/S	50 $\Omega$
Relación de impedancias n:m	1:1
Desfase en la salida	180°

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Como la teoría lo indica, para que la señal de entrada se transforme en un par de señales diferenciales a la salida es decir con igual magnitud, pero con una diferencia de fase de 180°. La diferencia de longitud entre los brazos del balun en el cortocircuito debe ser  $\lambda_{ef}/4$  o escrito de otra forma  $\theta = 90^\circ$ , esto es importante ya que el desfase de la señal depende de la longitud recorrida. Por otro lado para que la magnitud de la señal que ingresa sea la misma en la salida los parámetros del coeficiente de transmisión  $S(1,2)$  y  $S(1,3)$  deben ser de -3 dB, es decir que se deben repartir de mitad a mitad por los puertos de salida. Además de esto, el parámetro del coeficiente de reflexión  $S(1,1)$  será calculado para 2,4 GHz y con una impedancia de acople de 50 $\Omega$ . El material en el que será implementado y para el cual se realizaran los cálculos es Roger RO4003C el cual se encuentra detallado en la Tabla 4-3.



**Figura 19-3:** Vista superior del Diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Para calcular los parámetros mostrados en la Figura 19-3 se ha utilizado la herramienta Ansoft Designer los cuales deberán satisfacer las características planteadas en la Tabla 5-3, a continuación, los valores expresados en milímetros (mm):  $W_0 = 3.388$ ,  $l_3 = 11.5$ ,  $W_1 = 2$ ,  $l_1 = 9.388$ ,  $l_2 = 28.128$ ,  $W_2 = 3.999$ ,  $W_3 = 3.224$ . Utilizando la Ecuación 3-3 y la herramienta de Ansoft Designer *Estimate* podemos expresarlo en términos de impedancias y longitudes de onda de la siguiente manera:  $Z_0 = 50.18\Omega$ ,  $\theta_3 = 55.22^\circ$ ,  $Z_1 = 68.04\Omega$ ,  $\theta_1 = 45.08^\circ$ ,  $\theta_2 = 135.08^\circ$ .

Nótese que como se dijo anteriormente la diferencia entre las longitudes de los brazos del balun a partir del cortocircuito debe ser  $\theta = 90^\circ$ , es por esto por lo que  $\theta_2 = \theta_1 + \theta = 135^\circ$ , para provocar el desfase de  $180^\circ$  requerido en la salida.

El procedimiento para realizar el diseño con el software no varía por lo que se omiten pasos mencionando solo aquellos en los que los parámetros son modificados.

Habiendo ingresado las pilas de capas en las que se diseñara el balun con las características del material RO4003, se procede a ingresar las líneas de transmisión diseñándolo hasta conseguir la forma deseada para luego proceder a calcular las coordenadas cartesianas de los 29 puntos como se observa en la Figura 20-3 y Figura 21-3 de tal forma que nos de los resultados esperados los cuales serán analizados en el siguiente capítulo. Finalmente se obtiene el diseño de la Figura 22-3, en la Figura 23-3 se muestra en perspectiva el diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz.

Properties: Project2 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Negative	<input type="checkbox"/>		
Pt0	0.337517019943334 .0	mm	0.337517019943334mm , 0mm
Pt1	2 .-1.6	mm	2mm , -1.6mm
Pt2	7+3.388 .-1.6	mm	10.388mm , -1.6mm
Pt3	7+3.388 .-13.1	mm	10.388mm , -13.1mm
Pt4	7+3.388 + 3.388 .-13.1	mm	13.776mm , -13.1mm
Pt5	7+3.388+3.388 .-1.6	mm	13.776mm , -1.6mm
Pt6	39.6 +1 .-1.6	mm	40.6mm , -1.6mm
Pt7	41.6 + 0.399999999999997 -0.05 .0	mm	41.95mm , 0mm
Pt8	41.6 + 0.399999999999997 -0.05 .4.83	mm	41.95mm , 4.83mm
Pt9	39.6 +1 .6.4	mm	40.6mm , 6.4mm
Pt10	17 .6.4	mm	17mm , 6.4mm
Pt11	17 .17.9	mm	17mm , 17.9mm
Pt12	17 - 3.388 .17.9	mm	13.612mm , 17.9mm
Pt13	17 - 3.388 .6.43	mm	13.612mm , 6.43mm

Show Hidden

Aceptar Cancelar

**Figura 20-3:** Cálculo de coordenadas cartesianas de los puntos P0 al P13 para el Diseño 2 de Balun Microstrip.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project2 - PlanarEM1 - PlanarEM1

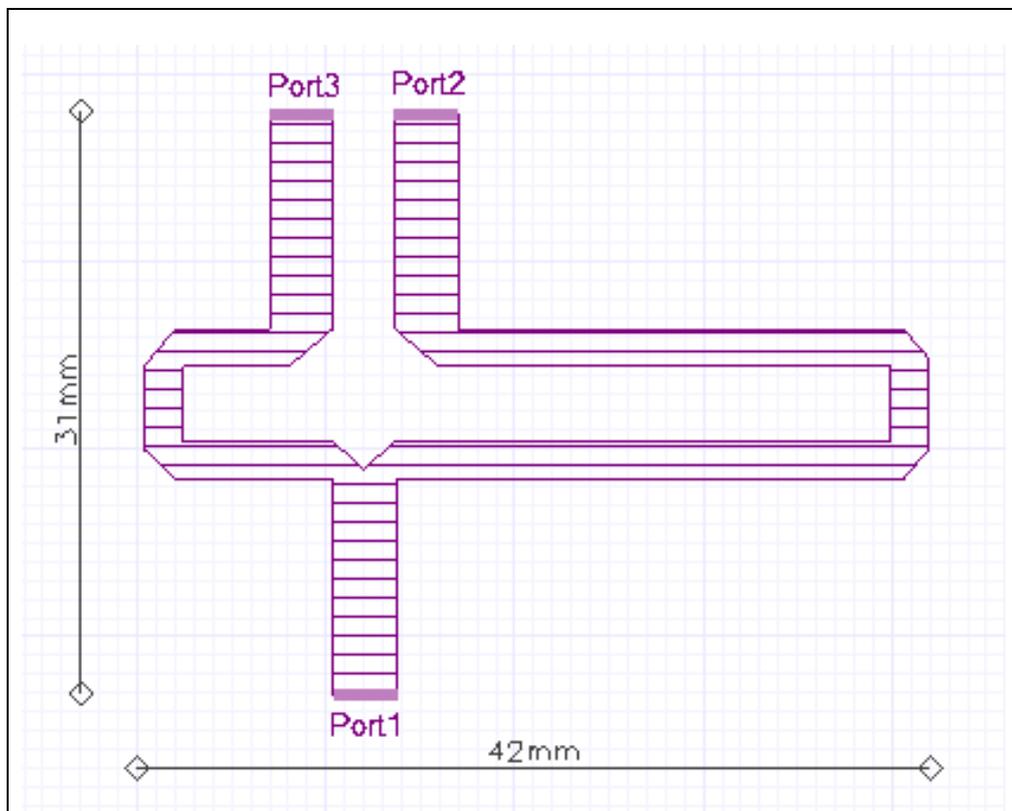
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Pt14	16 ,4.4	mm	16mm , 4.4mm
Pt15	39.6 +1-0.65 ,4.4	mm	39.95mm , 4.4mm
Pt16	39.6 +1 -0.65 ,0.401	mm	39.95mm , 0.401mm
Pt17	17 - 3.388 ,0.401	mm	13.612mm , 0.401mm
Pt18	12 , -1.1	mm	12mm , -1.1mm
Pt19	7+3.388 ,0.401	mm	10.388mm , 0.401mm
Pt20	2+0.65 -0.2125 ,0.401	mm	2.4375mm , 0.401mm
Pt21	2+0.65 -0.2125 ,4.4	mm	2.4375mm , 4.4mm
Pt22	8 ,4.4	mm	8mm , 4.4mm
Pt23	7+3.388 ,6.43	mm	10.388mm , 6.43mm
Pt24	7 + 3.388 ,17.9	mm	10.388mm , 17.9mm
Pt25	7 ,17.9	mm	7mm , 17.9mm
Pt26	7 ,6.4	mm	7mm , 6.4mm
Pt27	2 ,6.4	mm	2mm , 6.4mm
Pt28	0.337517019943334 ,4.4	mm	0.337517019943334mm , 4.4mm

Show Hidden

Aceptar Cancelar

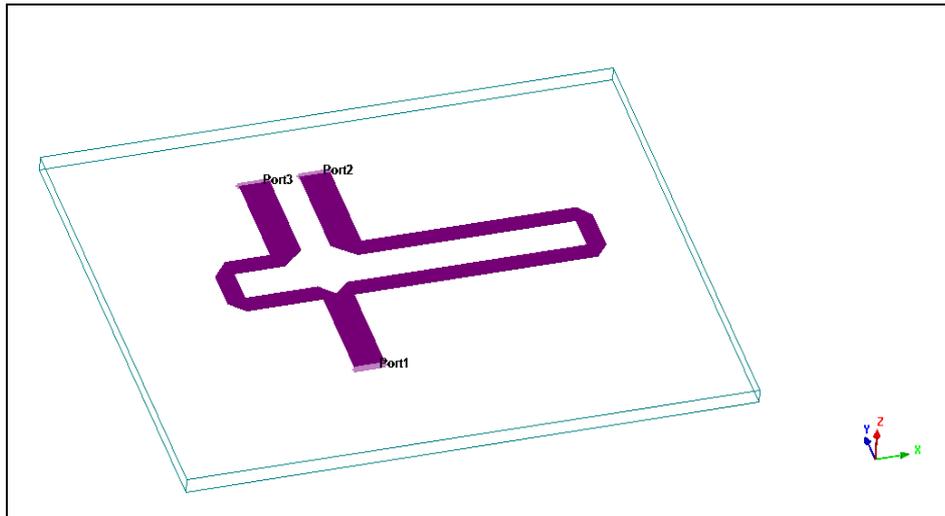
**Figura 21-3:** Cálculo de coordenadas cartesianas de los puntos P14 al P28 para el Diseño 2 de Balun Microstrip.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 22-3:** Diseño 2 de balun microstrip a una frecuencia central de 2,4 GHz.

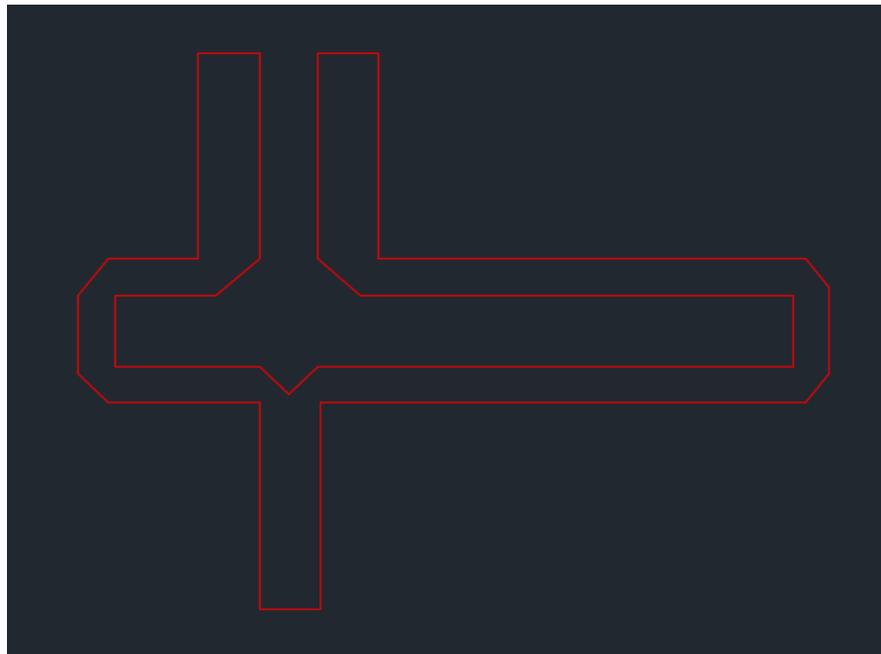
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 23-3:** Vista en 3D del Diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

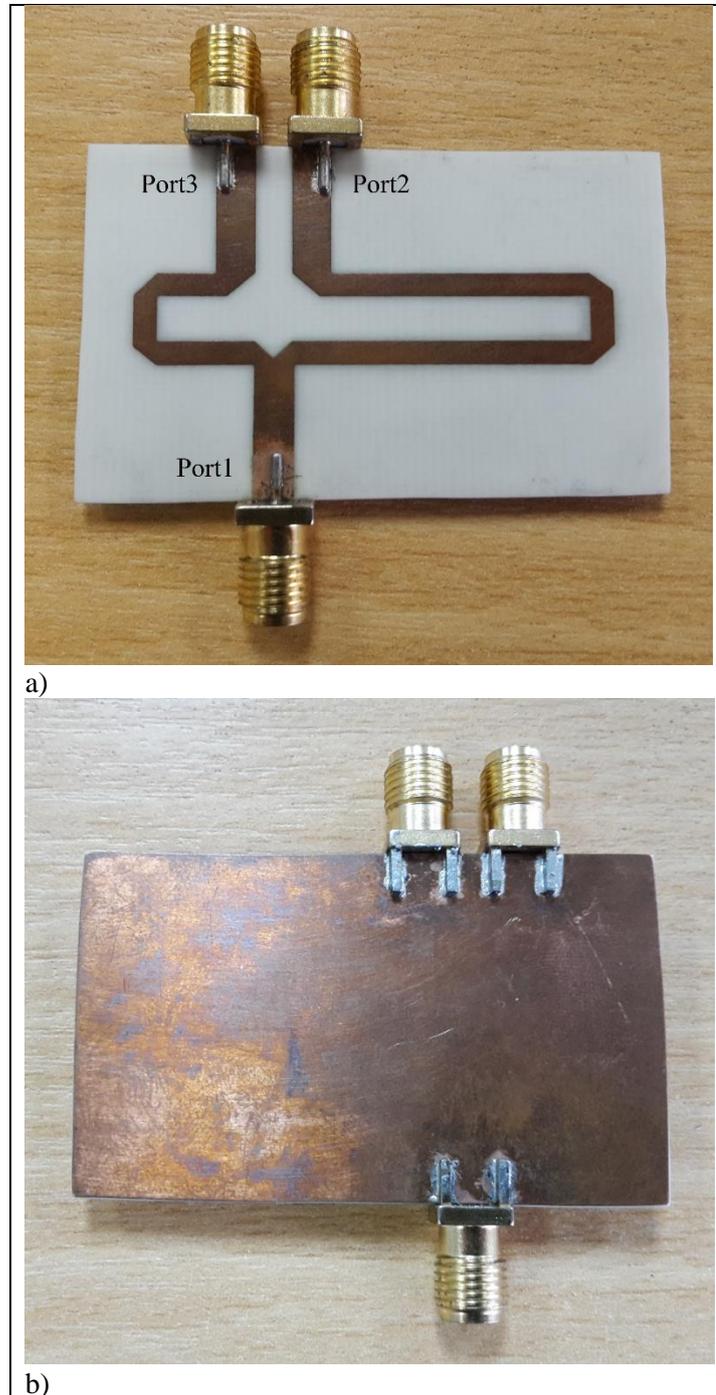
Para la etapa de implementación se debe exportar el archivo a AUTOCad (Ver Figura 24-3) con la extensión .dxf seleccionando el diseño en la capa de señal como se indica en la Figura 16-3 del apartado anterior. Las unidades deben ser en milímetros y con escala de 1:1. El procedimiento de la etapa de revelado del diseño en la placa de Roger es el mismo para todos los diseños, siendo este el de foto transferencia y aplicando una mezcla de Ácido clorhídrico con agua oxigenada para retirar el exceso del sustrato.



**Figura 24-3:** Resultado final del diseño 2 de balun microstrip en .dxf AutoCAD.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

Por último, en la Figura 25-3 se muestra el diseño 2 de balun implementado con tecnología microstrip para trabajar en la frecuencia central de 2,4 GHz, con un acople de impedancia a  $50\Omega$  tanto en la entrada como en la salida y un ancho de banda de 0.36 GHz.



**Figura 25-3:** Implementación del diseño 2 de Balun microstrip a 2,4 GHz. (a) Vista frontal (b) Vista posterior.

Fuente: Parreño Gabriel, 2019

### 3.2.2.2. Diseño de pistas para implementar Baluns con tecnología MMIC

Para el desarrollo de este apartado se ha visto en la necesidad de buscar Baluns en circuitos integrados monolíticos para trabajar en microondas MMIC de banda ancha, los cuales nos brinden bajas pérdidas, bajo desbalance de amplitud, bajo desbalance de fase y que además trabaje con rangos de potencias de alrededor de 2W con lo que estaría soportando la mayoría de las tecnologías inalámbricas de hoy en día para aplicaciones de banda estrecha. Es por esto por lo que se ha decidido implementar los Baluns MMIC en los modelos MTX2-73+ y MTX2-143+ los cuales cumplen con los requerimientos planteados.

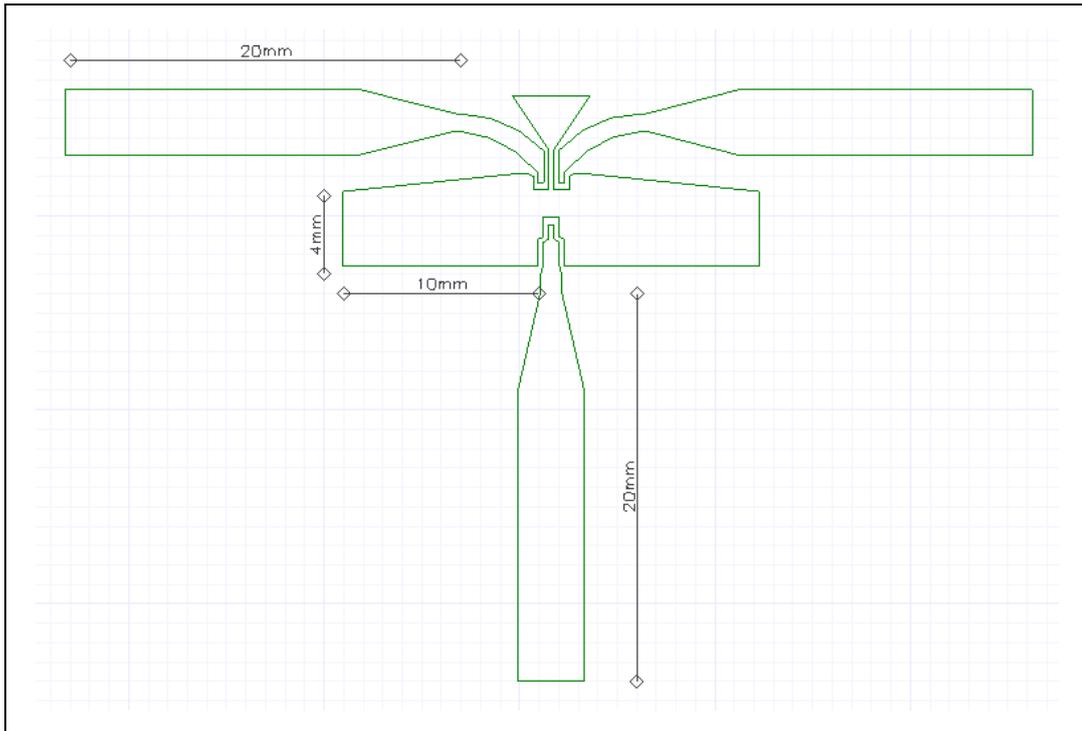
Utilizando la herramienta Ansoft Designer se procede a realizar el diseño de las pistas las cuales son mostradas como sugerencia en el datasheet de los modelos MTX2-73+ (Ver Anexo B) y MTX2-143+ (Ver Anexo C), las cuales han sido adaptadas al material Roger RO4003C. Los diseños han sido modificados en los puntos a tierra para una mejor manipulación del dispositivo en la implementación también el ancho de las pistas de los puertos de entrada y salida están modificados para acoplarlos a  $50\Omega$  de acuerdo con las características del material utilizado para la implementación.

#### 3.2.2.2.1. Balun de 2 a 7 GHz (MTX2-73+)

En la Figura 26-3 se puede ver un acercamiento de la vista superior del diseño de las pistas para Balun MMIC de 2 a 7 GHz. Nótese que los puertos de excitación no son añadidos ya que no se procederá a realizar una simulación del dispositivo. Los resultados de las mediciones serán analizados en el capítulo siguiente.

En la Figura 27-3 se puede ver las coordenadas cartesianas de los 16 puntos para el puerto de entrada *Port1*. En las Figuras 28-3 y 29-3 se muestra las coordenadas cartesianas para los 14 puntos de los puertos de salida *Port2* y *Port3* junto con los arcos, para el *Port2* del punto 3 al 4 y del punto 9 al 10, para el *Port3* los arcos son del punto 3 al 4 y del punto 11 al 12. Las coordenadas cartesianas de los puntos 0 al 25 para el puesto a tierra se puede ver en la Figura 30-3.

Para este diseño en particular se incluye una línea de prueba acoplada a  $50\Omega$  para verificar el correcto funcionamiento del equipo generador de señales Anritsu MG3690C antes de inyectar la señal en el *Port1*, y así tomar las medidas correctamente. Las coordenadas cartesianas de los puntos A y B de la línea de prueba se muestran en la Figura 31-3.



