



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIÓN**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACOPLADOR
DIRECCIONAL HÍBRIDO DE 180 GRADOS DE MÚLTIPLES
SECCIONES CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA BANDA
C”.**

AUTOR: ROMERO ARMAS DAVID ANDRÉS

DIRECTOR: ING. HARO RAÚL

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACOPLADOR DIRECCIONAL HÍBRIDO DE 180 GRADOS DE MÚLTIPLES SECCIONES CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA BANDA C”** realizado por el señor David Andrés Romero Armas, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor David Andrés Romero Armas para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de Enero del 2017



ING. RAÚL HARO
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, David Andrés Romero Armas, con cédula de identidad N° 1723434187-7, declaro que este trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACOPLADOR DIRECCIONAL HÍBRIDO DE 180 GRADOS DE MÚLTIPLES SECCIONES CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA BANDA C” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 30 de Enero del 2017

DAVID ANDRÉS ROMERO ARMAS

C.C:172343418-7



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, David Andrés Romero Armas, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ACOPLADOR DIRECCIONAL HÍBRIDO DE 180 GRADOS DE MÚLTIPLES SECCIONES CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA BANDA C” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 30 de Enero del 2017

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'David Romero', is written over a horizontal line.

DAVID ANDRÉS ROMERO ARMAS

C.C:172343418-7

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a “Rómulo Romero, Yolanda Armas, Matías Romero, Silvana Romero y Rómulo Romero” mi familia, quienes me apoyaron desde el inicio de esta etapa muy difícil, y me seguirán apoyando con su amor incondicional. A mis padres por estar presente todo el tiempo brindándome todo su apoyo y confianza durante el trayecto de mi carrera, ayudándome a salir adelante, corrigiendo fallas y a su vez celebrando mis triunfos, gracias de todo corazón.

También dedico a mis primos, amigos, compañeros y profesores que pusieron su confianza en mí, especialmente a aquellos amigos y compañeros que a lo largo de la etapa universitaria hemos compartido momentos inolvidables y muy gratos.

David Romero

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme cumplir un logro más en mi vida, brindándome fortaleza y mucho valor para salir adelante.

A toda mi familia, en especial a mi padre que con su ejemplo y dedicación me supo dar consejos para salir adelante en esta etapa de mi vida, gracias por ayudarme a cumplir mis metas como persona y profesional. Gracias a mi madre Yolanda, aquella mujer que siempre ha estado conmigo en las buenas y malas. A ellos mi mayor agradecimiento.

A mi director de tesis al Ingeniero Raúl Haro, por sus ideas y apoyo, un excelente profesor y un gran director, el cual siempre estuvo dispuesto a cualquier tipo de consulta a cualquier hora del día, supo dar una palabra de ánimo para continuar adelante, además al grupo de profesores que trabajaron a lo largo de mi carrera Universitaria, forjando en mí un profesional de bien.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, una gran Institución Educativa que tiene como máximo objetivo formar a profesionales de éxito, honestos y dispuestos a ser los mejores en lo que se proponen

Un especial agradecimiento a “COMPLEMENTOS ELECTRÓNICOS”, una distinguida empresa que trabajó en conjunto en la consecución de este proyecto de titulación brindando los equipos para el análisis y pruebas.

David Romero

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e Importancia.....	3
1.3. Alcance del Proyecto.....	5
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo General.....	7
1.4.2. Objetivos Específicos	7
CAPÍTULO 2	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Guía de Onda (Wave Guide).....	9
2.2. Tecnología Microstrip	10
2.2.1. Fórmulas de parámetros en una línea Microstrip	12
2.3. Aplicaciones de la Ingeniería de Microondas	14
2.4. Redes de 4 Puertos	15
• Simetría	15
• Reciprocidad	16
2.4.1. Propiedades de las redes de cuatro puertos	17