**Figura 26-3:** Vista superior del diseño de las pistas para implementar Balun de 2 a 7 GHz con tecnología MMIC.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project3 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Footprint | Layout Displays

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Pt0	-0.0840000000000001 .-24	mm	-0.0840000000000001mm . -24mm
Pt1	3.304 .-24	mm	3.304mm . -24mm
Pt2	3.304 .-9	mm	3.304mm . -9mm
Pt3	2.1688 .-4	mm	2.1688mm . -4mm
Pt4	2.1688 .-3.144	mm	2.1688mm . -3.144mm
Pt5	2.045 .-2.6106	mm	2.045mm . -2.6106mm
Pt6	2.045 .-1.3914	mm	2.045mm . -1.3914mm
Pt7	1.7624 .-1.2136	mm	1.7624mm . -1.2136mm
Pt8	1.7624 .-0.475	mm	1.7624mm . -0.475mm
Pt9	1.4576 .-0.475	mm	1.4576mm . -0.475mm
Pt10	1.4576 .-1.2136	mm	1.4576mm . -1.2136mm
Pt11	1.175 .-1.3914	mm	1.175mm . -1.3914mm
Pt12	1.175 .-2.6106	mm	1.175mm . -2.6106mm
Pt13	1.0512 .-3.144	mm	1.0512mm . -3.144mm
Pt14	1.0512 .-4	mm	1.0512mm . -4mm
Pt15	-0.0840000000000001 .-9	mm	-0.0840000000000001mm . -9mm

Show Hidden

Aceptar Cancelar

**Figura 27-3:** Coordenadas cartesianas del puerto 1 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project3 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Footprint | Layout Displays

Name	Value	Unit	Evaluated Value	De ^
Negative	<input type="checkbox"/>			
Pt0	-23.23 , 3.126	mm	-23.23mm , 3.126mm	
Pt1	-8.23 , 3.126	mm	-8.23mm , 3.126mm	
Pt2	-3.25541018269524 , 4.37362712618003	mm	-3.25541018269524mm , 4.3736271261800...	
Pt3	-3.02416411980817 , 4.35117054974562	mm	-3.02416411980817mm , 4.3511705497456...	
ArcHeight 3-4	0.423412180231007	mm	0.423412180231007mm	
Pt4	0.82336773677701 , 2.3382615066891	mm	0.82336773677701mm , 2.3382615066891...	
Pt5	0.9276 , 2.21540867288127	mm	0.9276mm , 2.21540867288127mm	
Pt6	0.9276 , 1.725	mm	0.9276mm , 1.725mm	
Pt7	1.2324 , 1.725	mm	1.2324mm , 1.725mm	
Pt8	1.2324 , 3.347	mm	1.2324mm , 3.347mm	
Pt9	1.19526984392825 , 3.38410728796393	mm	1.19526984392825mm , 3.38410728796393...	
ArcHeight 9-10	-0.457037632401949	mm	-0.457037632401949mm	
Pt10	-2.99281799697733 , 5.24989681637144	mm	-2.99281799697733mm , 5.2498968163714...	
Pt11	-3.23001525363125 , 5.25671383564761	mm	-3.23001525363125mm , 5.2567138356476...	
Pt12	-8.23 , 6.514	mm	-8.23mm , 6.514mm	
Pt13	-23.23 , 6.514	mm	-23.23mm , 6.514mm	

Show Hidden

Aceptar Cancelar

**Figura 28-3:** Coordenadas cartesianas del puerto 2 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project3 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Footprint | Layout Displays

Name	Value	Unit	Evaluated Value	De ^
Negative	<input type="checkbox"/>			
Pt0	1.9876 , 1.725	mm	1.9876mm , 1.725mm	
Pt1	2.2924 , 1.725	mm	2.2924mm , 1.725mm	
Pt2	2.2924 , 2.22017158426158	mm	2.2924mm , 2.22017158426158mm	
Pt3	2.39152726796884 , 2.34296770390592	mm	2.39152726796884mm , 2.34296770390592mm	
ArcHeight 3-4	0.454713747687825	mm	0.454713747687825mm	
Pt4	6.25185779490127 , 4.35056901806098	mm	6.25185779490127mm , 4.35056901806098mm	
Pt5	6.46830562280744 , 4.3651976462342	mm	6.46830562280744mm , 4.3651976462342mm	
Pt6	11.23 , 3.116	mm	11.23mm , 3.116mm	
Pt7	26.23 , 3.116	mm	26.23mm , 3.116mm	
Pt8	26.23 , 6.504	mm	26.23mm , 6.504mm	
Pt9	11.23 , 6.504	mm	11.23mm , 6.504mm	
Pt10	6.45028011181713 , 5.2490735440022	mm	6.45028011181713mm , 5.2490735440022mm	
Pt11	6.2360785645522 , 5.24999767338619	mm	6.2360785645522mm , 5.24999767338619mm	
ArcHeight 11-12	-0.498146187226045	mm	-0.498146187226045mm	
Pt12	2.0271762484175 , 3.38499163112557	mm	2.0271762484175mm , 3.38499163112557mm	
Pt13	1.9876 , 3.3272	mm	1.9876mm , 3.3272mm	

Show Hidden

Aceptar Cancelar

**Figura 29-3:** Coordenadas cartesianas del puerto 3 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Descripción
Pt0	-9.05401 .-2.6106	mm	-9.05401mm .-2.6106mm	
Pt1	0.9449 .-2.6106	mm	0.9449mm .-2.6106mm	
Pt2	0.9449 .-1.2136	mm	0.9449mm .-1.2136mm	
Pt3	1.214 .-1.0866	mm	1.214mm .-1.0866mm	
Pt4	1.214 .-0.075	mm	1.214mm .-0.075mm	
Pt5	2 .-0.075	mm	2mm .-0.075mm	
Pt6	2 .-1.0866	mm	2mm .-1.0866mm	
Pt7	2.274 .-1.2136	mm	2.274mm .-1.2136mm	
Pt8	2.274 .-2.6106	mm	2.274mm .-2.6106mm	
Pt9	12.274 .-2.6106	mm	12.274mm .-2.6106mm	
Pt10	12.274 .1.25	mm	12.274mm .1.25mm	
Pt11	3.219 .2.185	mm	3.219mm .2.185mm	
Pt12	2.8099 .2.185	mm	2.8099mm .2.185mm	
Pt13	2.5225 .2.03	mm	2.5225mm .2.03mm	
Pt14	2.5225 .1.325	mm	2.5225mm .1.325mm	
Pt15	1.7614 .1.325	mm	1.7614mm .1.325mm	
Pt16	1.7614 .3.4271	mm	1.7614mm .3.4271mm	
Pt17	3.61 .6.2	mm	3.61mm .6.2mm	
Pt18	-0.39 .6.2	mm	-0.39mm .6.2mm	
Pt19	1.4566 .3.4301	mm	1.4566mm .3.4301mm	
Pt20	1.4566 .1.325	mm	1.4566mm .1.325mm	
Pt21	0.6975 .1.325	mm	0.6975mm .1.325mm	
Pt22	0.6975 .2.03	mm	0.6975mm .2.03mm	
Pt23	0.41 .2.185	mm	0.41mm .2.185mm	
Pt24	0 .2.185	mm	0mm .2.185mm	
Pt25	-9.05401 .1.25	mm	-9.05401mm .1.25mm	

**Figura 30-3:** Coordenadas cartesianas del puesto a tierra para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.

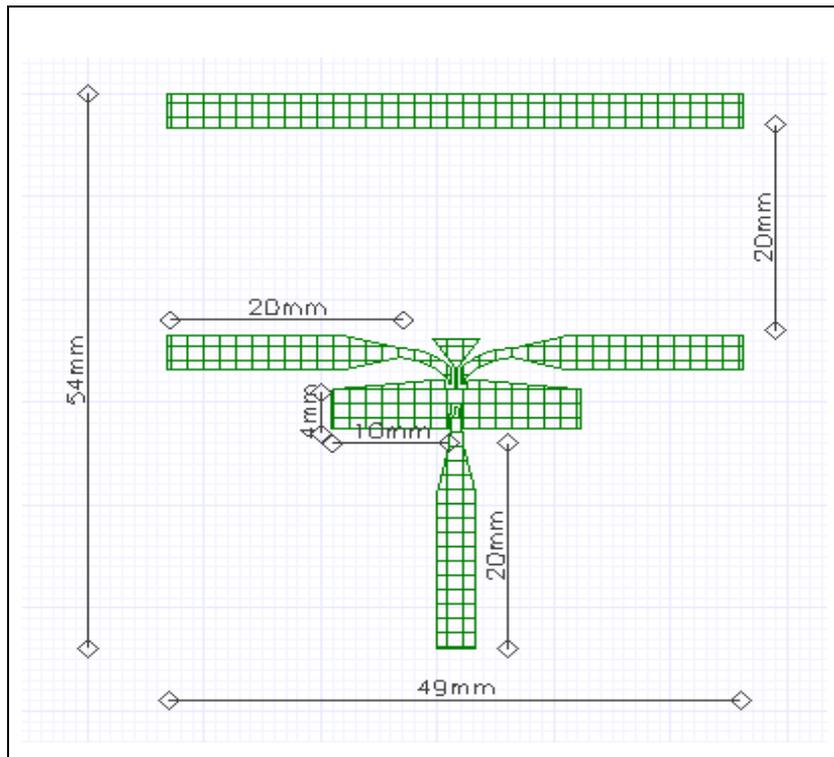
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Name	Value	Unit	Evaluated Value
LineWi...	0	mm	0mm
Negative	<input type="checkbox"/>		
2 pt De...	<input checked="" type="checkbox"/>		
Pt A	-6.5 - 10.5 -6.23 .30	mm	-23.23mm .30mm
Pt B	9.5 + 10.5 +6.23 .26.612	mm	26.23mm .26.612mm
Angle	0	deg	0deg

**Figura 31-3:** Coordenadas cartesianas de la línea de prueba para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-73+.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

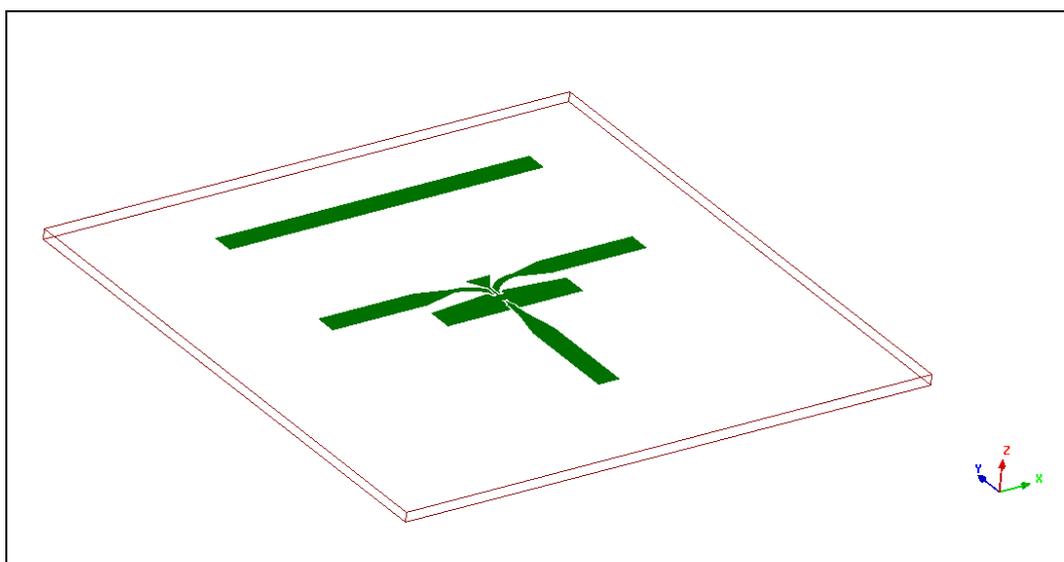
El diseño completo de las pistas para implementar con balun MMIC de 2 a 7 GHz se puede ver en la Figura 32-3, el cual resulta de un tamaño bastante compacto a pesar de los 20mm añadidos por la separación de la línea de prueba.



**Figura 32-3:** Diseño de pistas de balun MMIC MTX2-73+ a frecuencias de 2 a 7 GHz.

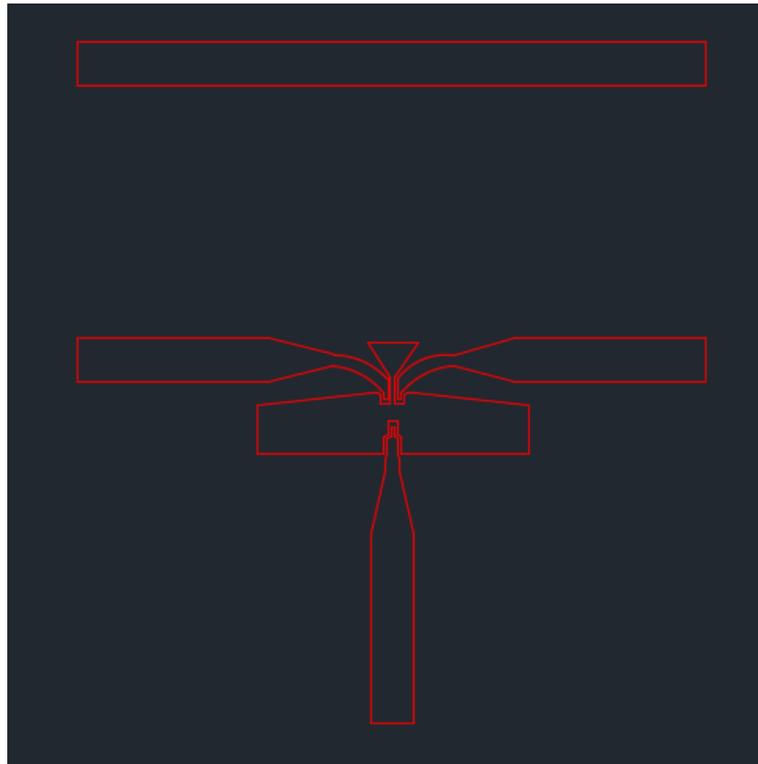
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

En la Figura 33-3 se muestra en perspectiva el diseño de las pistas para implementar con el balun MMIC MTX2-73+, el cual una vez habiendo sido finalizado se debe exportar a AutoCAD (Ver Figura 34-3) con extensión .dxf cuidando de que todas las medidas estén expresadas en milímetros (mm) y con escala de 1:1 para su posterior implementación.



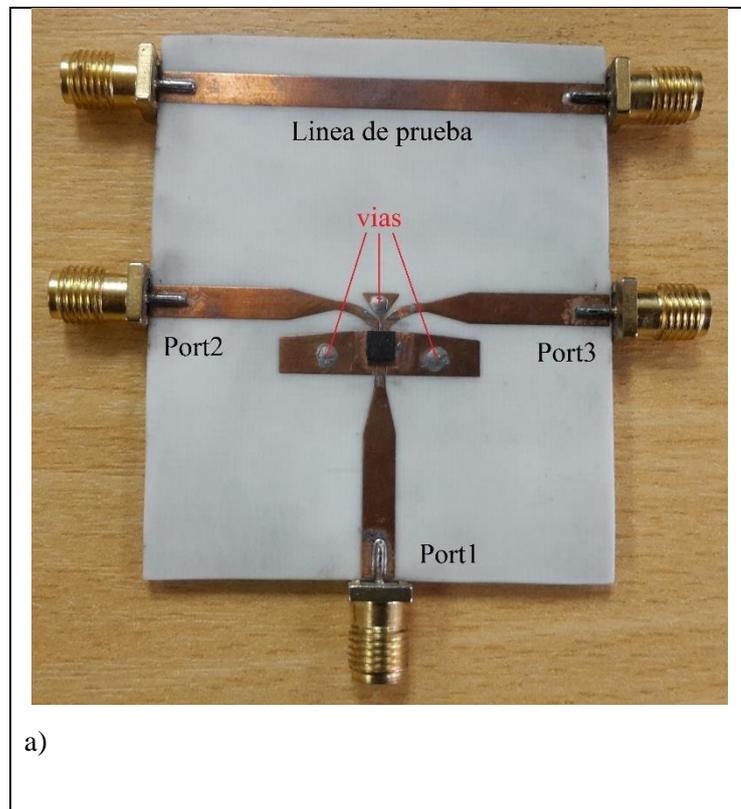
**Figura 33-3:** Vista en 3D del diseño de pistas para balun MMIC MTX2-73+.

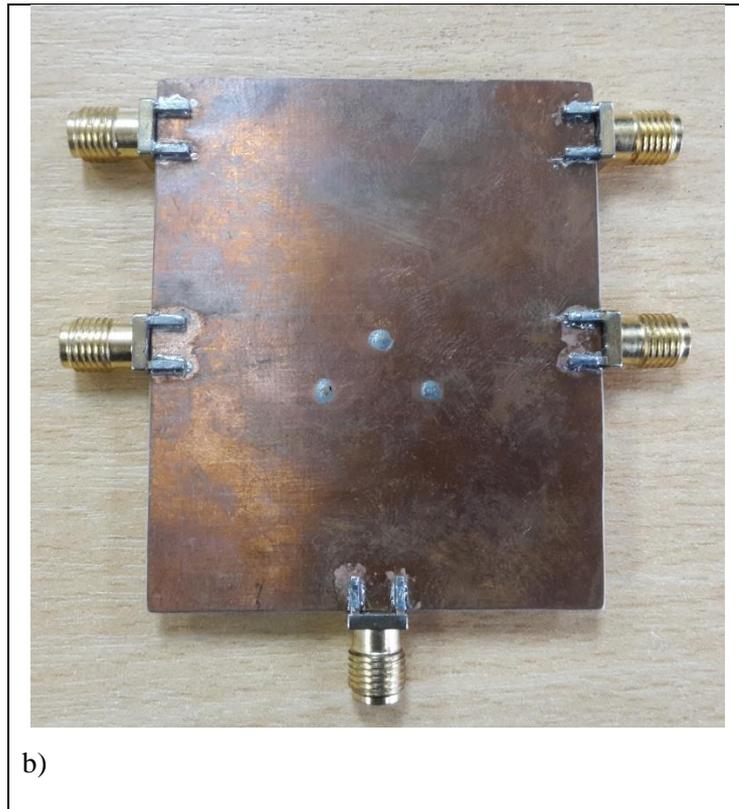
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 34-3:** Resultado final del diseño de pistas para balun MMIC MTX2-73+ con extensión .dxf AutoCAD.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019





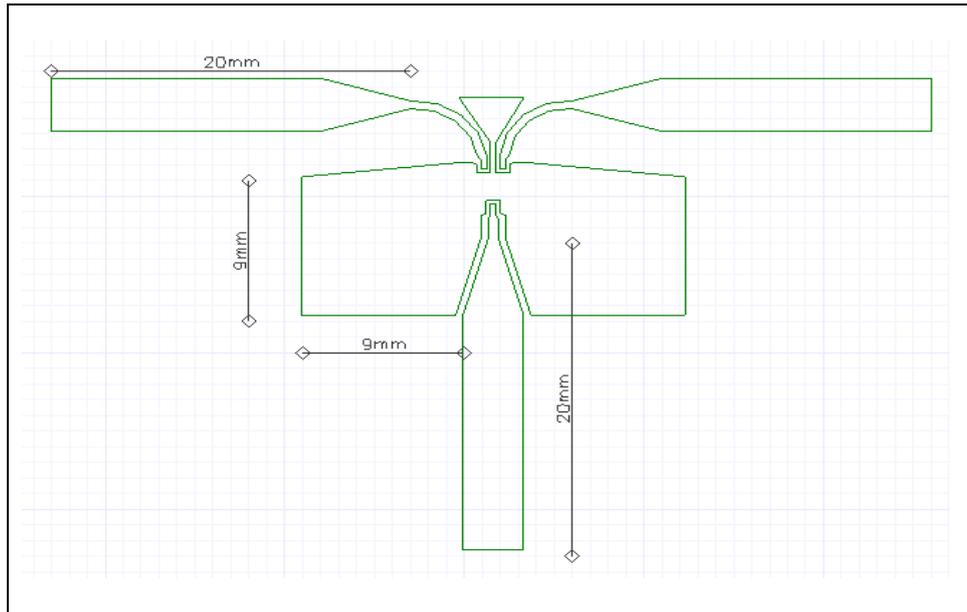
**Figura 35-3:** Implementación de Balun MMIC MTX2-73+ para trabajar de 2 a 7 GHz. a) Vista frontal b) Vista posterior.

**Fuente:** Parreño Gabriel, 2019

Finalmente, en la Figura 35-3 se puede ver implementado el Balun MMIC MTX2-73+ que opera en el rango de frecuencias de 2 a 7 GHz, en el cual además de soldar el circuito integrado se sueldan conectores de tramo final SMA hembra a  $50\Omega$  y las vías (Ver Figura 35-3(a)) las cuales conectan los puntos de tierra frontales con el plano de tierra posterior.

#### 3.2.2.2.2. Balun de 5.5 a 13.5 GHz (MTX2-143+)

En la Figura 36-3 se muestra una vista frontal del diseño de las pistas para Balun de 5.5 a 13.5 GHz, consta de tres puertos de entrada y salida *Port1*, *Port2*, y *Port3* respectivamente los cuales están acoplados a  $50\Omega$ , los puertos de excitación no se añaden ya que no será simulado los resultados de las mediciones serán analizados en el siguiente capítulo. El diseño es bastante compacto por lo que permite una manipulación fluida.



**Figura 36-3:** Vista superior del diseño de las pistas para implementar Balun de 5.5 a 13.5 GHz con tecnología MMIC.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project4 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Footprint | Layout Displays

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Net	---		
LineWi...	0	mm	0mm
Negative	<input type="checkbox"/>		
Pt0	-0.0840000000000001 .-22.6106	mm	-0.0840000000000001mm .-22.6106mm
Pt1	3.304 .-22.6106	mm	3.304mm .-22.6106mm
Pt2	3.304 .-7.6106	mm	3.304mm .-7.6106mm
Pt3	1.8672 .-2.6106	mm	1.8672mm .-2.6106mm
Pt4	1.8672 .-1.3914	mm	1.8672mm .-1.3914mm
Pt5	1.7624 .-1.2136	mm	1.7624mm .-1.2136mm
Pt6	1.7624 .-0.475	mm	1.7624mm .-0.475mm
Pt7	1.4576 .-0.475	mm	1.4576mm .-0.475mm
Pt8	1.4576 .-1.2136	mm	1.4576mm .-1.2136mm
Pt9	1.3528 .-1.3914	mm	1.3528mm .-1.3914mm
Pt10	1.3528 .-2.6106	mm	1.3528mm .-2.6106mm
Pt11	-0.0840000000000001 .-7.6106	mm	-0.0840000000000001mm .-7.6106mm

Show Hidden

Aceptar Cancelar

**Figura 37-3:** Coordenadas cartesianas del puerto 1 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Las coordenadas cartesianas de los 12 puntos para el puerto de entrada *Port1* se muestran en la Figura 37-3 los cuales están expresados en milímetros (mm), en las Figuras 38-3 y 39-3 se muestran las coordenadas cartesianas de los puntos y arcos de los puertos de salida *Port2* y *Port3*.