2.5. Acopladores Direccionales y Divisores de Potencia.....	18
2.5.1. Acoplador Direccional Híbrido de 180°	19
2.5.1.1. Análisis de modo par-impar del Anillo Cuadratura Híbrida de 90°	21
2.5.1.2. Análisis de modo par-impar del Anillo Híbrido 180°	23
2.6. Matriz de Parámetros “S”	28
CAPÍTULO 3	29
MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.1. Introducción.....	29
3.2 Software para Diseño y Simulación en Microstrip.....	29
3.2.1. Advanced Design System (ADS)	29
3.2.1.1 Herramientas Principales del ADS	32
3.2.1.1.1 LineCalc	32
3.3.1 Software: Matlab	34
3.4 Materiales	34
3.4.1. Sustrato	34
3.4.1.1. Características del Sustrato FR-4	37
3.4.2. Conectores de Radio Frecuencia	37
3.3.2.1 Conector Hembra recto para PCB	39
3.3.2.2. Conector Macho de Engaste	39
3.3.3. Placa de Circuito Impreso (PBC)	40
3.3.4. Cables para la Conexión a Equipos	42
3.3.5. Cargas	43
3.3.6 Equipos de Medición.....	45
CAPÍTULO 4	47
DISEÑO DEL ACOPLADOR DIRECCIONAL HÍBRIDO DE 180°	47
4.1. Pasos para el diseño de un acoplador direccional híbrido.....	47

4.2. Criterios de diseño de un acoplador direccional.....	48
4.2.1. La impedancia característica (Z_0).....	48
4.2.2. La frecuencia de diseño del acoplador (f)	48
4.2.3. La constante dieléctrica relativa (E_r).....	49
4.2.4. La longitud eléctrica efectiva (E_{Eff})	49
4.3. Diseño y simulación en ADS de un acoplador direccional Híbrido de 180^0 ... 49	
sección simple.	49
4.3.1. Valores Parámetros de Diseño	49
4.3.2. Cálculos para Diseño del anillo híbrido de 180^0 acopladas de.....	50
sección simple	50
4.3.3. Desarrollo del acoplador direccional híbrido de 180^0 de sección	51
simple a 6GHz	51
4.3.4. Simulación en 3D del Anillo Híbrido de 180^0 a 6 GHz	55
4.3.5. Construcción e implementación del Anillo Híbrido de 180^0	57
de sección simple.....	57
4.3.6. Resultados de la simulación del acoplador direccional Híbrido	59
de sección simple a 6GHz	59
4.3.7. Comparación de resultados simulados y medidos del acoplador	63
direccional Híbrido de sección simple a 6GHz.....	63
4.4. Diseño y simulación de un Acoplador de 4 Entradas y 4 Salidas	71
4.4.1. Valores Parámetros de Diseño	75
4.4.2. Simulación en 3D del Acoplador Direccional Híbrido	75
de 180^0 4x4 a 6GHz.....	75
4.4.3. Construcción e implementación del Acoplador de 4x4.....	77
4.4.4. Resultados de la simulación del Acoplador de 4x4 utilizando.....	79

un anillo híbrido de 180^0 con 50% de ancho de banda	79
4.4.5. Comparación de resultados simulados y medidos del Acoplador	90
de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180^0 a 6 GHz.	90
CAPÍTULO 5	99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
5.1. Conclusiones	99
5.2. Recomendaciones	102
5.3. Trabajos Futuros.....	103
CAPÍTULO 6.....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	105