Properties: Project4 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Footprint | Layout Displays

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Negative	<input type="checkbox"/>		
Pt0	-23 , 4.1535	mm	-23mm , 4.1535mm
Pt1	-8 , 4.1535	mm	-8mm , 4.1535mm
Pt2	-3 , 5.5945	mm	-3mm , 5.5945mm
Pt3	-3 , 5.59455092041526	mm	-3mm , 5.59455092041526mm
ArcHeight 3-4	0.961951526977606	mm	0.961951526977606mm
Pt4	0.736414505368416 , 2.5671454610827	mm	0.736414505368416mm , 2.5671454610827mm
Pt5	0.736473784621871 , 2.56669328301322	mm	0.736473784621871mm , 2.56669328301322mm
Pt6	0.736779526069526 , 2.56673281361202	mm	0.736779526069526mm , 2.56673281361202mm
Pt7	0.9276 , 2.35101467575999	mm	0.9276mm , 2.35101467575999mm
Pt8	0.9276 , 1.725	mm	0.9276mm , 1.725mm
Pt9	1.2324 , 1.725	mm	1.2324mm , 1.725mm
Pt10	1.2324 , 2.63037544867396	mm	1.2324mm , 2.63037544867396mm
Pt11	1.22901065754988 , 2.63037544867396	mm	1.22901065754988mm , 2.63037544867396mm
Pt12	1.23234621537813 , 2.63080671698678	mm	1.23234621537813mm , 2.63080671698678mm
ArcHeight 12-13	-1.08720624384833	mm	-1.08720624384833mm
Pt13	-3.0026656658328 , 6.09577117712543	mm	-3.0026656658328mm , 6.09577117712543mm
Pt14	-8 , 7.5415	mm	-8mm , 7.5415mm
Pt15	-23 , 7.5415	mm	-23mm , 7.5415mm

Show Hidden

Aceptar Cancelar

**Figura 38-3:** Coordenadas cartesianas del puerto 2 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Properties: Project4 - PlanarEM1 - PlanarEM1

Footprint | Layout Displays

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name	poly_8306		
PlacementLayer	sen		
Net	---		
LineWidth	0	mm	0mm
Negative	<input type="checkbox"/>		
Pt0	1.9876 , 1.725	mm	1.9876mm , 1.725mm
Pt1	2.2924 , 1.725	mm	2.2924mm , 1.725mm
Pt2	2.2924 , 2.35853321313494	mm	2.2924mm , 2.35853321313494mm
Pt3	2.48656135994267 , 2.59660878169477	mm	2.48656135994267mm , 2.59660878169477mm
ArcHeight 3-4	0.975365665757101	mm	0.975365665757101mm
Pt4	6.00298394314088 , 5.59913674524934	mm	6.00298394314088mm , 5.59913674524934mm
Pt5	11 , 4.1535	mm	11mm , 4.1535mm
Pt6	26 , 4.1535	mm	26mm , 4.1535mm
Pt7	26 , 7.5415	mm	26mm , 7.5415mm
Pt8	11 , 7.5415	mm	11mm , 7.5415mm
Pt9	6.0167395557309 , 6.09984275347295	mm	6.0167395557309mm , 6.09984275347295mm
ArcHeight 9-10	-1.11461098454128	mm	-1.11461098454128mm
Pt10	1.9877027266106 , 2.63037544867396	mm	1.9877027266106mm , 2.63037544867396mm
Pt11	1.9876 , 2.63037544867396	mm	1.9876mm , 2.63037544867396mm

Show Hidden

Aceptar Cancelar

**Figura 39-3:** Coordenadas cartesianas del puerto 3 para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

En las Figuras 40-3 y 41-3 se muestran las coordenadas cartesianas para los 28 puntos del plano frontal de puesta a tierra en Microstrip.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Pt0	-9.05401 , -7.6106	mm	-9.05401mm , -7.6106mm
Pt1	-0.4919 , -7.6106	mm	-0.4919mm , -7.6106mm
Pt2	0.9449 , -2.6106	mm	0.9449mm , -2.6106mm
Pt3	0.9449 , -1.2136	mm	0.9449mm , -1.2136mm
Pt4	1.214 , -1.0866	mm	1.214mm , -1.0866mm
Pt5	1.214 , -0.2718	mm	1.214mm , -0.2718mm
Pt6	2 , -0.2718	mm	2mm , -0.2718mm
Pt7	2 , -1.0866	mm	2mm , -1.0866mm
Pt8	2.274 , -1.2136	mm	2.274mm , -1.2136mm
Pt9	2.274 , -2.6106	mm	2.274mm , -2.6106mm
Pt10	3.7119 , -7.6106	mm	3.7119mm , -7.6106mm
Pt11	12.274 , -7.6106	mm	12.274mm , -7.6106mm
Pt12	12.274 , 1.25	mm	12.274mm , 1.25mm
Pt13	3.219 , 2.185	mm	3.219mm , 2.185mm

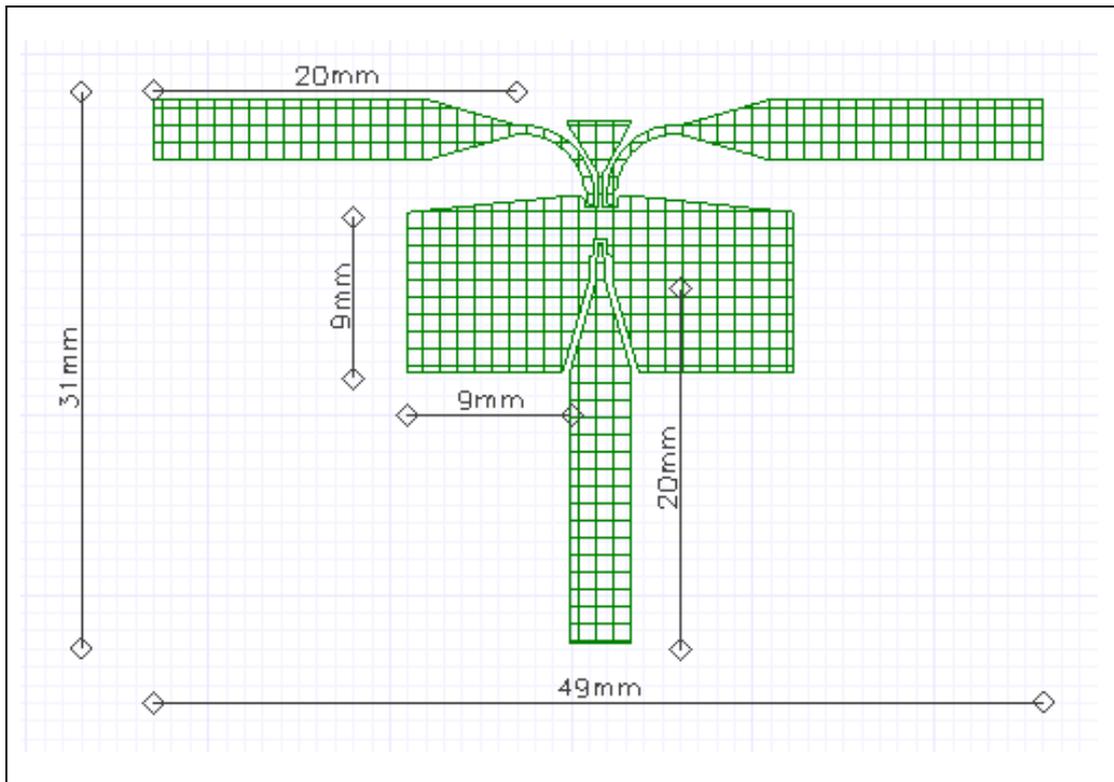
**Figura 40-3:** Coordenadas cartesianas de los puntos 0 al 13 del puesto a tierra para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Pt14	2.8099 , 2.185	mm	2.8099mm , 2.185mm
Pt15	2.5225 , 2.03	mm	2.5225mm , 2.03mm
Pt16	2.5225 , 1.5218	mm	2.5225mm , 1.5218mm
Pt17	1.7614 , 1.5218	mm	1.7614mm , 1.5218mm
Pt18	1.7614 , 3.47771597633136	mm	1.7614mm , 3.47771597633136mm
Pt19	3.3 , 6.3	mm	3.3mm , 6.3mm
Pt20	-0.3 , 6.3	mm	-0.3mm , 6.3mm
Pt21	1.4566 , 3.44897382198953	mm	1.4566mm , 3.44897382198953mm
Pt22	1.4566 , 1.5218	mm	1.4566mm , 1.5218mm
Pt23	0.6975 , 1.5218	mm	0.6975mm , 1.5218mm
Pt24	0.6975 , 2.03	mm	0.6975mm , 2.03mm
Pt25	0.41 , 2.185	mm	0.41mm , 2.185mm
Pt26	0 , 2.185	mm	0mm , 2.185mm
Pt27	-9.05401 , 1.25	mm	-9.05401mm , 1.25mm

**Figura 41-3:** Coordenadas cartesianas de los puntos 14 al 27 del puesto a tierra para el diseño de pistas del Balun MMIC MTX2-143+.

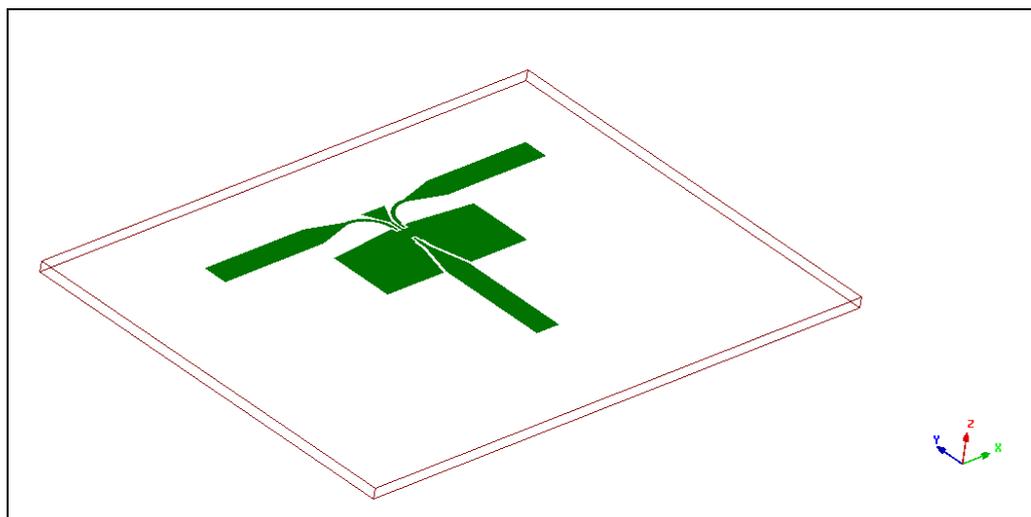
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 42-3:** Diseño de pistas de balun MMIC MTX2-143+ a frecuencias de 5.5 a 13.5 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

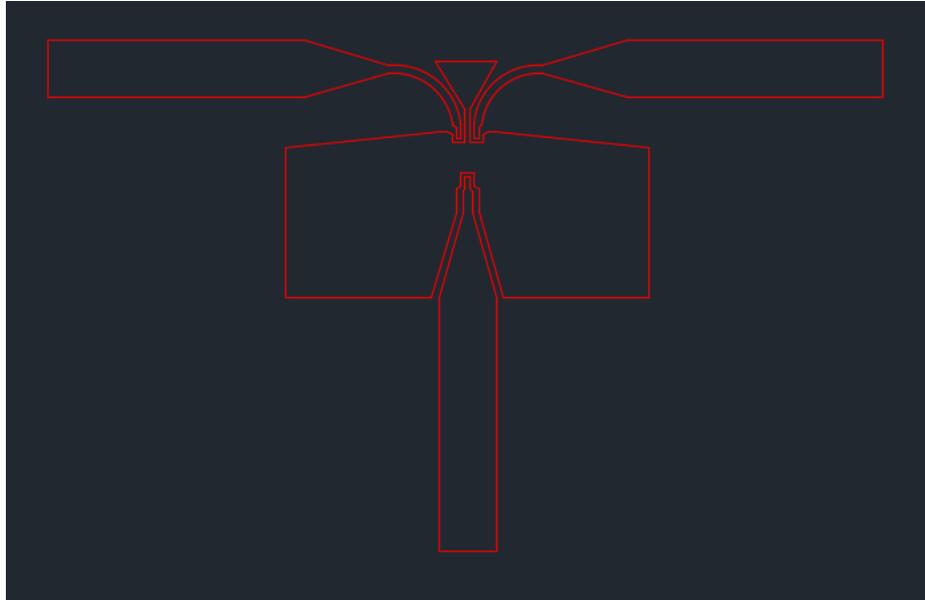
El diseño terminado de las pistas para implementar con el balun MMIC MTX2-143+ se puede ver en la Figura 42-3, el cual irá a trabajar en el rango de 5.5 a 13.5 GHz, sus dimensiones totales son de 31x49 mm. En la Figura 43-3 se muestra en perspectiva el diseño final junto con el dieléctrico de material Roger RO4003.



**Figura 43-3:** Vista en 3D del diseño de pistas para balun MMIC MTX2-143+.

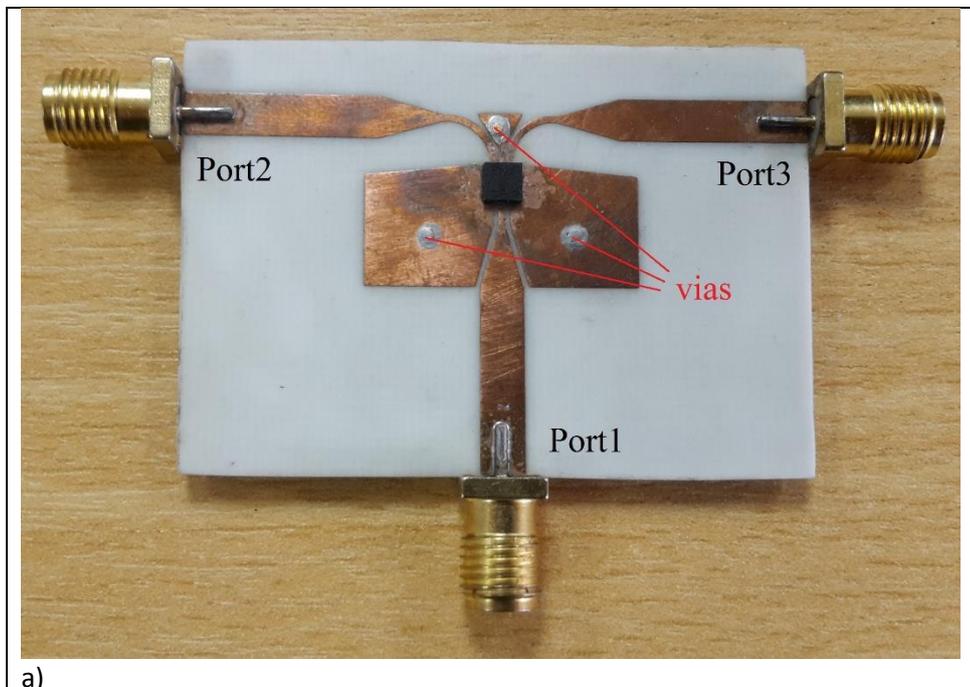
**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

Para la etapa de implementación el diseño se exporta con extensión .dxf a AutoCAD el cual se puede ver en la Figura 44-3, quedando listo para el proceso de foto transferencia a la placa.



**Figura 44-3:** Resultado final del diseño de pistas para balun MMIC MTX2-143+ con extensión .dxf AutoCAD.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019





**Figura 45-3:** Implementación de Balun MMIC MTX2-143+ para trabajar de 5.5 a 13.5 GHz. a) Vista frontal b) Vista posterior.

**Fuente:** Parreño Gabriel, 2019

Una vez la foto transferencia se ha completado se procede al revelado de la placa y la implementación final del dispositivo soldando el circuito integrado, los conectores SMA hembra y las vías las cuales conectan el plano frontal de tierra con el plano posterior de tierra como se muestra en la Figura 45-3.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

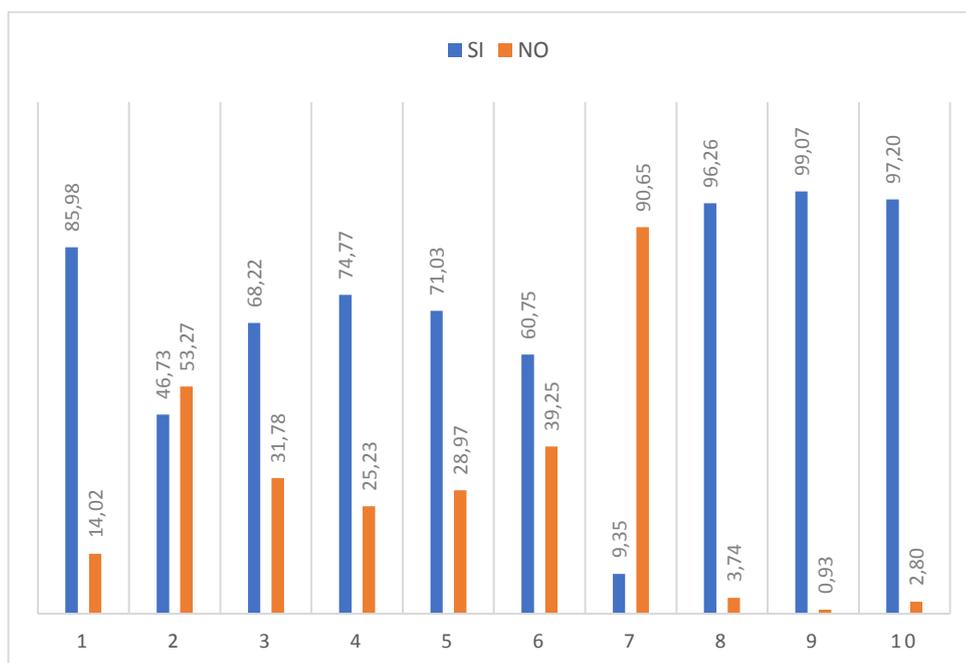
En el presente capítulo se detallan los resultados del diagnóstico para la implementación de un set de baluns de altas frecuencias con tecnologías Microstrip y MMIC en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH, el mismo que fue valorado mediante una encuesta realizada a estudiantes de la Facultad de Informática y Electrónica carrera de Ingeniería en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la ESPOCH.

Se exponen también los resultados del análisis para la selección del material con el cual se implementará los dispositivos propuestos, realizado a los materiales de Roger RO4350B y RO4003C mediante el método estadístico que fue procesado por el software Statgraphics™ Centurion.

Finalmente se realiza un análisis de comparación entre los resultados obtenidos de la simulación con el software Ansoft Designer y las mediciones realizadas en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH procesados con el software Matlab. Mediante el equipo Generador de señal RF/Microonda (TX) (Anritsu MG3692C) y el equipo Analizador de espectro (RX) (Spectrum Master™ MS2724C) se procede a realizar las mediciones del set de Baluns, el cual consta de cinco baluns con tecnología Microstrip para trabajar en la frecuencia de 2,4 GHz; cinco baluns para trabajar dentro del rango de frecuencias de 2 a 7 GHz y cinco Baluns con para trabajar dentro del rango de frecuencias de 5.5 a 13.5 GHz, con tecnología MMIC.

#### 4.1. RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO

Al valorar los resultados de la encuesta realizada a 107 estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, referente al conocimiento de laboratorios en la facultad de informática y electrónica para comunicaciones y microondas, equipos para análisis de señales, baluns de alta frecuencia, radio frecuencia y microondas. Las preguntas analizadas referente a: ¿Sabe usted si la Facultad de Informática y Electrónica de la ESPOCH cuenta con un laboratorio de comunicaciones y microondas? y ¿Los docentes les han impartido clases prácticas en laboratorios de este tipo?; dan a conocer que en su mayoría los estudiantes saben de la existencia de un laboratorio de este tipo en la facultad de informática y electrónica de la ESPOCH sin embargo, menos de la mitad de estudiantes encuestados han recibido clases prácticas en laboratorios de este tipo.



**Gráfico 1-4:** Resultados de la encuesta sobre el impacto de la implementación de baluns de alta frecuencia en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

En preguntas como: ¿Conoce los equipos para análisis de señales disponibles actualmente en el laboratorio de la FIE-ESPOCH? y ¿Ha utilizado estos equipos disponibles actualmente en la facultad para el análisis de señales?; La mayoría de los estudiantes responden positivamente, dando a conocer que saben de la existencia de los equipos para análisis de señales que existen actualmente en el laboratorio de comunicaciones y microondas y los han utilizado posiblemente por su cuenta o también realizando practicas con alguno de sus docentes según las respuestas de la pregunta número 2 (Ver Gráfico 1-4 y Anexo A), también hay un porcentaje bastante preocupante en cuanto a la negatividad de los estudiantes conforme a las respuestas de las interrogantes expuestas según lo evidencia el Gráfico 1-4.