Índice de Tablas

Tabla 1 Parámetros del Sustrato FR-4	35
Tabla 2 Tipos de Conectores SMA con sus respectivas medidas	38
Tabla 3 Características cable Pasternack	43
Tabla 4 Características carga 50Ω	44
Tabla 5 Valores definidos de los parámetros de diseño	50
Tabla 6 Parámetros W y L Acoplador Híbrido 180°	53
Tabla 7 Parámetros W y L Acoplador Híbrido 180°	53
Tabla 8 Nivel de transmisión por Intensidad de Color	56
Tabla 9 Parámetros S expresados en dB - Simulación.....	60
Tabla 10 Relación entre magnitud y los Parámetros S a 6 GHz	61
Tabla 11 Datos obtenidos a una distancia de 50 cm	63
Tabla 12 Parámetros S expresados en dB - Simulación.....	80
Tabla 13 Parámetros S Acoplador de Múltiples Secciones	86

Índice de Figuras

Figura 1 El espectro Electromagnético	3
Figura 2 Guías de Onda.....	9
Figura 3 Estructura de una línea Microstrip.....	11
Figura 4 Simetría de Red de “n” puertos	16
Figura 5 Reciprocidad Red de 4 Puertos.....	16
Figura 6 Acopladores y Divisores de potencia	18
Figura 7 Acoplador Direccional Híbrido de 180°	19
Figura 8 Acoplado Direccional Híbrido de 180° con tecnología Microstrip	20
Figura 9 Circuito del Acoplador híbrido ramificada en forma normalizada.....	21
Figura 10 Descomposición de acoplador de línea ramificada modo par-impar.....	22
Figura 11 Descomposición de modo par e impar del híbrido del puerto 1	24
Figura 12 Descomposición de modo par e impar del híbrido de anillo	26
Figura 13 Software Advanced Design System (ADS).....	30
Figura 14 Interface del Software Advanced Design System (ADS).....	31
Figura 15 Herramienta LineCalc de ADS	32
Figura 16 Parámetros Físicos W y L en mm.....	33
Figura 17 Parámetros del Sustrato y Parámetros del Componente	33
Figura 18 Sustrato FR-4	35
Figura 19 Conector Hembra recto para PCB	39
Figura 20 Conector macho de engaste	39
Figura 21 Placa PBC Acoplador Direccional Híbrido 180°.....	41
Figura 22 Placa PBC Acoplador Híbrido 180° Múltiples Secciones	41

Figura 23 Cable PASTERNAK SMA-N 18GHz	42
Figura 24 Cargas de 50 ohm colocados en los puertos no acoplados	44
Figura 25 Cargas 50 ohm	45
Figura 26 Analizador de microondas N9918A.	46
Figura 27 Paleta de Componentes TLines-Microstrip	51
Figura 28 Componente MCurve para Acoplador Híbrido de 180 ⁰	52
Figura 29 Acoplador direccional híbrido de 180 ⁰ de sección simple a 6 GHz	54
Figura 30 Acoplador Direccional Híbrido de 180 ⁰ visto en 3D.....	55
Figura 31 Paleta de Intensidad de señal	55
Figura 32 Acoplador Híbrido inducido por cada puerto	57
Figura 33 Layout Anillo Híbrido 180 ⁰	58
Figura 34 Layout *.gbr.....	58
Figura 35 Acoplador direccional de sección simple a 6 GHz implementado	59
Figura 36 Parámetros S expresados en dB - Simulación	59
Figura 37 Análisis de ángulos Acoplador 180 ⁰	62
Figura 38 Parámetros S expresados en Fase - Simulación.....	62
Figura 39 Parámetro S en dB (Medido)	64
Figura 40 Parámetro S en dB Simulado vs Medido.....	64
Figura 41 Parámetro S (1,1) Simulado vs Medido.....	65
Figura 42 Parámetro S (1,2) Simulado vs Medido.....	66
Figura 43 Parámetro S (1,3) Simulado vs Medido.....	66
Figura 44 Parámetro S en Fase Medido	67
Figura 45 Parámetro S (1,2) en Fase Simulado vs Medido.....	68
Figura 46 Parámetro S (1,3) en Fase Simulado vs Medido.....	69
Figura 47 Parámetro S (4,2) en Fase Simulado vs Medido.....	70