En las preguntas: ¿Conoce usted lo que es la radiofrecuencia y las microondas? y ¿Conoce acerca de los dispositivos que se pueden diseñar para trabajar en altas frecuencias?; ¿Conoce usted lo que es un BALUN de alta frecuencia?; ¿Le gustaría conocer el funcionamiento de este tipo de dispositivos?; ¿Le gustaría que el laboratorio de la facultad cuente con este tipo de dispositivos para realizar sus prácticas complementarias al aprendizaje teórico? y ¿Cree usted que realizar prácticas con este tipo de dispositivos complementaria sus conocimientos teóricos?; los estudiantes evidencian que más de la mitad conoce lo que es la radio frecuencia y las microondas y que también conocen cuales son los dispositivos que se pueden diseñar para trabajar en altas

frecuencias, sin embargo es evidente en base a sus respuestas de la pregunta 7 (Ver Gráfico 1-4 y Anexo A), que un 90.65% no conoce lo que es un Balun de alta frecuencia y que la mayoría de los estudiantes encuestados quisieran conocerlo, además que les gustaría que el laboratorio de informática y electrónica de la FIE-ESPOCH cuente con este tipo de dispositivos porque así podrían realizar sus prácticas complementarias al conocimiento teórico lo cual es muy importante para su desarrollo académico según sus respuestas a las preguntas 8,9 y 10; tal como se evidencia en el Gráfico 1-4.

## 4.2. RESULTADOS DE LA SELECCIÓN DEL MATERIAL

### 4.2.1. Análisis para el material ROGER RO4350B

Resultados estadísticos sobre el efecto del rendimiento eléctrico de material según factores y niveles arrojaron valores de coeficiente térmico entre 50 y 60 ppm/°C para los dos niveles de constante dieléctrica (en la fabricación) de 3.470 y 3.490, incorporada la permitividad relativa (en el diseño) de 3.650 a 3.670 y el factor de disipación tangencial para el nivel bajo 0.00360 y 0.00380 para el nivel alto según la Tabla 1-4.

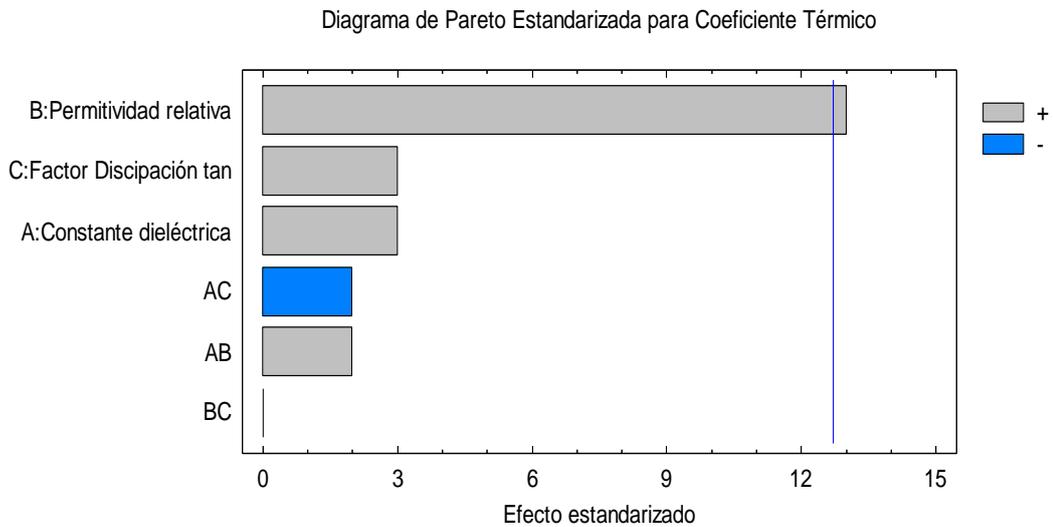
**Tabla 1-4:** Valores de coeficiente térmico en dos niveles de incorporación para RO4350B

BLOQUE	Constante dieléctrica	Permitividad relativa	Factor discipación tan	Coeficiente térmico ppm/°C
1	-1	-1	-1	50
1	1	-1	-1	51
1	1	1	1	55
1	-1	1	-1	53
1	-1	1	1	54
1	1	-1	1	51
1	-1	-1	1	51,5
1	1	1	-1	54,5

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

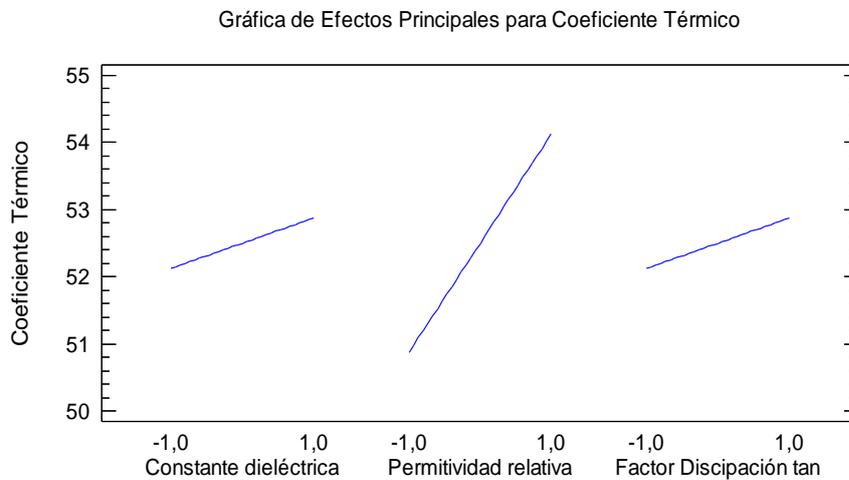
Al comparar los resultados del coeficiente térmico respecto al rendimiento eléctrico del material se puede apreciar que alcanzaron los grados de coeficiente térmico bajos con niveles bajos de constante dieléctrica (3.470) y con niveles bajos de factor de disipación tangencial (0.00360). El efecto en el rendimiento eléctrico del material es menos satisfactorio al incorporar el factor de

disipación tangencial a nivel alto (0.00380) debido a que las pérdidas dieléctricas aumentan en relación con las condiciones en las que se encuentra el material.



**Gráfico 2-4:** Significancia del factor de disipación tangencial en el rendimiento eléctrico del material RO4350B

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Gráfico 3-4:** Efectos principales para coeficiente térmico del material en función de factores para el material RO4350B

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

El Gráfico 2-4, muestra la existencia de tres variables y dos interacciones significativas en menor grado; donde la permitividad relativa es la variable de mayor significancia en la eficiencia eléctrica del material al considerar valores bajos coeficiente térmico, seguido del factor de disipación tangencial y constante dieléctrica.

En el Gráfico 3-4 también se presenta información donde se evidencia que mejores resultados para coeficiente térmico se da cuando se incorporan niveles bajos de permitividad relativa mientras que niveles bajos de constante dieléctrica y niveles bajos de factor de disipación tangencial ayudan a conseguir un mejor rendimiento eléctrico del material.

El análisis de varianza para coeficiente térmico alcanzado con el material Rogers RO4350B responde satisfactoriamente a coeficientes de regresión para una R-cuadrada 99.49% y ajustada por grados de libertad (g.l.) a 96.43% que es más adecuado para un nivel de confianza del 95.0%.

El coeficiente de regresión muestra el modelo matemático ajustado del coeficiente térmico al utilizar el material estudiado y que responde favorablemente a la variable permitividad relativa y factor de disipación tangencial incorporado a nivel bajo. Una combinación adecuada de factores y niveles permitirá la optimización del rendimiento eléctrico del material para aplicaciones de altas frecuencias. El comportamiento de la ecuación indica que la variación de la variable permitividad relativa (X2) del material incorporada con el factor de disipación tangencial (X3), es directamente proporcional al factor Coeficiente térmico (CT).

$$CT = 52,5 + 0,375*X1 + 1,625*X2 + 0,375*X3 + 0,25*X1*X2 - 0,25*X1*X3 + 0,0*X2*X3$$

Ecuación 1-4

Al incorporar niveles bajos de permitividad relativa en el diseño de dispositivos de alta frecuencia junto con los niveles bajos de constante dieléctrica introducidos por el fabricante en el material, el factor de disipación tangencial provoca que las pérdidas dieléctricas sean mínimas, por lo que el coeficiente térmico también es bajo, brindando al material un mejor rendimiento eléctrico.

#### ***4.2.2. Análisis para el material ROGER RO4003C***

Aplicando el mismo procedimiento que para el material anterior, resultados estadísticos sobre el efecto del rendimiento eléctrico de material según factores y niveles arrojaron valores de coeficiente térmico entre 40 y 45 ppm/°C para los dos niveles de constante dieléctrica (en la fabricación) de 3.370 y 3.390, incorporada la permitividad relativa (en el diseño) de 3.540 a 3.560 y el factor de disipación tangencial para el nivel bajo 0.00260 y 0.00280 para el nivel alto según la Tabla 2-4.

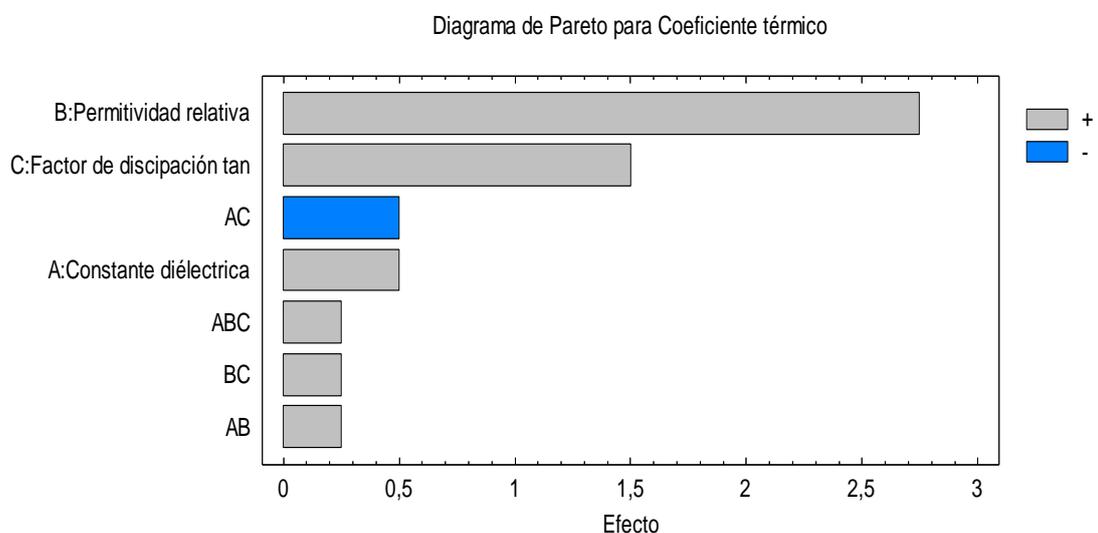
Al comparar los resultados del coeficiente térmico respecto al rendimiento eléctrico del material se puede apreciar que alcanzaron los grados de coeficiente térmico bajos con niveles bajos de constante dieléctrica (3.370) y con niveles bajos de factor de disipación tangencial (0.00260). El rendimiento eléctrico del material es menos satisfactorio al incorporar el factor de disipación tangencial a nivel alto (0.00280).

**Tabla 2-4:** Valores de coeficiente térmico en dos niveles de incorporación para RO4003C

BLOQUE	Constante dieléctrica	Permitividad relativa	Factor de discipación tan	Coeficiente térmico ppm/°C
1	1	-1	1	41,5
1	1	-1	-1	41
1	-1	1	-1	42,5
1	-1	-1	1	42
1	1	1	1	45
1	1	1	-1	43,5
1	-1	1	1	44,5
1	-1	-1	-1	40

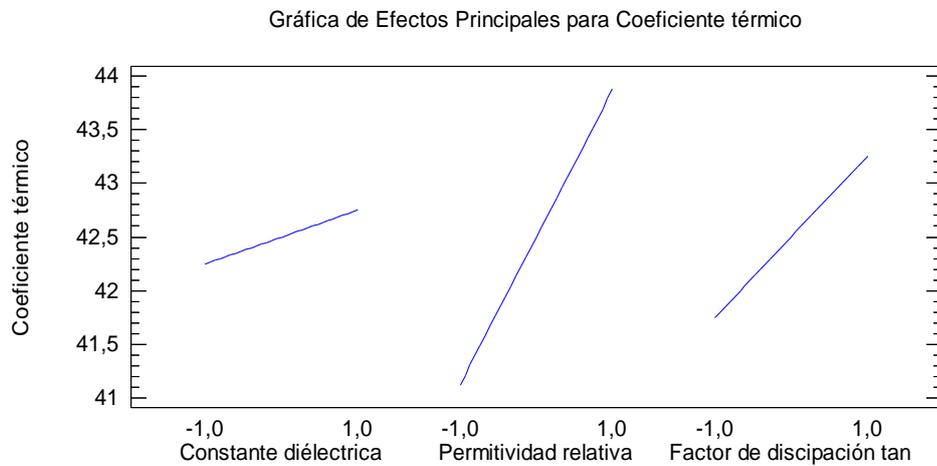
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

El Gráfico 4-4, muestra la existencia de tres variables y dos interacciones significativas en menor grado; donde la permitividad relativa es la variable de mayor significancia en la eficiencia eléctrica del material al considerar valores bajos coeficiente térmico, seguido del factor de disipación tangencial y constante dieléctrica.



**Gráfico 4-4:** Significancia del factor de disipación tangencial en el rendimiento eléctrico del material RO4003C

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Gráfico 5-4:** Efectos principales para coeficiente térmico del material en función de factores para el material RO4003C

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

En el Gráfico 5-4 también se presenta información donde se evidencia que mejores resultados para coeficiente térmico se da cuando se incorporan niveles bajos de permitividad relativa mientras que niveles bajos de constante dieléctrica y niveles bajos de factor de disipación tangencial ayudan a conseguir un mejor rendimiento eléctrico del material.

El análisis de varianza para coeficiente térmico alcanzado con el material Rogers RO4003C responde satisfactoriamente a coeficientes de regresión para una R-cuadrada del 100.0%.

El coeficiente de regresión muestra el modelo matemático ajustado del coeficiente térmico al utilizar el material estudiado y que responde favorablemente a la variable permitividad relativa y factor de disipación tangencial incorporado a nivel bajo. Una combinación adecuada de factores y niveles permitirá la optimización del rendimiento eléctrico del material para aplicaciones de altas frecuencias. El comportamiento de la ecuación indica que la variación de la variable permitividad relativa (X2) del material incorporada con el factor de disipación tangencial (X3), es directamente proporcional al factor Coeficiente térmico (CT).

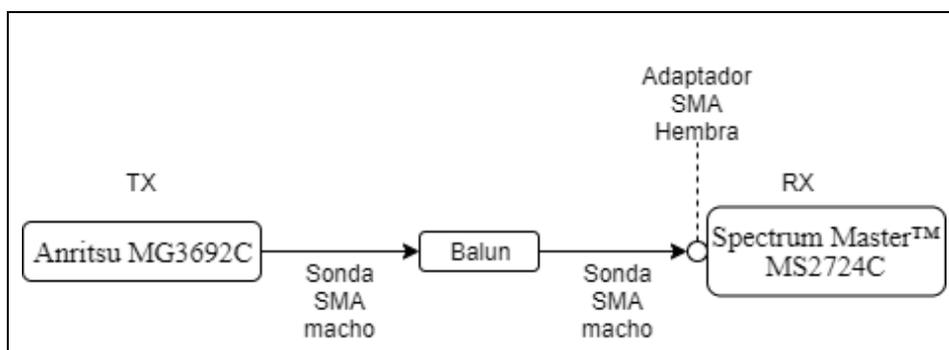
$$CT = 42,5 + 0,25*X1 + 1,375*X2 + 0,75*X3 + 0,125*X1*X2 - 0,25*X1*X3 + 0,125*X2*X3 + 0,125*X1*X2*X3$$

Ecuación 2-4

En el material Roger RO4003C los niveles bajos de permitividad relativa en el diseño junto con los niveles bajos de constante dieléctrica del proceso de fabricación del material y con un nivel de factor de disipación tangencial más bajos que el material Roger RO4350B, provocan que las pérdidas dieléctricas sean menores, por lo que el coeficiente térmico también es menor, optimizando así el rendimiento eléctrico de los dispositivos de alta frecuencia.

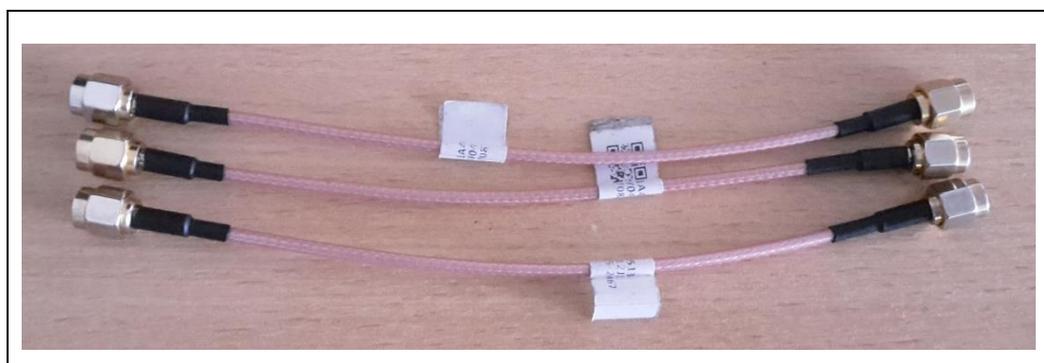
#### 4.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN

En el presente apartado se muestra la manera de conectar los dispositivos implementados con los equipos de TX y RX (Ver Figura 1-4), así como también los resultados obtenidos en la simulación del diseño de los Baluns con tecnología Microstrip con el Software Ansoft Designer y el resultado de las mediciones en el laboratorio para todos los dispositivos procesando los datos con el Software Matlab. Los materiales que no son parte del diseño, pero que también son utilizados para la medición de los dispositivos son las sondas SMA macho (Ver Figura 2-4) y el adaptador SMA hembra para el equipo de RX (Ver Figura 3-4). Antes de empezar con las mediciones de los Baluns se debe probar los equipos de TX y RX para estar seguros de su correcto funcionamiento como se muestra en la Figura 4-4.



**Figura 1-4:** Diagrama de conexión para mediciones de los Balun de alta frecuencia.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019



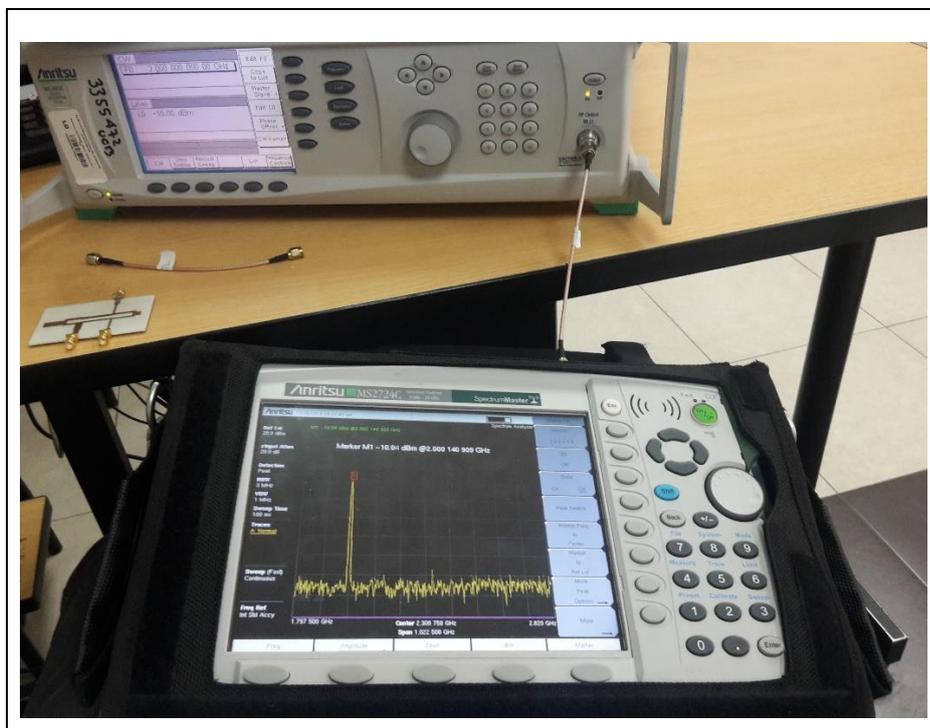
**Figura 2-4:** Sondas SMA macho 50Ω

**Fuente:** Parreño Gabriel, 2019



**Figura 3-4:** Adaptador Hembra para RX 50Ω

Fuente: Parreño Gabriel, 2019



**Figura 4-4:** Prueba de los equipos de TX y RX.

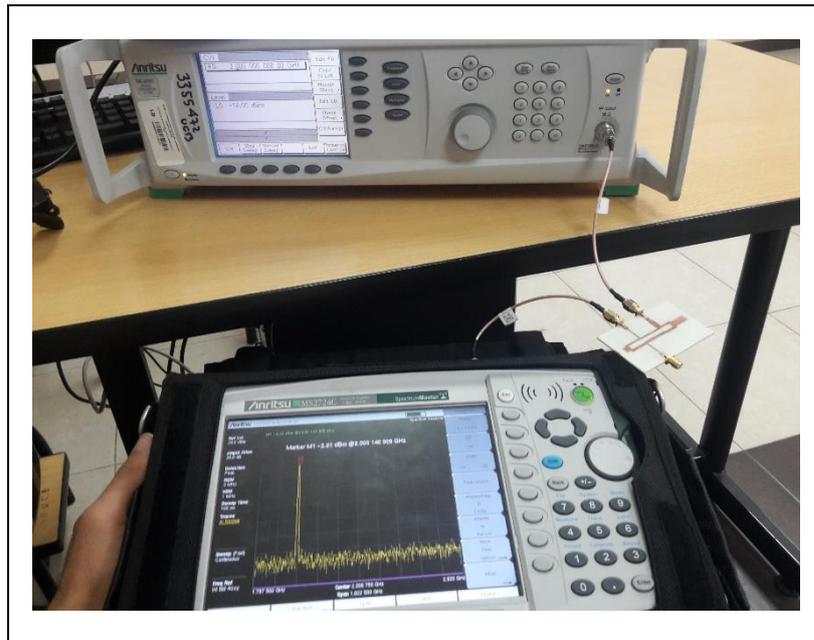
Fuente: Parreño Gabriel, 2019

#### 4.3.1. Resultados de baluns de alta frecuencia con tecnología Microstrip

A continuación, el análisis de resultados de la simulación con el software Ansoft Designer en el caso ideal y los resultados de la medición por lo cual el equipo de TX ha sido configurado con una potencia de 10 dBm y un barrido de frecuencias de 2 a 2,8 GHz con saltos de 0,02 GHz; el equipo de RX con un Span de 1,8 a 3 GHz, una atenuación de 20 dB y un nivel de referencia de 20 dBm. Los datos obtenidos de la medición serán procesados con el Software Matlab.

#### 4.3.1.1. Resultado del Diseño 1 de Balun a 2,4 GHz

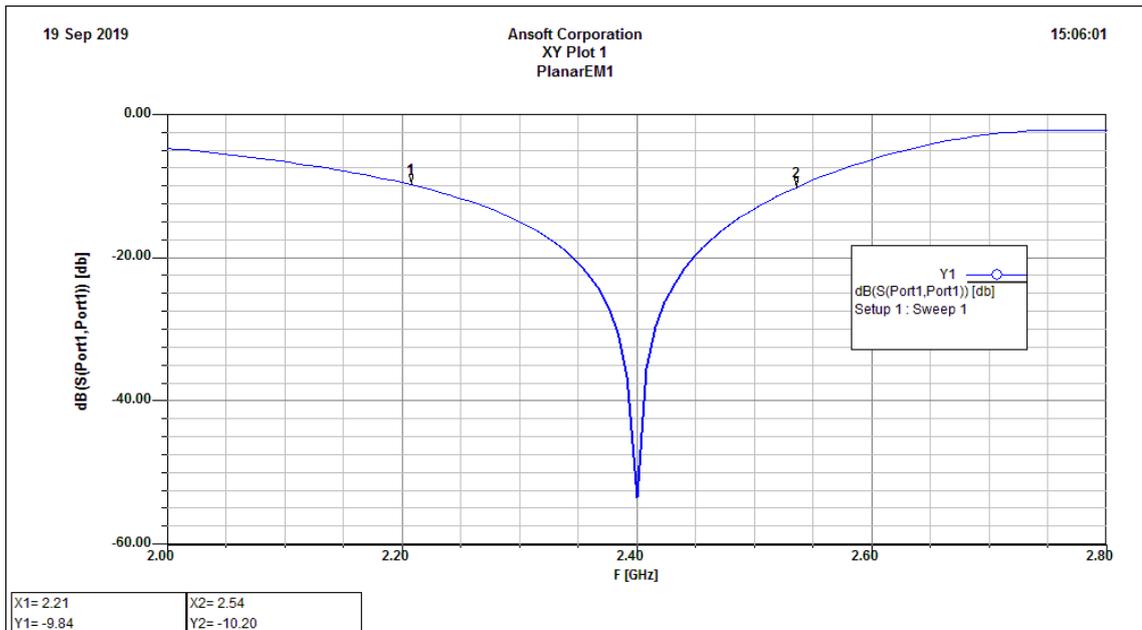
En la Figura 5-4 se puede ver la configuración para medir el Balun implementado conectado como se indica en la Figura 1-4, el generador de señales Anritsu MG3692C hace de transmisor conectado con la sonda SMA macho a la entrada desbalanceada del Balun Microstrip, las salidas balanceadas se conectan mediante otra sonda SMA hacia un adaptador hembra con el equipo receptor el cual es el analizador de espectro Spectrum Master™ MS2724C.



**Figura 5-4:** Configuración para medir el balun implementado del diseño 1 a 2,4 GHz con tecnología Microstrip.

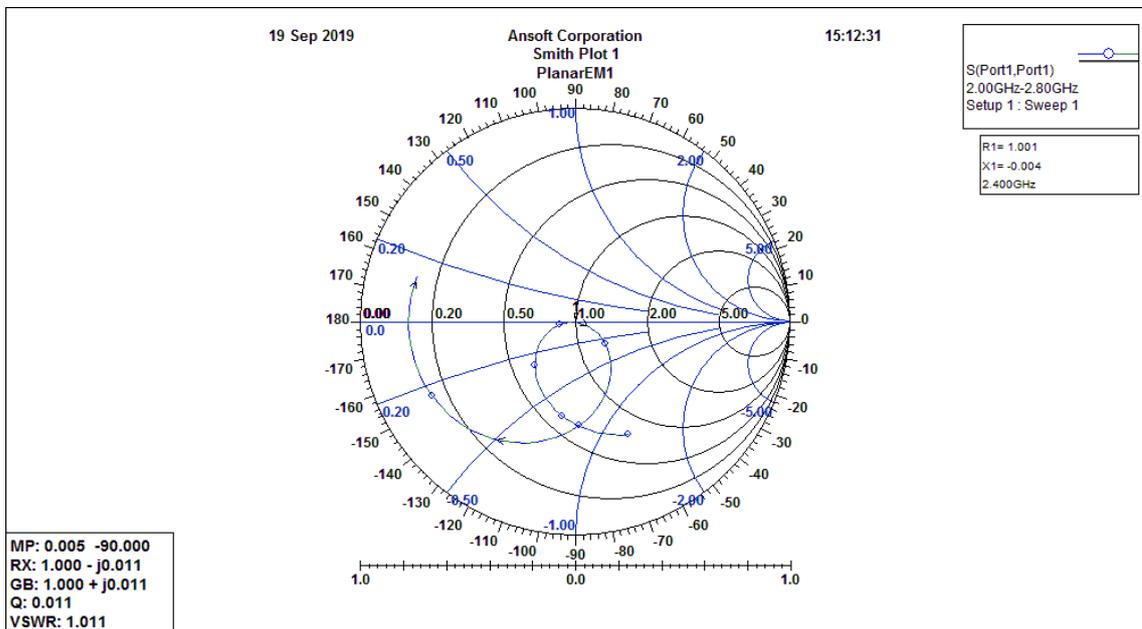
**Fuente:** Parreño Gabriel, 2019

El Gráfico 6-4 muestra los resultados de la simulación con un barrido desde 2 GHz hasta 2,8 GHz con 101 cuentas lineales para el coeficiente de reflexión  $S(1,1)$  y los demás parámetros  $S$ , con una permitividad relativa de 3.55 en el diseño el cual se encuentra adaptado a una frecuencia central de 2,4 GHz con una ganancia de -53 dB el cual nos da un ancho de banda de 0,33 GHz cubriendo una banda desde los 2,21 hasta 2,54 GHz medido en -10 dB (o puede ser también medido por debajo de los -10 dB el cual cumple con el criterio de funcionamiento para baluns). En el Grafico 7-4 se puede ver la carta de Smith del acople de impedancia para una frecuencia de 2,4 GHz, con una impedancia real de  $50,05\Omega$  y una parte imaginaria prácticamente nula, por lo que VSWR es 1,001 desestimando onda reflejada. La impedancia del Gráfico 7-4 está normalizada a  $50\Omega$ .



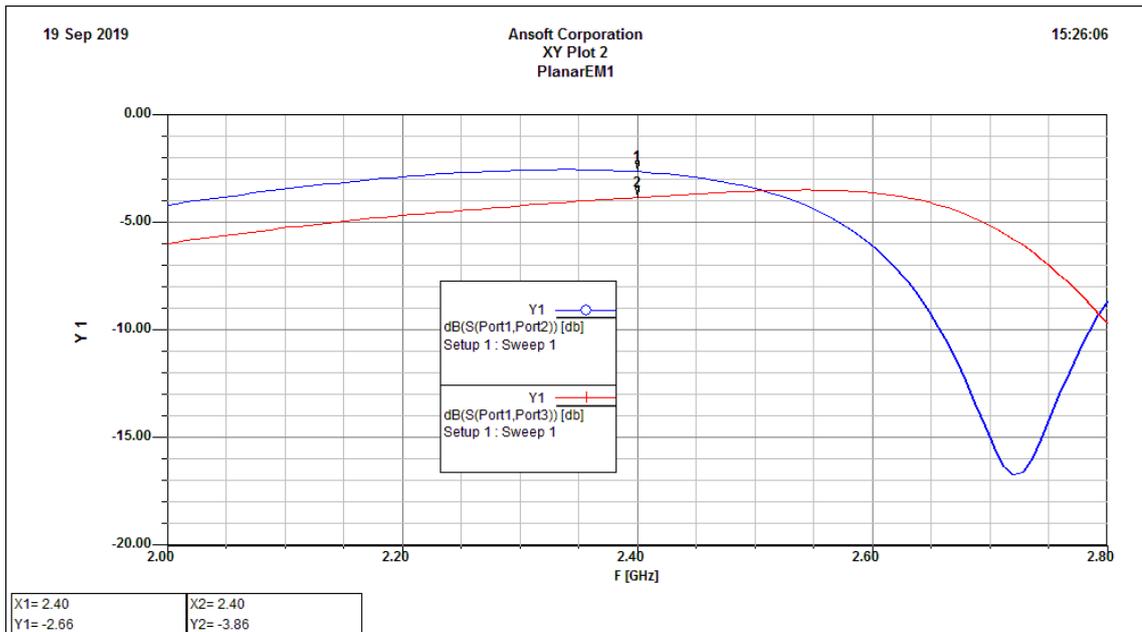
**Gráfico 6-4:** Coeficiente de reflexión S(1,1) para diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



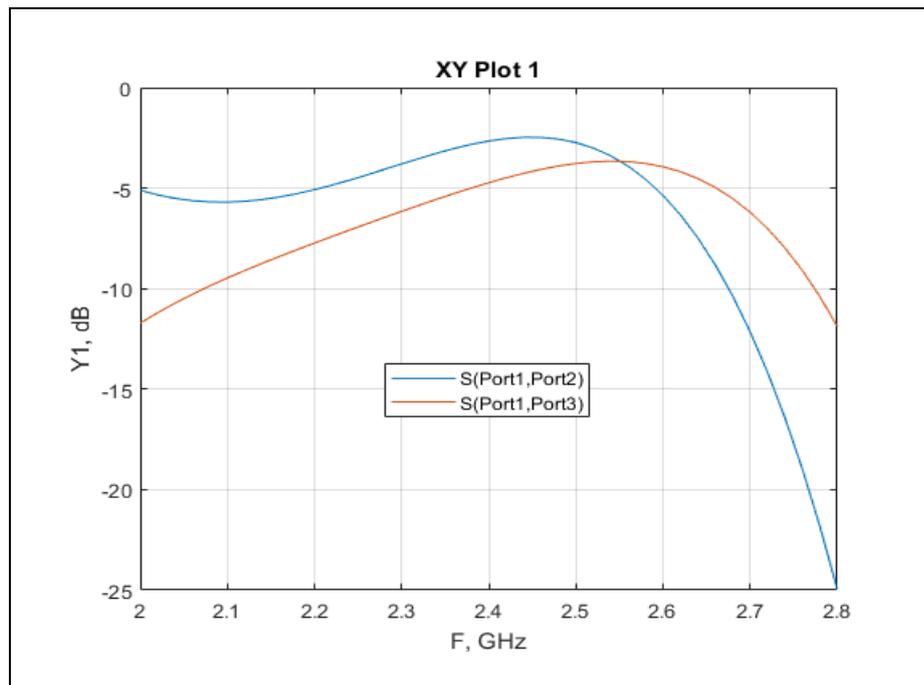
**Gráfico 7-4:** Carta de Smith del acople de impedancia normalizada a 50Ω para el diseño 1 de balun microstrip.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Gráfico 8-4:** Simulación del coeficiente de transmisión  $S(1,2)$  y  $S(1,3)$ .

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

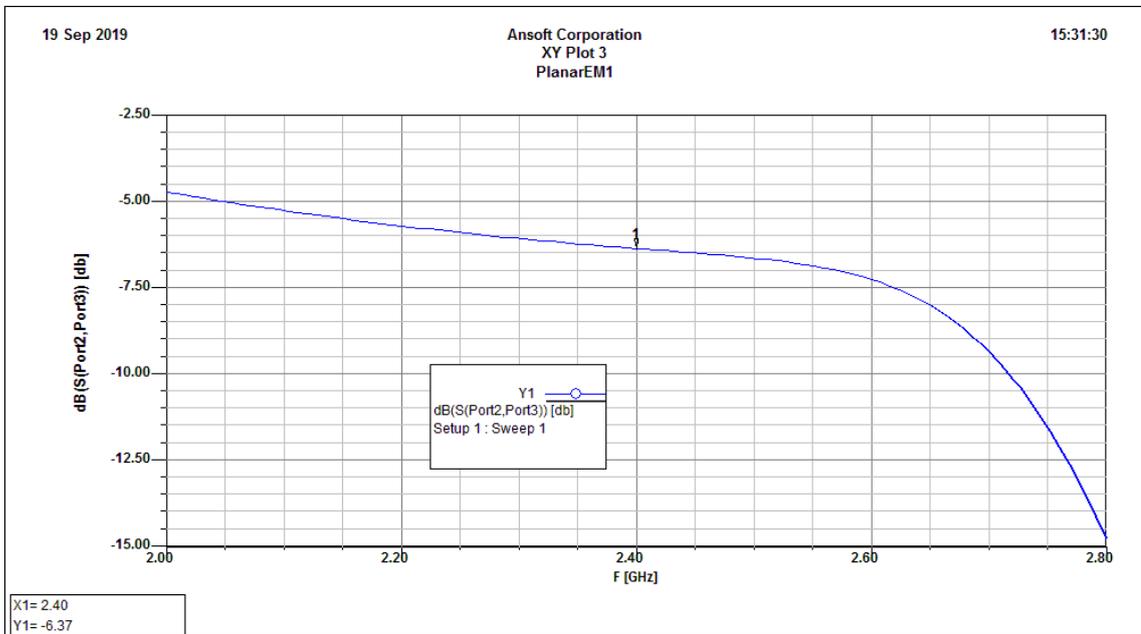


**Gráfico 9-4:** Medición del coeficiente de transmisión  $S(1,2)$  y  $S(1,3)$ .

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

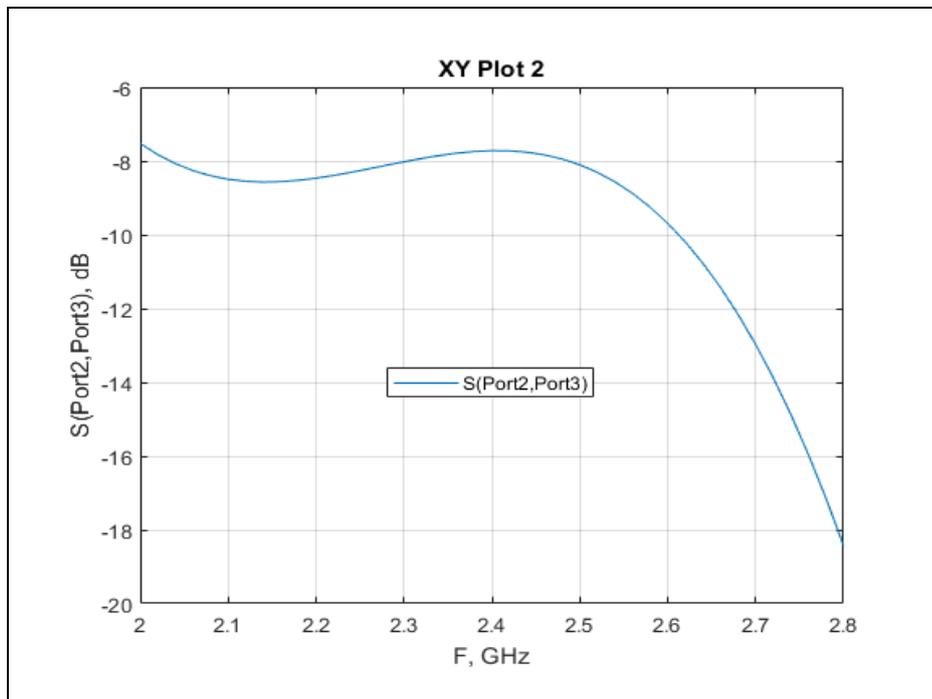
En el Gráfico 8-4 se muestra la simulación de las pérdidas por inserción las cuales deben ser -3dB idealmente como se lo indica en la fase de diseño por lo que los valores de -2,66 dB para el coeficiente de transmisión  $S(1,2)$  y -3.86 dB para  $S(1,3)$  son bastante acertados. En la medición lo cual se puede ver en el Gráfico 9-4 el parámetro  $S(1,1)$  es de -3,27 dB y el parámetro  $S(1,2)$  es

-4,42 dB por lo cual es bastante bueno considerando las pérdidas externas. Cabe mencionar que en los gráficos de las mediciones se realiza un ajuste en las curvas con regresión polinomial utilizando la función interna de Matlab *Polyfit*.



**Gráfico 10-4:** Simulación del parámetro S(2,3) para el diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

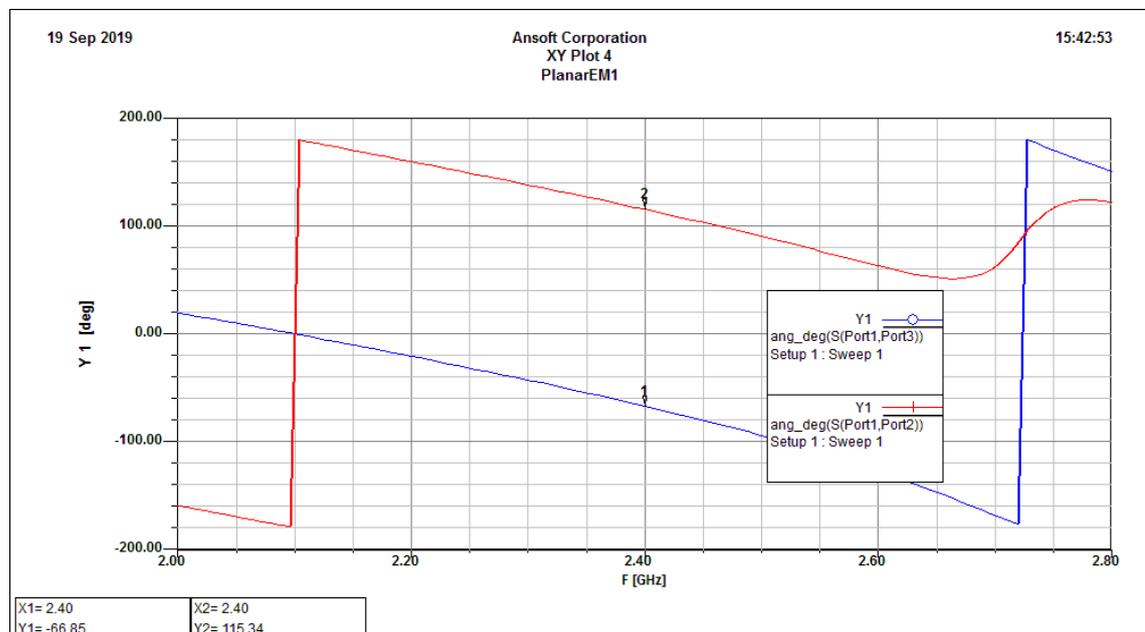


**Gráfico 11-4:** Medición del parámetro S(2,3) para el diseño 1 de balun microstrip.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

En el Gráfico 10-4 se muestra la simulación del parámetro S(2,3) el cual debe ser -6 dB, puesto que la magnitud de la señal que ingresa debe ser la misma en la salida y los parámetros del coeficiente de transmisión S(1,2) y S(1,3) deben ser de -3 dB, es decir que se deben repartir de mitad a mitad por los puertos de salida, en este caso es -6,37 dB lo cual está bastante bien. En el Gráfico 11-4 se muestra la medición del parámetro S(2,3) del balun implementado el cual es de -7,23 dB por lo que si cumple con los criterios de diseño.

En el Gráfico 12-4 se puede ver la simulación de la diferencia de fase entre los parámetros S(1,2) y S(1,3) el cual debe ser 180° como requisito primordial de funcionamiento como se lo ha descrito en apartados anteriores, siendo en este caso de 182° lo cual cumple con su cometido.