Figura 48 Parámetro S (4,3) en Fase Simulado vs Medido.....	70
Figura 49 Acoplador 4x4 inducido por los puertos 1-5-9-13.....	71
Figura 50 Acoplador 4x4 inducido por los puertos 4-8-12-16.....	72
Figura 51 Distribución de Puertos de Acoplador Direccional Híbrido 4x4.....	73
Figura 52 Acoplador Direccional Híbrido de 180^0 4x4 a 6Hz.....	74
Figura 53 Acoplador Direccional Híbrido de 180^0 4x4 visto en 3D.....	75
Figura 54 Acoplador Híbrido de 180^0 4x4 inducido por cada puerto.....	76
Figura 55 Layout Anillo Híbrido 180^0	77
Figura 56 Layout *.gbr.....	78
Figura 57 Acoplador direccional Híbrido de 180^0 4x4 a 6 GHz implementado.....	78
Figura 58 Parámetros S expresados en dB – Simulación.....	79
Figura 59 Análisis de ángulos Acoplador 4x4.....	83
Figura 60 Análisis de Ángulos Acoplador de 4x4 del Puerto 1- Acoplador 1.....	84
Figura 61 Análisis de Ángulos Acoplador de 4x4 del Puerto 4 - Acoplador 1.....	84
Figura 62 Análisis de Ángulos Acoplador de 4x4 del Puerto 1- Acoplador 3.....	85
Figura 63 Análisis de Ángulos Acoplador de 4x4 del Puerto 4 - Acoplador 3.....	85
Figura 64 Parámetros S expresados en Fase – Simulación (Puerto 1).....	86
Figura 65 Parámetros S expresados en Fase – Simulación (Puerto 2).....	87
Figura 66 Parámetros S expresados en Fase – Simulación (Puerto 5).....	88
Figura 67 Parámetros S expresados en Fase – Simulación (Puerto 6).....	89
Figura 68 Parámetro S (1,1) Simulado vs Medido.....	90
Figura 69 Parámetro S (2,2) Simulado vs Medido.....	91
Figura 70 Parámetro S (5,5) Simulado vs Medido.....	91
Figura 71 Parámetro S (6,6) Simulado vs Medido.....	92
Figura 72 Parámetro S – Puerto 1 en Fase Simulado vs Medido.....	93

Figura 73 Parámetro – Puerto 2 en Fase Simulado vs Medido.....	94
Figura 74 Parámetro S – Puerto 5 en Fase Simulado vs Medido.....	96
Figura 75 Parámetro S (6,8) en Fase Simulado vs Medido.....	97

RESUMEN

Actualmente en el entorno de las telecomunicaciones se requieren sistemas de comunicaciones que trabajen con altas frecuencias, es decir en el rango de los GHz o THz y a que además sean dispositivos capaces de manejar anchos de banda mayores con la finalidad de transportar gran cantidad de información de datos y poder brindar una serie de servicios dentro de las telecomunicaciones. En esta investigación se diseñarán e implementarán diseños de acopladores direccionales híbridos de 180° con el software ADS (Advanced Design System), estos diseños están desarrollados para que trabajen en los rangos de frecuencias de la banda C del espectro de 3.9 – 4.1 GHz en modo DOWN LINK y 5.9 – 6.1 GHz en modo UP LINK. En una primera parte se realizará un estudio del estado del arte sobre estos acopladores, su análisis matemático, materiales y métodos a utilizarse. Finalmente se basará en un concepto teórico de estos dispositivos, el cual establece que mientras se adhiere secciones a un acoplador el ancho de banda aumenta, por tanto se generarán acopladores de múltiples secciones. Como etapa final se realizará la implementación de los diseños de acopladores de 1 y 4 secciones en tecnología *Microstrip* a 6 GHz y su posterior análisis con los datos teóricos. Los resultados obtenidos muestran un nuevo acoplador híbrido con 4 puertos de entrada y 4 puertos de salida.