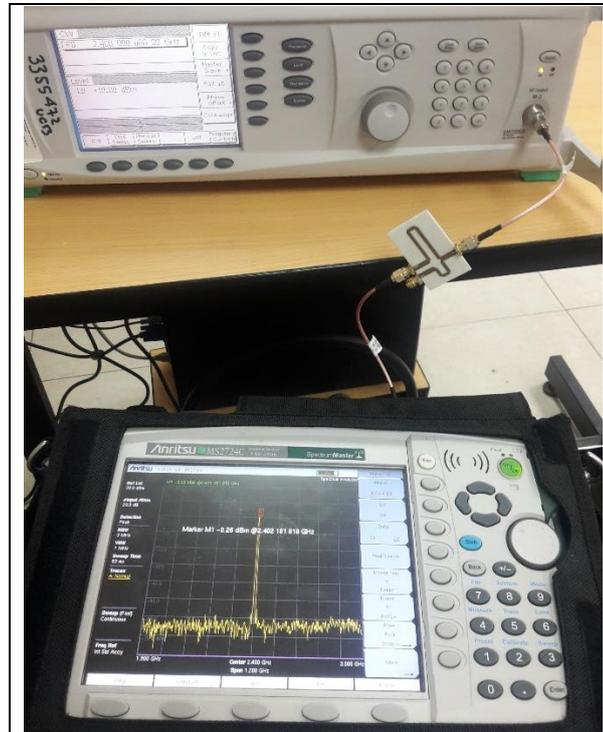
**Gráfico 12-4:** Simulación de desfase entre los parámetros S(1,2) y S(1,3) en el diseño 1 de balun microstrip a 2,4 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

#### 4.3.1.2. Resultado del Diseño 2 de Balun a 2,4 GHz

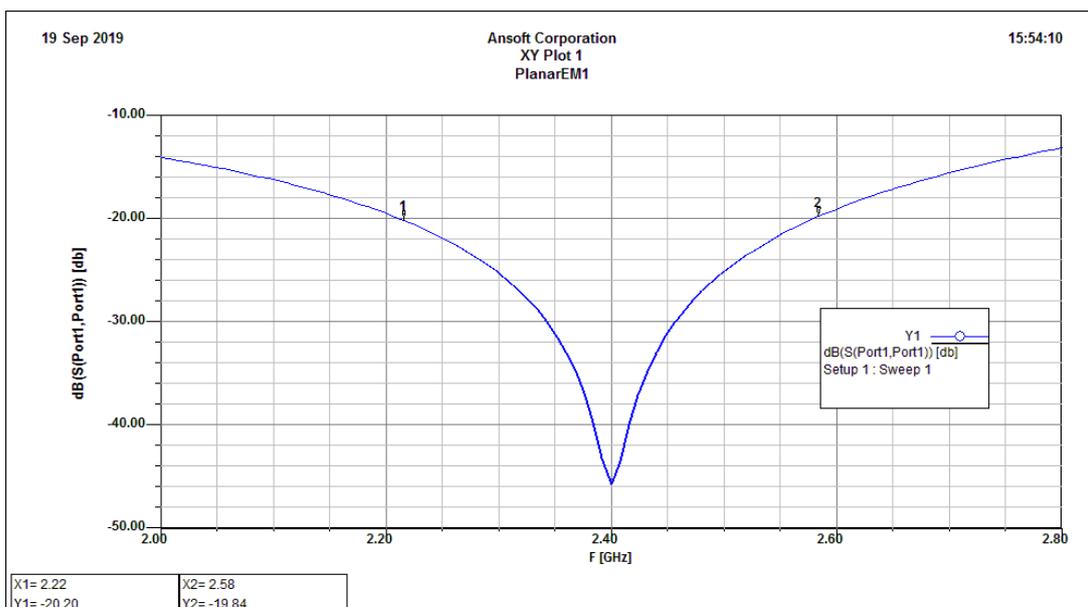
En el Gráfico 13-4 se muestra la configuración de conexión del diseño 2 de balun a 2,4 GHz con tecnología microstrip para las mediciones en laboratorio. El equipo generador de señales hace la función de TX conectado mediante una sonda SMA Macho hacia la entrada del balun, luego con otra sonda SMA macho se conecta la salida del balun a un adaptador SMA hembra de 50Ω en el equipo analizador de espectro RX. En el Gráfico 14-4 se puede ver la simulación en Ansoft

Designer para el coeficiente de reflexión  $S(1,1)$  el cual cuenta con una ganancia de  $-45,74$  dB y un ancho de banda de  $0,36$  GHz medido en  $-20$  dB para una frecuencia central de  $2,4$  GHz cubriendo la banda desde los  $2,22$  hasta  $2,58$  GHz.



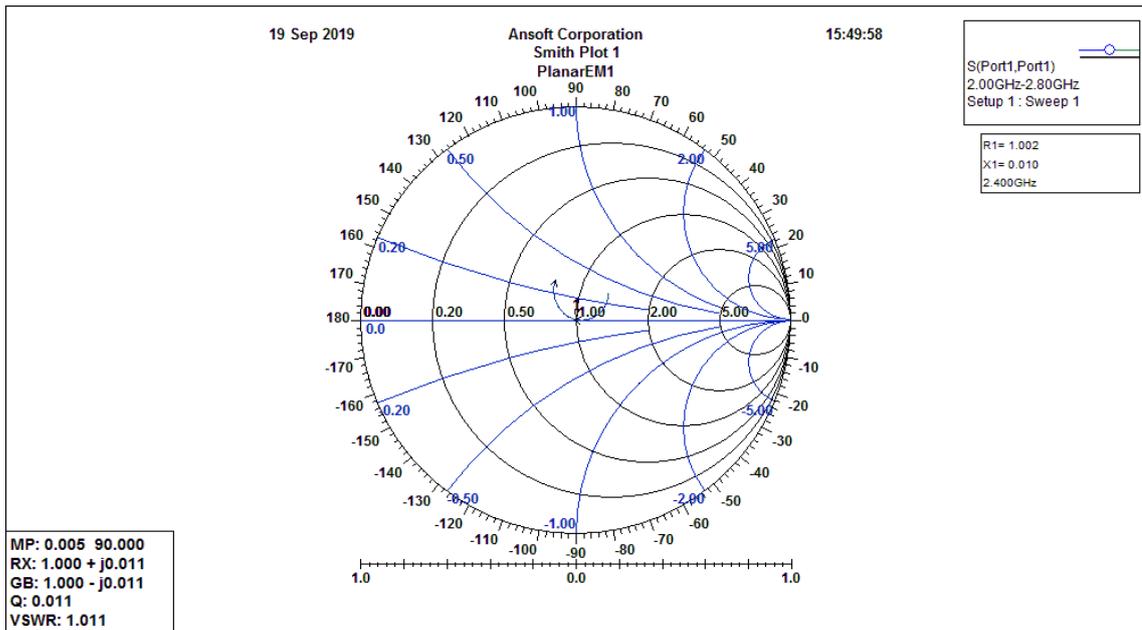
**Gráfico 13-4:** Configuración de conexión para medición del diseño 2 de balun con tecnología Microstrip a  $2,4$  GHz.

Fuente: Parreño Gabriel, 2019



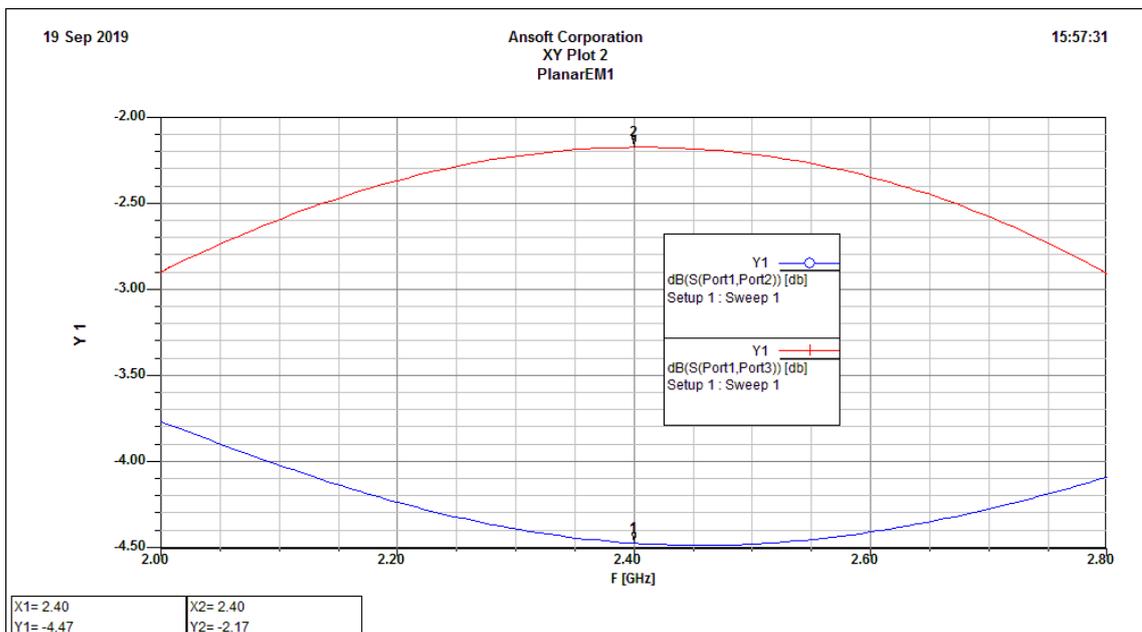
**Gráfico 14-4:** Simulación para el coeficiente de reflexión  $S(1,1)$  del diseño 2 de balun microstrip a  $2,4$  GHz.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Gráfico 15-4:** Carta de Smith para acople de impedancia normalizada a 50Ω para diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019



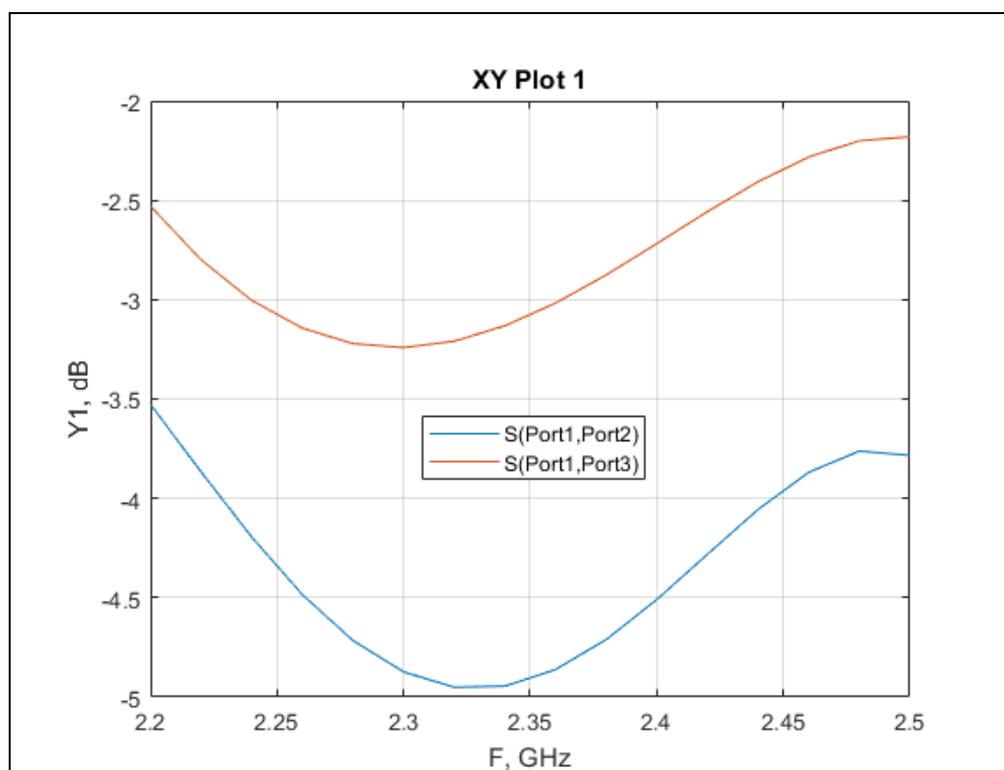
**Gráfico 16-4:** Simulación de parámetros del coeficiente de transmisión S(1,2) y S(1,3) para el diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

En el Gráfico 15-4 se puede ver la carta de Smith para el acople de impedancia normalizado a 50Ω, el cual tiene una parte real de 50,1Ω y una parte imaginaria prácticamente nula, por lo que VSWR es 1,011 desestimando la reflexión de la señal.

En el Gráfico 16-4 se observa la simulación para los coeficientes de transmisión  $S(1,2)$  y  $S(1,3)$  los cuales deben ser de -3 dB para que la magnitud de la señal que ingresa sea la misma en la salida repartiéndose en partes iguales, siendo en este caso para  $S(1,2)$  de -4,47dB y  $S(1,3)$  -2,17 por lo que está bastante bien y cumplirá su cometido.

En la práctica, luego de realizar las mediciones y procesar los datos con el software Matlab, se observa en el Gráfico 17-4 que los parámetros del coeficiente de transmisión  $S(1,2)$  es -4,5dB y para  $S(1,3)$  -2,7dB, tomando en cuenta las pérdidas externas y la corrección de curvas con la función *Polyfit*.

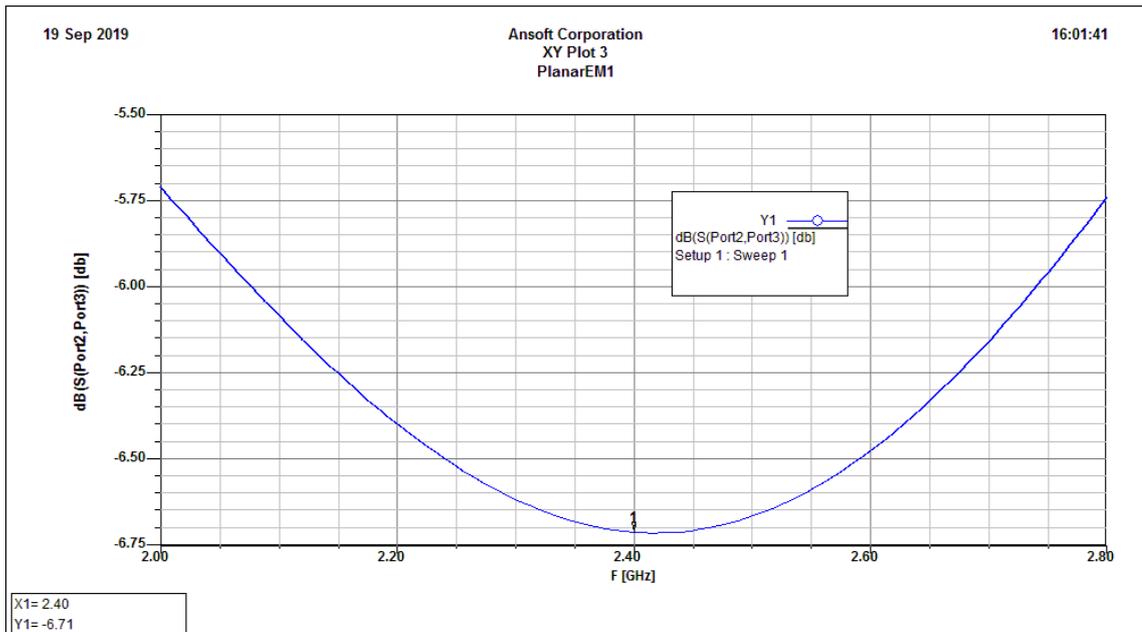


**Gráfico 17-4:** Medición de los coeficientes de transmisión  $S(1,2)$  y  $S(1,3)$  para el diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

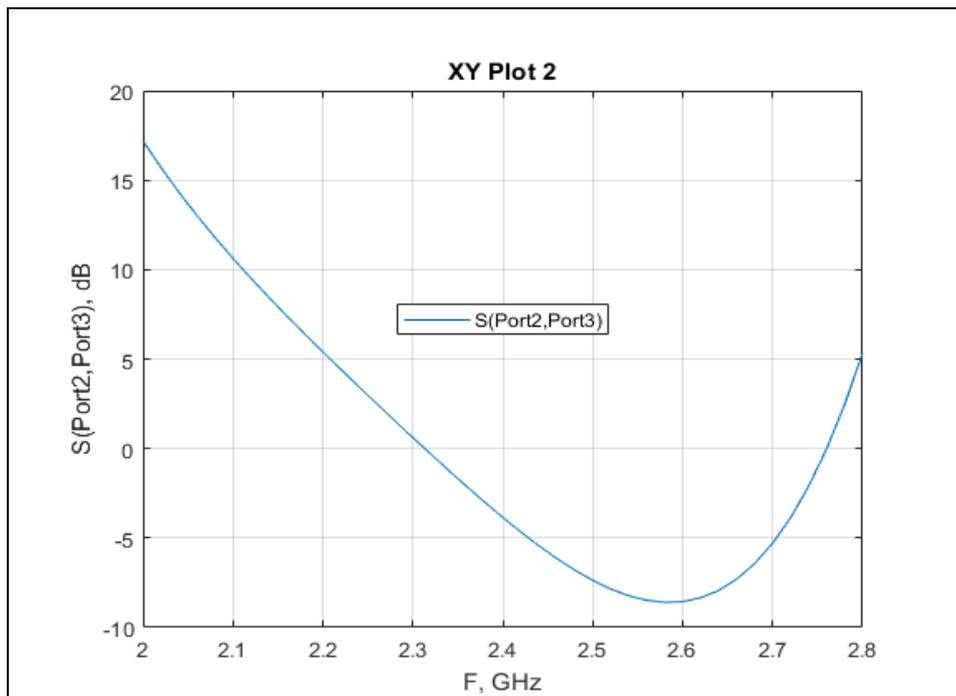
En el Gráfico 18-4 se muestra la simulación del parámetro  $S(2,3)$  el cual debe ser -6dB como la teoría lo indica, puesto que la magnitud de la señal debe ser repartida en partes iguales en la salida siendo  $S(1,2)$  -3dB y  $S(1,3)$  -3dB, en este caso el parámetro  $S(2,3)$  resulta de -6,71dB medido en 2,4 GHz, siendo un buen diseño, coherente con los resultados del Gráfico 16-4.

En la práctica, los resultados de las mediciones para el parámetro  $S(2,3)$  se muestra en el Gráfico 19-3, el cual es de -8dB medido en 2,4 GHz, siendo bastante coherente con los resultados del Gráfico 17-4, por lo que los resultados de las pruebas son las esperadas.



**Gráfico 18-4:** Simulación del parámetro S(2,3) para el diseño 2 de balun microstrip a 2,4 GHz.

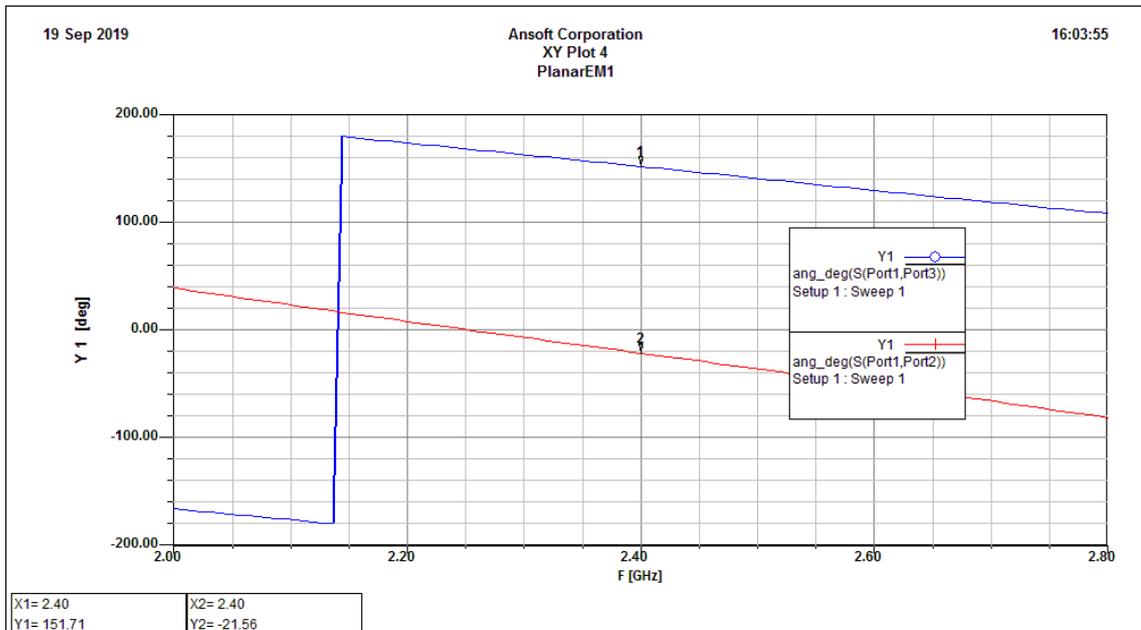
Realizado por: Parreño Gabriel, 2019



**Gráfico 19-4:** Medición del parámetro S(2,3) del diseño 2 de balun microstrip.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

En el Gráfico 20-4 se muestra la simulación de la diferencia de fase entre los parámetros S(1,2) y S(1,3), el cual debería ser de  $180^\circ$  para que el balun transforme una señal de entrada en un par de señales diferenciales, lo cual en este caso es de  $173^\circ$ , suficiente para que se anulen las corrientes que regresan por tierra a frecuencias de 2,4 GHz.



**Gráfico 20-4:** Simulación del desfase entre los parámetros S(1,2) y S(1,3) del diseño 2 de balun microstrip para frecuencias de 2,4 GHz.

Realizado por: Parreño Gabriel, 2019

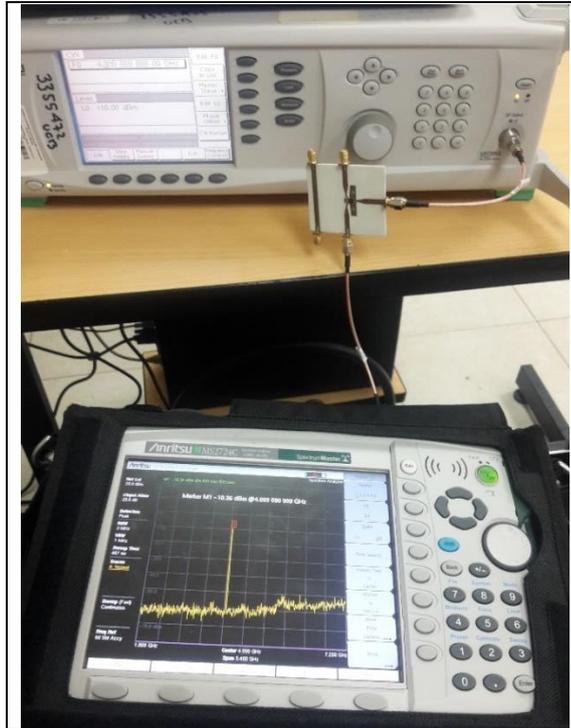
#### 4.3.2. Resultado de Baluns de alta frecuencia con tecnología MMIC

En el presente apartado se muestra el análisis de resultados de la medición de los baluns de alta frecuencia implementados con tecnología MMIC comparándolo con los datos obtenidos de los datasheet de los modelos MTX2-73+ y MTX2-143+, por lo que el equipo de TX ha sido configurado con una potencia de 10 dBm y un barrido de frecuencias de 2 a 7 GHz para el modelo MTX2-73+ y de 5.5 a 13.5 GHz para el modelo MTX2-143+, con saltos de 0,1 GHz; el equipo de RX con un Spam de 1,8 a 7,2 GHz para el modelo MTX2-73+ y de 5.3 a 13.7 para el modelo MTX2-143+, una atenuación de 20 dB y un nivel de referencia de 20 dBm. Los datos serán procesados con el Software Matlab.

##### 4.3.2.1. Resultado del Balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz

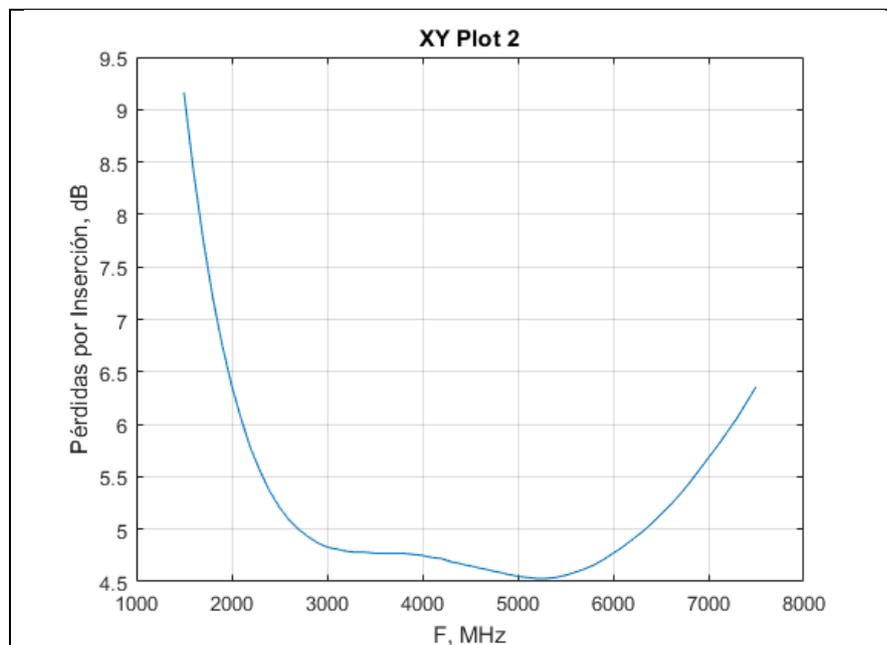
En la Figura 6-4 se puede ver la configuración de conexión para las mediciones del Balun de alta frecuencia con tecnología MMIC, en la entrada del puerto desbalanceado se conecta el equipo generador de señales como TX mediante una sonda SMA macho, a la salida balanceada se conecta

el analizador de espectro como RX mediante otra sonda SMA macho y un adaptador SMA hembra como lo indica el diagrama de conexión de la Figura 1-4.



**Figura 6-4:** Configuración de conexión para mediciones de balun de alta frecuencia MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz.

Fuente: Parreño Gabriel, 2019



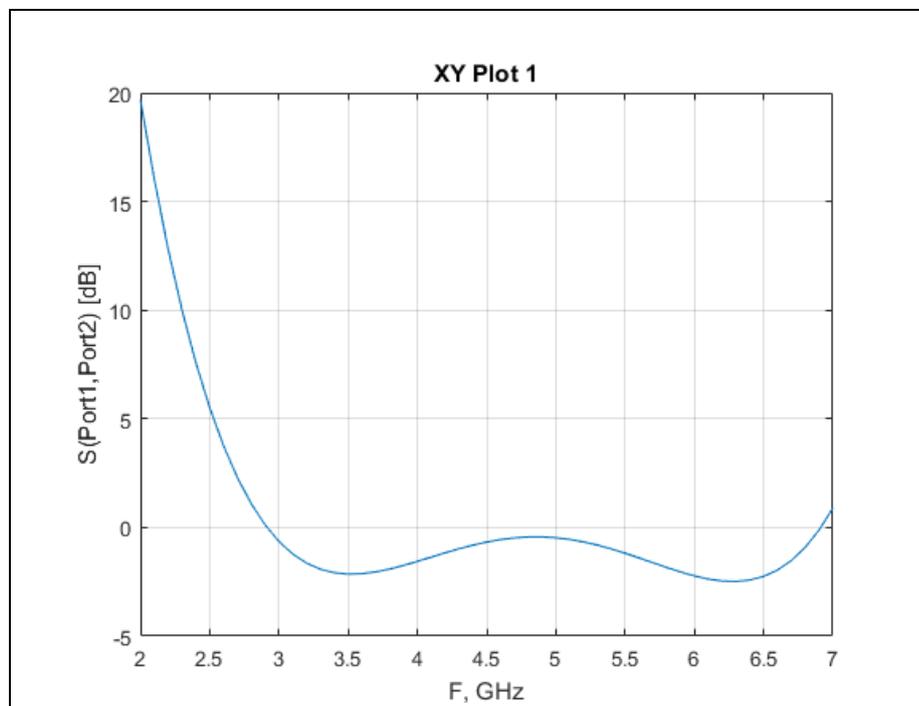
**Gráfico 21-4:** Perdidas por inserción de balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz.

Fuente: (MTX2-73+\_dashboard, 2014)

Realizado por: Gabriel Parreño, 2019

El Gráfico 21-4 corresponde a la respuesta de pérdidas por inserción con los valores mostrados en el datasheet del balun MMIC, en el cual se puede ver un barrido desde 1 GHz hasta 8 GHz que evidencia la baja pérdida de inserción característica del modelo MTX2-73+.

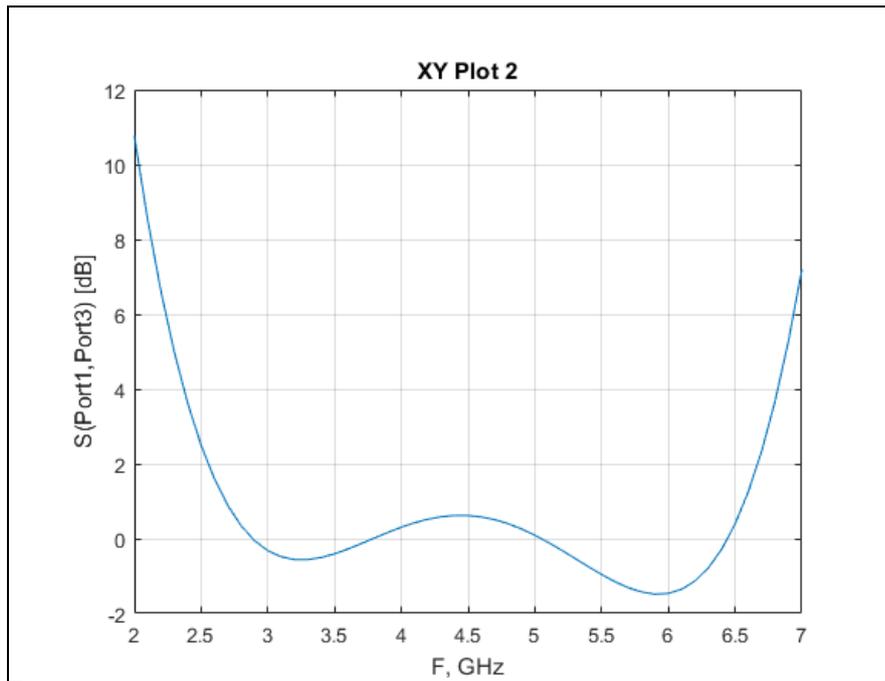
En la práctica, En el Gráfico 22-4 muestra los resultados de la medición de las pérdidas por inserción  $S(1,2)$  así como también el Gráfico 23-4 muestra los resultados de  $S(1,3)$  del balun MMIC con un barrido de frecuencias de 2 a 7 GHz el cual evidencia las bajas pérdidas por inserción coherentes con los datos característicos mostrados en el Gráfico 21-4 en especial desde la frecuencia de 2,5 a 7 GHz incluyendo las pérdidas externas los cuales se encuentran entre 5 y -5dB para las pérdidas por inserción  $S(1,2)$  y valores de entre 2 y -2 dB para las pérdidas por inserción de  $S(1,3)$  entre las frecuencias de 2,5 a 6.5 GHz.



**Gráfico 22-4:** Medición de pérdidas por inserción  $S(1,2)$  en Balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz.

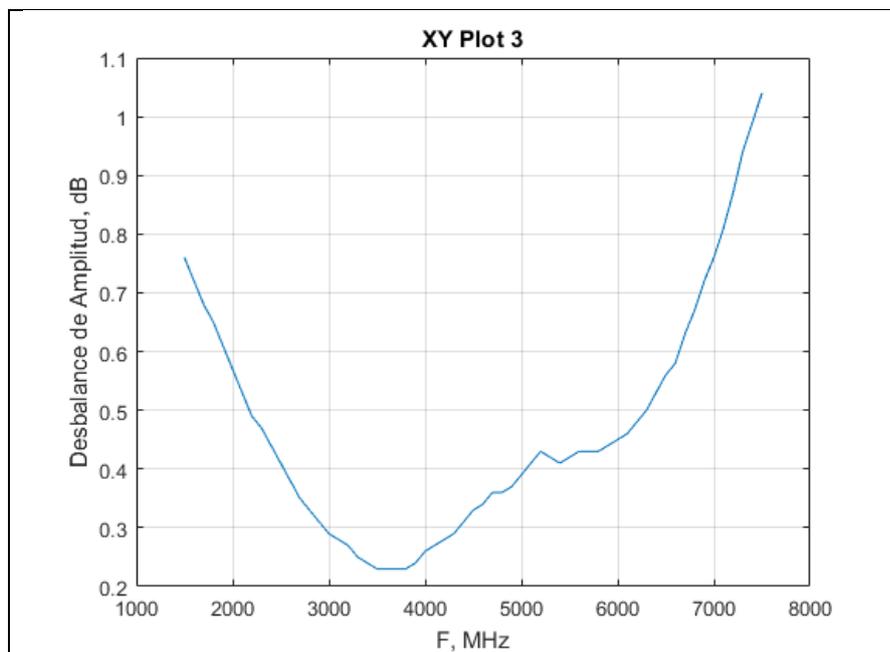
**Realizado por:** Gabriel Parreño, 2019

En el Gráfico 24-4 se muestra el desbalance de amplitud especificado en el datasheet del balun MMIC MTX2-73+ el cual como se puede observar es menor a 1dB en todo el barrido de frecuencias desde 1 a 8 GHz. Por otro lado, en la práctica como evidencia el Gráfico 25-4 con un barrido de frecuencias de 2 a 7 GHz con saltos de 0,1 GHz se puede notar que el desbalance de amplitud varía entre los 2 y -2 dB entre las frecuencias de 2,6 y 6,4 GHz incluyendo pérdidas externas. Esta gráfica se consigue con la formula  $S(1,2)-S(1,3)$  en dB.



**Gráfico 23-4:** Medición de pérdidas por inserción S(1,3) en Balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz.

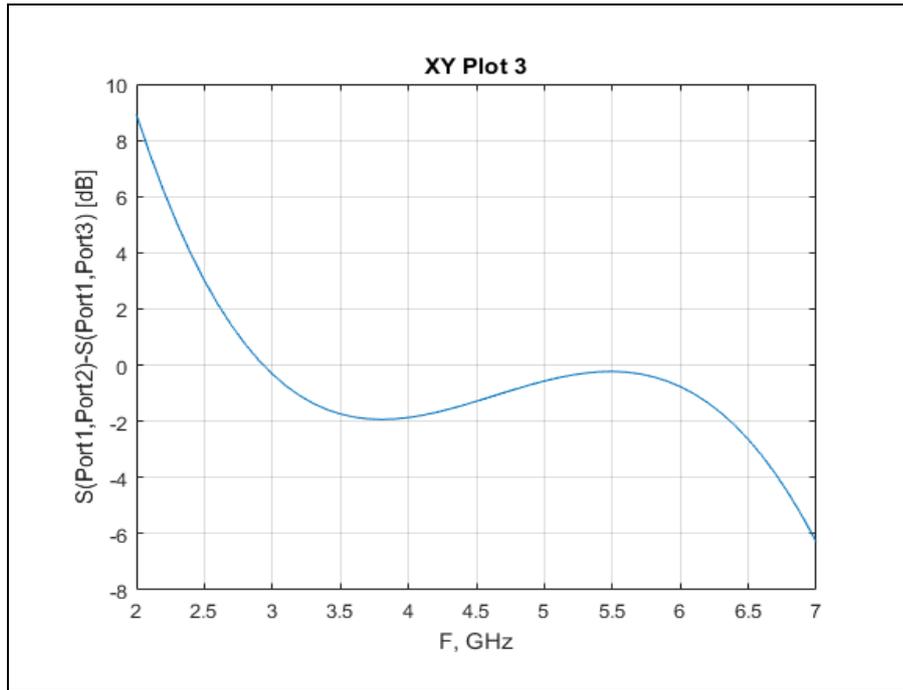
**Realizado por:** Gabriel Parreño, 2019



**Gráfico 24-4:** Desbalance de amplitud para balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz.

**Fuente:** (MTX2-73+\_dashboard, 2014)

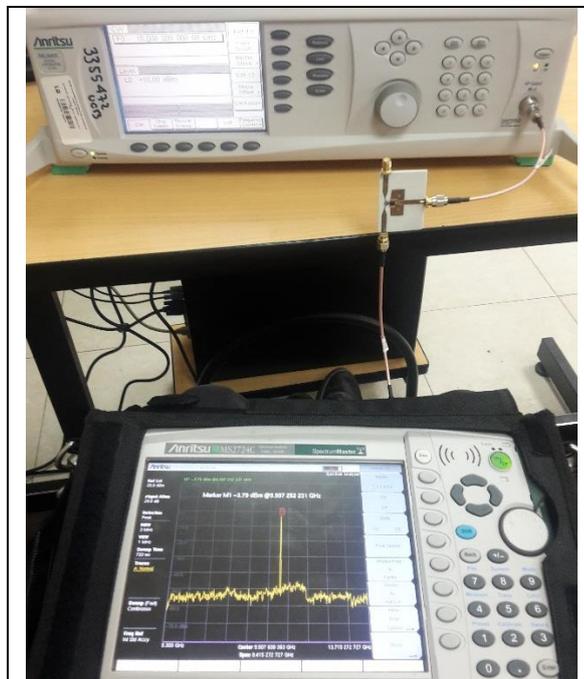
**Realizado por:** Gabriel Parreño, 2019



**Gráfico 25-4:** Medición del desbalance de amplitud para balun MMIC MTX2-73+ de 2 a 7 GHz.

Realizado por: Gabriel Parreño, 2019

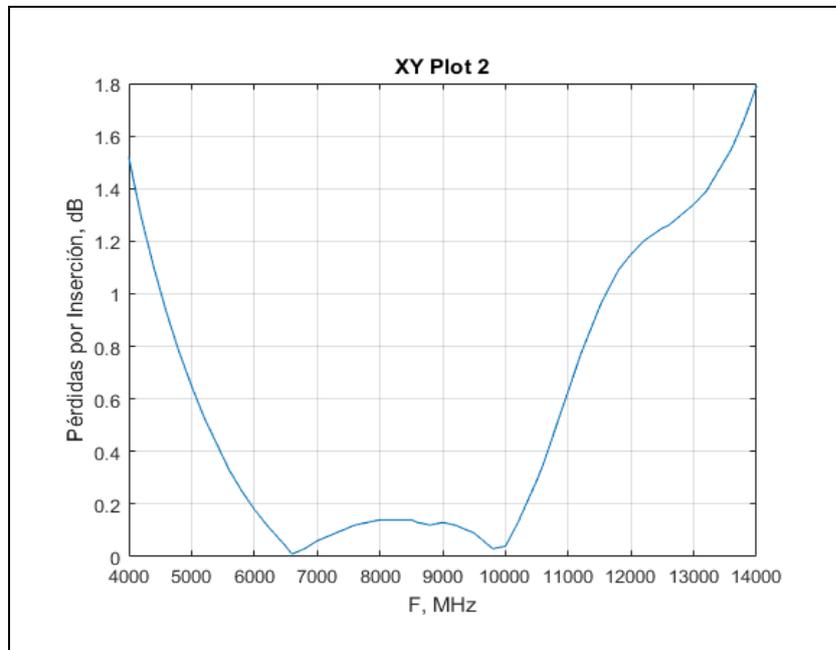
4.3.2.2. Resultado del Balun MMIC MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz,



**Figura 7-4:** Configuración de conexión para mediciones de balun MMIC MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz.

Fuente: Parreño Gabriel, 2019

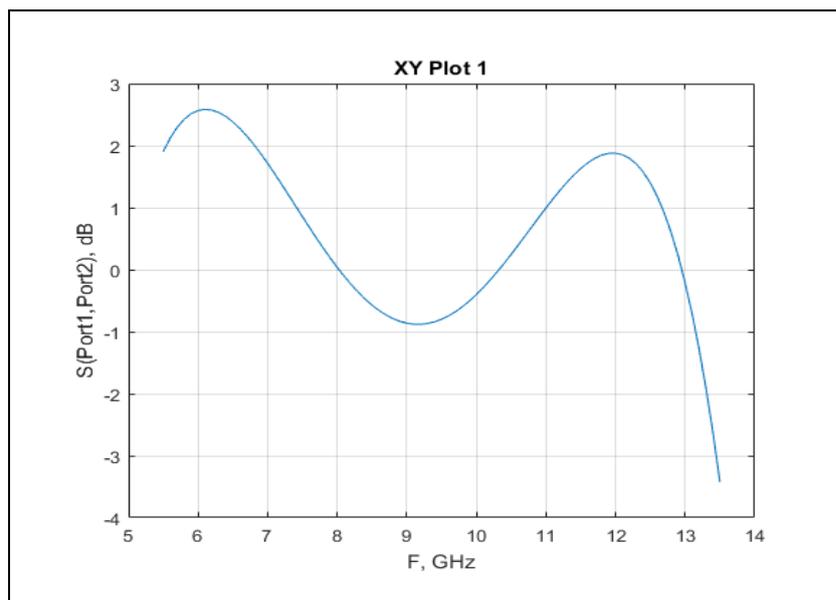
En la Figura 7-4 se muestra la configuración de conexión para realizar las medidas de laboratorio al balun MMIC MTX2-143+, el cual está conectado al equipo de TX que es el generador de señales mediante una sonda SMA macho a la entrada desbalanceada, luego con otra sonda SMA se conecta desde la salida balanceada del balun MMIC de alta frecuencia hacia el equipo de RX que es el analizador de espectro mediante un adaptador de SMA de 50Ω.



**Gráfico 26-4:** Pérdidas por inserción de balun MMIC MTX2-143+ de 4 a 14 GHz.

**Fuente:** (MTX2-73+\_dashboard, 2014)

**Realizado por:** Gabriel Parreño, 2019

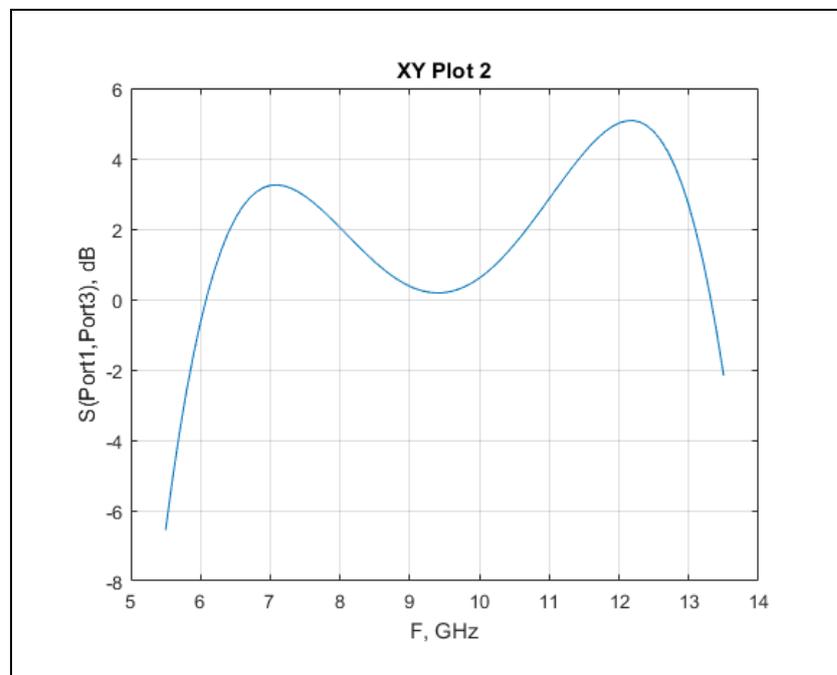


**Gráfico 27-4:** Medición de las pérdidas por inserción S(1,2) de balun MMIC MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

En el Gráfico 26-4 se puede ver los valores típicos de trabajo del balun MMIC con un barrido de 4 a 14 GHz, el mismo que demuestra las bajas pérdidas de inserción características de este modelo de balun de alta frecuencia mostradas en su respectivo datasheet siendo este de 0 a 1.8 dB. En la práctica, el Gráfico 27-4 muestra los resultados de las pérdidas por inserción  $S(1,2)$  los cuales en un barrido de 5.5 a 13.5 GHz con saltos de 0,1 GHz evidencian valores de entre -1 y 2.5 dB entre las frecuencias de 6 a 13 GHz. Las pérdidas por inserción de  $S(1,3)$  se dan a conocer en el Gráfico 28-3 el cual muestra valores de entre 5 y -2 dB incluyendo pérdidas externas para frecuencias de 6 a 13.5 GHz siendo el pico más alto en 12 GHz.