Palabras Clave

- **ADS** (*Advanced Design System*)
- **MICROSTRIP**
- **ACOPLADOR HÍBRIDO DE 180°**
- **PARÁMETROS S**
- **LINECALC**

ABSTRACT

Currently, in the telecommunications environment, communications systems are required that work with high frequencies, in the range of GHz or THz, as well as devices capable of handling larger bandwidths in order to carry large amounts of information and able to provide a variety of telecommunications services. This research will design and implement 180° hybrid directional coupler designs with ADS (Advanced Design System) software; these designs will be developed to work on the C-band frequency ranges of the 3.9 - 4.1 GHz spectrum in DOWN mode LINK and 5.9 - 6.1 GHz in UP LINK mode. In the first part, a study of the state of the art on these couplers, their mathematical analysis, materials and methods to be used will be carried out. Finally, it will be based on a theoretical concept of these devices, which establishes that while attaching sections to a coupler the bandwidth increases, therefore couplers of multiple sections will be generated. The final stage will be the implementation of the designs of 1 and 4 section couplers in 6 GHz *Microstrip* technology and their subsequent analysis with the theoretical data. The results obtained in the project show a new hybrid coupler with 4 input ports and 4 output ports.

Keywords

- Advanced Design System (ADS)
- MICROSTRIP
- HYBRID COUPLER 180° (rat race)
- S PARAMETERS
- LINECALC

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El uso de la tecnología de microonda a nivel mundial siempre ha sido motivo de estudio e investigación, por este motivo el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ofrece dentro de su malla académica materias como Electrónica, Sistemas de Radio Frecuencia, Sistemas de Comunicaciones, Electromagnetismo, entre otras, donde se enfoca el estudio de principios teóricos como prácticos de equipos y dispositivos de laboratorio enfocados en este caso principalmente a los Sistemas de Microondas y Radio Frecuencia, siendo estos de gran ayuda dentro del campo de investigación generada en la institución (ESPE, 2010).

Comúnmente en sistemas de microondas se emplean dispositivos pasivos recíprocos de diferentes tipos, por ejemplo en dispositivos de una puerta como: conectores de microondas, terminaciones y cargas adaptadas; dispositivos de dos puertas como: atenuadores, desfasadores, redes de adaptación con *stubs*; dispositivos de tres puertas como: divisores/combinadores de potencia, y dispositivos de cuatro puertas como: los acopladores direccionales (Rodríguez, 2009).

Estos últimos, los acopladores direccionales en general, a través de los años han sido elaborados en guía de onda y en otro tipo de tecnología, cumpliendo ciertos

requerimientos o parámetros según el fin de la aplicación a utilizarse (Mauricio & Gabriel Calle, 2013) pero en este trabajo de investigación, se empleará la tecnología *Microstrip* la cual genera varias ventajas con respecto a antiguas tecnologías tanto en tamaño, peso y principalmente en su bajo costo.

Existe un gran número de aplicaciones que emplea las frecuencias de microondas distribuidas en el espectro electromagnético de (1 – 100 GHz) para enlaces de comunicaciones, los cuales se conocen como enlaces de microondas, donde su uso está regulado por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), por este motivo el diseño y construcción del acoplador híbrido de 180 grados se enfocará a la banda “C” la cual corresponde al espectro electromagnético de 3.9 – 4.1 GHz en modo DOWN LINK y 5.9 – 6.1 GHz en modo UP LINK. Dicha normativa esta regularizada por la IEEE US.

Trabajar en la Banda C nos permitirá enfocar esta investigación a diversas aplicaciones en el campo de la radioastronomía, radares modernos, comunicación por microondas, muestreo de la señal incidente para el control de la misma, redes inalámbricas, entre otras. En la figura 1 se muestra el espectro electromagnético con su respectiva longitud de onda a frecuencias específicas.