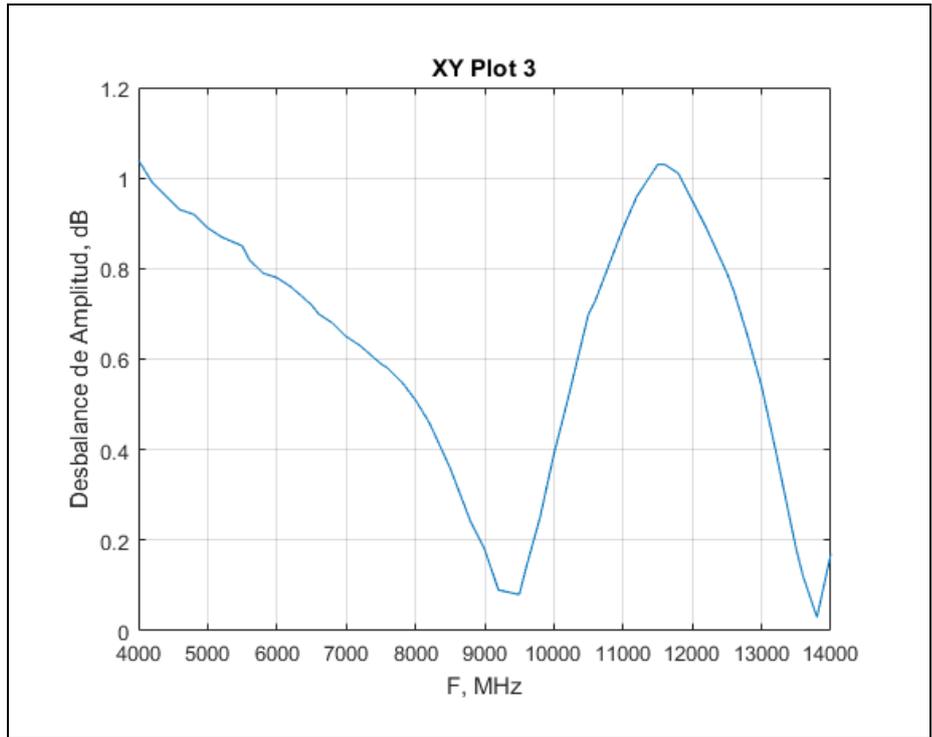
En el Gráfico 29-4 se muestran los valores para el desbalance de amplitud del balun MMIC MTX2-143+ con un barrido de 4 a 14 GHz, el cual evidencia los picos más bajos en 9 y 14 GHz siendo de casi 0 dB, pero en general el desbalance de amplitud es bajo, característico del modelo mostrado en su respectivo datasheet.



**Gráfico 28-4:** Medición de las pérdidas por inserción  $S(1,3)$  de balun MMIC MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz.

**Realizado por:** Parreño Gabriel, 2019

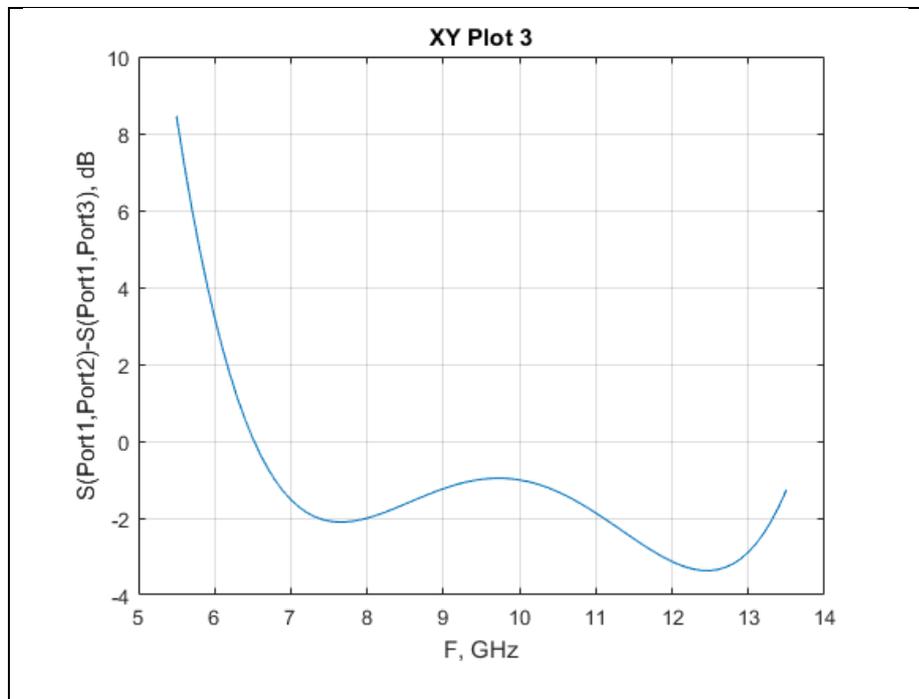
Finalmente, el Gráfico 30-4 muestra la medición para el desbalance de amplitud del balun implementado con tecnología MMIC modelo MTX2-143+, con un barrido de 5.5 a 13.5 GHz, en el cual se evidencian valores de 3 y -2 dB en frecuencias de entre 6 y 13 GHz, siendo un desbalance de amplitud bastante bajo considerando las pérdidas externas. Cabe mencionar que el gráfico se consigue mediante la fórmula  $S(1,2)-S(1,3)$  expresado en dB.



**Gráfico 29-4:** Desbalance de amplitud de balun MMIC MTX2-143+ de 4 a 14 GHz.

**Fuente:** (MTX2-73+\_dashboard, 2014)

**Realizado por:** Gabriel Parreño, 2019



**Gráfico 30-4:** Medición de desbalance de amplitud para balun MMIC MTX2-143+ de 13.5 a 12.5 GHz.

**Realizado por:** Gabriel Parreño, 2019

## CONCLUSIONES

Luego de haber realizado la debida investigación, se diseñó y posteriormente se implementó un set de baluns de altas frecuencias utilizando tecnologías Microstrip y MMIC, el cual estará disponible en el laboratorio de comunicaciones y microondas de la FIE-ESPOCH.

Fue de vital importancia obtener un diagnostico en base a los datos recolectados por parte de la encuesta realizada a los estudiantes de la escuela de telecomunicaciones y redes de la FIE-ESPOCH, para determinar la situación actual acerca del conocimiento que tienen sobre dispositivos de alta frecuencia y si habían utilizado regularmente el laboratorio de comunicaciones y microondas de la facultad para completar sus conocimientos teóricos con las respectivas prácticas. Siendo este diagnóstico bastante preocupante ya que un gran porcentaje de los estudiantes teniendo conocimiento de la existencia de laboratorios de este tipo, no habían asistido con sus profesores a realizar prácticas. Además, los estudiantes expresaron su deseo de conocer acerca del funcionamiento de los Baluns de alta frecuencia ya que la mayoría no sabían de qué se trataba y les gustaría que el laboratorio de la facultad cuente con este tipo de dispositivos para realizar sus prácticas de tal manera que complemente con sus conocimientos teóricos. Alentando así la puesta en marcha del proyecto realizado.

Al realizar un análisis estadístico sobre el efecto del rendimiento eléctrico de los materiales de Roger RO4350B y RO4003C, se decidió utilizar el Roger RO4003C ya que este material presentaba niveles más bajos de constante dieléctrica en su fabricación, un nivel de factor de disipación tangencial más bajos que el material RO4350B, provocando que las perdidas dieléctricas sean menores y por ende el coeficiente térmico de la constante dieléctrica también viene a ser más baja, por lo que ofrece una mejor estabilidad a lo largo de sus medidas.

El Software Ansoft Designer juega un papel muy importante al momento de realizar los baluns de alta frecuencia ya que ofrece un entorno bastante completo y amigable para el diseño y simulación de estructuras electromagnéticas, el cual permite al diseñador dar rienda suelta a su creatividad y habilidad para desarrollar este tipo dispositivos con la calidad y el rendimiento exigidos en el proyecto.

Se realizó dos diseños de balun con tecnología Microstrip para trabajar dentro del rango de frecuencias de 2 a 7 GHz, por lo que se eligió la frecuencia de 2,4 GHz por ser una banda libre motivo por el cual es muy utilizada por las tecnologías inalámbricas de hoy en día, otra razón por la cual se eligió esta frecuencia es por el tamaño, ya que mientras más alta es la frecuencia más pequeñas son las líneas de transmisión y en el país aún no se cuenta con la tecnología necesaria para la implementación de pistas tan pequeñas.

Por otro lado, para la implementación de baluns con tecnología MMIC se buscó dispositivos de banda ancha los cuales tengan bajas pérdidas, bajo desbalance de amplitud y bajo desbalance de fase, así como también que trabaje con potencias a las cuales trabajan la mayoría de las tecnologías inalámbricas existentes a la fecha; siendo estas características necesarias para la realización de este proyecto. Las pistas para la implementación de este tipo de baluns MMIC tanto del modelo MTX2-73+ para frecuencias de 2 a 7 GHz, y el modelo MTX2-143+ para frecuencias de 5.5 a 13.5 GHz, fueron diseñadas en base al modelo presentado en los respectivos datasheet de los dispositivos mencionados, realizando cambios en los planos a tierra para una mejor manipulación de los dispositivos a la hora de implementar ya que los baluns MMIC son de dimensiones milimétricas y fueron soldados a mano, también los puertos fueron modificados para un acople de  $50\Omega$  con las características del material de Roger RO4003C.

El set de baluns de alta frecuencia diseñado e implementado está compuesto de: cinco baluns con tecnología Microstrip de los cuales se ha realizado dos diseños diferentes a 2,4 GHz; cinco baluns con tecnología MMIC modelo MTX2-73+ de 2 a 7 GHz; y, cinco baluns con tecnología MMIC modelo MTX2-143+ de 5.5 a 13.5 GHz. Siendo un total de quince dispositivos en el set.

Luego de haber realizado las pruebas correspondientes de los baluns de alta frecuencia con tecnologías Microstrip y MMIC se pudo determinar que se encuentran funcionando correctamente. Como era de esperar, los resultados de las mediciones en la práctica difieren de los resultados en la simulación de los Microstrip y de los valores típicos de trabajo en los datasheet de los MMIC, no obstante, se mantienen fieles al diseño considerando pérdidas externas por equipos de TX y RX, conectores y sondas SMA.

En comparación del diseño 1 frente al diseño 2 de baluns con tecnología microstrip se puede notar que el diseño 1 tiene 30 MHz menos de ancho de banda medido en -10 dB, un desbalance de amplitud menor siendo este de 1,15 dB frente a los 1,8 dB del diseño 2, el parámetro  $S(2,3)$  el cual mide la simetría de la magnitud de la señal en la salida se acerca más al valor teórico en el diseño 1 con una diferencia de 0.77 dB respecto al diseño 2, y finalmente la variación de fase en la salida del diseño 1 es de  $182^\circ$  frente a los  $172^\circ$  del diseño 2. Concluyendo así que el diseño 1 cumple mejor con las características de los parámetros teóricos, más esto no quiere decir que el diseño 2, un diseño más convencional no sea igual de bueno.

Con respecto a los baluns implementados con tecnología MMIC, el modelo MTX2-73+ presenta baja pérdida de inserción en  $S(1,2)$  y  $S(1,3)$  con una variación de  $\pm 4$  dB y un bajo desbalance de amplitud de  $\pm 3$  dB en frecuencias de 3 a 6,5 GHz, en cambio el modelo MTX2-143+ presenta bajas pérdidas por inserción en  $S(1,2)$  y  $S(1,3)$  con diferencia de  $\pm 2$  dB y un desbalance de amplitud bajo de  $\pm 4$  dB para frecuencias de 6 a 13.5 GHz. Operando así dentro de los parámetros que garantizan su correcto funcionamiento.

## RECOMENDACIONES

Se debe elegir correctamente el material en el cual se va a implementar los dispositivos de alta frecuencia por que la frecuencia a la que se quiere trabajar depende de las pérdidas que presenta el dieléctrico, además debe soportar altas cantidades de temperatura sin levantarse las delgadas pistas al momento de soldar.

En cuanto al diseño de los baluns con tecnología Microstrip se debe calcular bien la longitud a la que se ubica el cortocircuito para que la señal en el camino más largo sufra un desfase de  $180^\circ$  y así evitar las corrientes de retorno por tierra para lograr el equilibrio deseado, dicha longitud debe ser  $\lambda/4$  o un múltiplo de  $\lambda/4$ .

Al momento de implementar los balun MMIC se debe modificar las pistas de acuerdo con el material a utilizar ya que al tener diferente constante dieléctrica cambia el comportamiento de la señal y el acople en los puertos de entrada y salida.

Se debe utilizar otros métodos de soldadura especialmente para los dispositivos MMIC para optimizar el tiempo y reducir perdidas adicionales en el desempeño del dispositivo.

También se recomienda utilizar otros métodos de revelado para circuitos impresos como son los de impresión en CNC, ya que utilizando ácidos los circuitos presentan pequeñas imperfecciones en las líneas de transmisión y teniendo en cuenta que los circuitos de altas frecuencias son de precisión milimétrica y en algunos casos hasta micrométrica puede afectar en el correcto funcionamiento de los dispositivos.

## GLOSARIO

<b>UIT</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>RF</b>	Radio Frecuencia.
<b>BALUN</b>	Balanced-Unbalanced.
<b>ESPECTRO</b>	Distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas.
<b>EHF</b>	Extremadamente Alta Frecuencia.
<b>SHF</b>	Super Alta Frecuencia.
<b>UHF</b>	Ultra Alta Frecuencia.
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
<b>ISM</b>	Bandas de Radio Industriales Científicas y Medicas.
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global.
<b>MICROSTRIP</b>	Líneas de transmisión eléctrica enrutadas en las capas externas.
<b>STRIPLINE</b>	Líneas de transmisión eléctrica enrutadas en las capas internas.
<b>MMIC</b>	Circuito Integrado Monolítico de Microondas.
<b>MIC</b>	Circuitos Integrados de Microondas.
<b>PCB</b>	Placa de Circuito Impreso.
<b>DC</b>	Corriente Directa.
<b>VSWR</b>	Relación de Onda Estacionaria.
<b>LNA</b>	Amplificador de Bajo Ruido.
<b>PA</b>	Amplificador de Potencia.
<b>IC</b>	Circuito Integrado.
<b>WLAN</b>	Red de Área Local Inalámbrica.
<b>RFID</b>	Identificación por Radiofrecuencia.
<b>RFIC</b>	Circuitos Integrados de Radiofrecuencia.
<b>HFSS</b>	Solucionador de métodos finitos para estructuras electromagnéticas.
<b>NEXXIM</b>	Herramienta de software para diseño de RF y Microondas.
<b>CNC</b>	Control Numérico por Computadora

## BIBLIOGRAFÍA

- **ANRITSU.**, High Performance Handheld Spectrum Analyzer. *Anritsu* [en línea], 2013. pp. 1-24. [Consulta: 09 junio 2019]. Disponible en: <https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/support/downloads?model=MS2724C>.
- **ANRITSU.**, RF / Microwave Signal Generators. [en línea], 2019. pp. 1-24. [Consulta: 09 junio 2019]. Disponible en: <https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/support/downloads?model=MG3690C>.
- **BALANIS, C.A.**, *Antenna Theory : Analysis and Design* [en línea]. 4. John Wiley & Sons, Incorporated. 2016, ISBN 9781119178989. [Consulta: 24 abril 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epoch/detail.action?docID=4205879>.
- **BIANCHI, G. & SORRENTINO, R.**, *Microwave and RF Engineering* [en línea]. John Wiley & Sons, Incorporated. 2010. [Consulta: 28 abril 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epoch/detail.action?docID=533997>.
- **BOLAÑOS, E.**, Muestra y Muestreo. *Estadística para el desarrollo tecnológico* [en línea], 2012. pp. 20. [Consulta: 03 junio 2019]. Disponible en: [https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P\\_Presentaciones/tizayuca/gestion\\_tecnologica/muestra\\_Muestreo.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/tizayuca/gestion_tecnologica/muestra_Muestreo.pdf).
- **FEDERACHI.**, Para que sirve el balun en La antena y como se utiliza. [en línea], 2018. [Consulta: 5 mayo 2019]. [Consulta: 05 Mayo 2019]. Disponible en: [http://www.ce3rkw.cl/Para\\_que\\_sirve\\_el\\_Balun\\_en\\_la\\_antena.htm](http://www.ce3rkw.cl/Para_que_sirve_el_Balun_en_la_antena.htm).
- **GUSTRAU, F.**, *RF and Microwave Engineering : Fundamentals of Wireless Communications* [en línea]. 2. John Wiley & Sons, Incorporated. 2012. [Consulta: 19 abril 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epoch/detail.action?docID=915754>.
- **HOYOS NOGUÉS, M.**, *Novel metamaterial filters using HTS materia for radio astronomy (Implementation in microstrip technology)* [en línea], 2009. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). [Consulta: 24 abril 2019]. Disponible en:

<https://docplayer.es/68289282-Novel-metamaterial-filters-using-hts-materials-for-radio-astronomy-implementation-in-microstrip-technology.html>.

- **JOHNSON COMPONENTS.**, SMA - 50 Ohm Connectors. [en línea], 2016. pp. 1-7. [Consulta: 26 Abril 2019]. Disponible en: [https://www.egr.msu.edu/eceshop/Parts\\_Inventory/datasheets/sma\\_female\\_straight\\_pcb\\_mount.pdf](https://www.egr.msu.edu/eceshop/Parts_Inventory/datasheets/sma_female_straight_pcb_mount.pdf).
- **KINAYMAN, N.**, *Modern Microwave Circuits* [en línea]. Artech House. 2005, ISBN 9781580537261. [Consulta: 19 abril 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epoch/detail.action?docID=231628>.
- **LI, R.C.**, *RF Circuit Design* [en línea]. 2. John Wiley & Sons, Incorporated. 2012, ISBN 9781118309902. [Consulta: 17 abril 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epoch/detail.action?docID=843665>.
- **MALO, I., GALLEGO, J.D., DIEZ, M., LÓPEZ, I. y GARCÍA, R.**, Medida de la Permitividad a temperaturas criogénica y ambiente con el método de Perturbación de Cavidad. [en línea], 2010. pp. 18. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: [www1.oan.es/reports/doc/IT-OAN-2010-9.pdf](http://www1.oan.es/reports/doc/IT-OAN-2010-9.pdf).
- **MARSH, S.**, *Practical MMIC design / Steve Marsh* [en línea]. Artech House. 2006, ISBN 9781596930377. [Consulta: 17 abril 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epoch/detail.action?docID=338738>.
- **MAZAR, H.**, *Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques* [en línea]. 1. John Wiley & Sons, Incorporated. 2016, ISBN 9781118759622. [Consulta: 19 abril 2019]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/epoch/detail.action?docID=4585267>.
- **NANZER, J.**, *Microwave and Millimeter-wave Remote Sensing for Security Applications* [en línea]. 1. Artech House. 2012, ISBN 9781608071739. [Consulta: 19 abril 2019]. Disponible en: [https://books.google.com/books?id=v9sF0aV\\_llcC&pgis=1](https://books.google.com/books?id=v9sF0aV_llcC&pgis=1).
- **POZAR, D.M.**, *Microwave engineering*. 4. Jensen Beach, Florida: John Wiley & Sons, Inc. 2012, ISBN 978-0-470-63155-3. Hamilton Printing.

- **ROGERS CORPORATION.**, RO4000 ® Series High Frequency Circuit Materials Some Typical Applications: #92-004 [en línea], 2015a. pp. 1-4. [Consulta: 18 junio 2019]. Disponible en: <https://www.rogerscorp.com/documents/726/acs/RO4000-LaminatesData-Sheet.pdf>.
- **ROGERS CORPORATION.**, RO4003C <sup>TM</sup> High Frequency Material Insertion Loss Comparison With Other Material Types. [en línea], 2015b. pp. 3-5. [Consulta: 18 junio 2019]. Disponible en: <https://www.rf-microwave.com/app/resources/uploads/laminates/RO4003-application-note.pdf>.
- **VERDÚ, J.**, *DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ANTENA CON DIVERSIDAD EN POLARIZACIÓN PARA REDES WIFI A 2,4 GHz* [en línea], 2006. Universitat Autònoma de Barcelona (etse). [Consulta: 16 abril 2019]. Disponible en: [https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2006/hdl\\_2072\\_4513/Memoria\\_TFC.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2006/hdl_2072_4513/Memoria_TFC.pdf).
- **VIEDMA, R.**, *Aplicación de los planos de masa artificiales al diseño de un dipolo de bajo perfil impreso con balun* [en línea], 2012. Universidad Carlos III de Madrid. [Consulta: 14 septiembre 2019]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10016/16677>.
- **WELLS, J.**, *Multi-Gigabit Microwave and Millimeter-Wave Wireless Communications* [en línea]. 1. Artech House. 2010, ISBN 9781608070831. [Consulta: 18 abril 2019]. Disponible en: <http://books.google.com/books?id=0nwtcAjSoc&pgis=1>.
- **WORM, A.**, Ansoft Designer<sup>TM</sup> Ver3.5. System [en línea], 2007. pp. 1-11. [Consulta: 15 junio 2019]. Disponible en: [http://www.prof-heuermann.de/files/knowledge/hf\\_software/Ansoft\\_Designer.pdf](http://www.prof-heuermann.de/files/knowledge/hf_software/Ansoft_Designer.pdf).
- **ZHANG, W., LIU, Y., WU, Y., WANG, W., SU, M. y GAO, J.**, A complex impedance-transforming coupled-line balun. *Progress in Electromagnetics Research Letters* [en línea], 2014. vol. 48, no. June, pp. 1-6. ISSN 19376480. DOI 10.2528/PIERL14062402. [Consulta: 26 agosto 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/275878800\\_A\\_complex\\_impedance-transforming\\_coupled-line\\_balun](https://www.researchgate.net/publication/275878800_A_complex_impedance-transforming_coupled-line_balun).