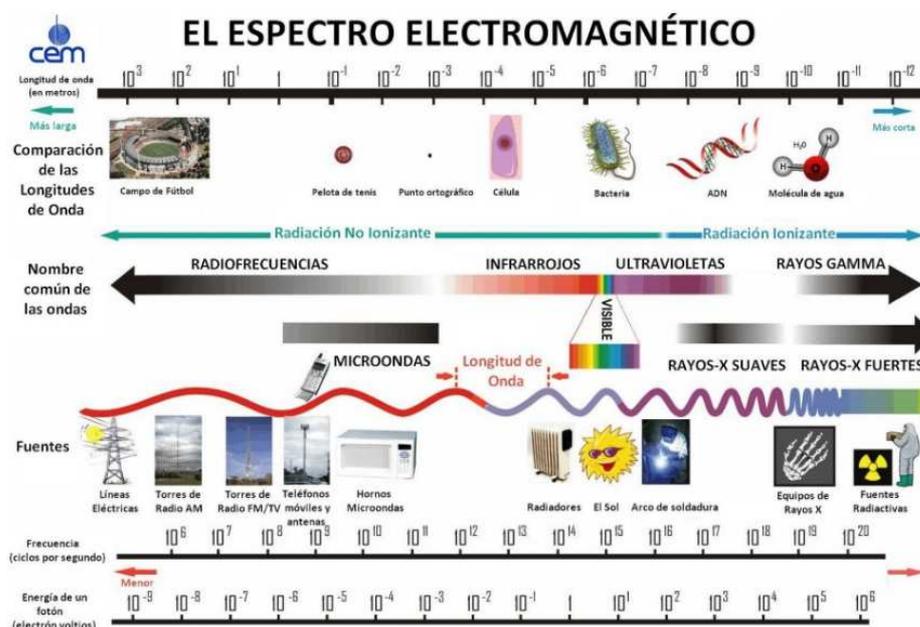


Figura 1 El espectro Electromagnético

Fuente: (BIOMIX, s.f.)

Cabe mencionar adicionalmente que un acoplador direccional en general y el híbrido a su vez tiene cuatro puertos. Estos puertos se distribuyen de la siguiente manera cuando uno de los puertos es alimentado: uno de sus puertos queda totalmente aislado respecto al otro puerto de entrada, de los otros dos puertos restantes, un puerto es el que recibe la mayor parte de la señal comúnmente conocido como puerto transmitido y el otro puerto recibe una parte fija de la señal, a este puerto se lo conoce como puerto acoplado (Seco A. , Mayo 2009).

1.2. Justificación e Importancia

A través de la historia se ha marcado una gran importancia el uso de sistemas de comunicaciones de microondas en varios escenarios, donde la característica del transmisor es enviar una o varias señales hacia el receptor mediante ondas electromagnéticas. Por tanto uno de estos dispositivos que permite un acople adecuado de las señales, es el acoplador direccional híbrido, el cual realiza un reparto equitativo de la potencia entre su rama directa y acoplada.

Los acopladores híbridos de 180°, también conocidos como anillos híbridos de 180 grados, se emplean en diversas aplicaciones en dispositivos de microondas, por ejemplo en circuitos donde resulta necesario dividir la potencia de entrada entre varias ramas, o bien combinar potencias procedentes de distintos puertos de entrada, ya sea en fase o contra fase de forma equilibrada entre sus ramas (Cagigas, Villa, Artal, & Hoyland, 2010); por tanto el diseño y la construcción del acoplador direccional híbrido ayudará en una extensa gama de aplicaciones en sistemas en el entorno de las microondas, tales como: amplificadores balanceados, acopladores, mezcladores balanceados, desfasadores, discriminadores de frecuencia, moduladores, multiplicadores de frecuencia, redes de alimentación para arrays de antenas, entre otros.

El acoplador híbrido de 180° en su configuración más típica se basa en una red de cuatro accesos compuesta por tres líneas de longitud $\lambda/4$, y una de longitud $3\lambda/4$, todas ellas de impedancia $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$.

Este acoplador direccional híbrido es muy conocido y su estudio teórico como se puede encontrarse en (Rodríguez, 2009), (Pozar D. M., 2009). Sin embargo la construcción de este anillo genera algunas complicaciones principalmente por los tramos sintonizados $\lambda/4$ y $3\lambda/4$, que sólo asegura un buen comportamiento en fase a frecuencias próximas a la de diseño, lo que limita su uso a aplicaciones con un ancho de banda mayor.

Por tanto el presente proyecto se origina con el fin de establecer un método y/o procedimiento de diseño del anillo híbrido convencional de 180 grados, planteando la concatenación de cuatro anillos híbridos a una frecuencia de operación de 6 GHz, lo cual nos permitirá incrementar significativamente el ancho de banda de respuesta del circuito manteniendo la frecuencia de operación en el rango deseado, el implementar la múltiple sección en el acoplador permite incrementar el ancho de banda en aplicaciones actualmente desarrolladas lo cual ayuda en la mejora de su rendimiento

del mismo; este proyecto novedoso se lo realizará utilizando tecnología *Microstrip* que es una técnica de fácil fabricación y de bajo coste, desarrollada mediante el software ADS (*Advanced Design System*).

Adicionalmente la principal ventaja de emplear como tecnología las líneas *Microstrip* es que el tamaño del dispositivo y ubicación de los elementos puede ser optimizado con un bajo coste computacional y bajos costos económicos.

1.3. Alcance del Proyecto

Para el presente trabajo de investigación, se necesitará en primera instancia de un período de la investigación, donde se realizará una revisión de la literatura científica existente sobre el diseño de acopladores direccionales y acopladores híbridos, enfocados principalmente en el diseño y construcción del anillo híbrido de 180 grados a diferentes frecuencias y con distinto ancho de banda. A partir de la investigación realizada del estado del arte se diseñará un prototipo de acoplador híbrido de 180 grados en forma de anillo simple a una frecuencia de operación de 6 GHz, es decir, que el acoplador híbrido trabajará en la banda C.

Para una primera etapa el acoplador direccional híbrido será simulado mediante la ayuda del software ADS (*Advanced Design System*), con los parámetros de diseño planteados en el capítulo 3 donde se detallan los materiales y métodos para el diseño en general del acoplador. Esta primera simulación permitirá evaluar al anillo en todas sus propiedades fundamentales como son: que la red de cuatro puertos sea recíproca, sin pérdidas y que mantenga su simetría. En el capítulo 2 se detallará el análisis matemático de los acopladores direccionales híbridos y su matriz *Scattering*, comúnmente conocida como matriz [S], tomando a este modelo como base para el desarrollo de este proyecto de investigación.

En la segunda etapa de desarrollo del proyecto se verificará los resultados del anillo híbrido de 180 grados y sus características fundamentales, al verificar que se cumplan estas características, posteriormente se generará el layout del dispositivo. Una vez generado el layout, se procederá a extraer el archivo imprimible tipo *gerber*, el cual nos permite representar físicamente el diseño realizado en el sustrato designado.

Con el diseño físico se procederá a realizar pruebas de funcionamiento reales mediante el uso del Analizador de Microonda N9918A propiedad de KEYSIGHT TECHNOLOGIES, dispositivo fabricado por Agilent Technologies, el cual nos muestra las gráficas de potencia y de fase de cada uno de los puertos acoplados. Es muy importante en estas pruebas el uso de cargas de 50 ohm en los puertos que no se encuentran acoplados.

Dentro de una tercera etapa se procederá a adaptar dentro de un mismo layout una secuencia de cuatro anillos híbridos de 180⁰, donde se buscará obtener resultados comparables con los realizados teóricamente logrados tanto en la potencia de salida como en fase en software, se realizará la comparación de los resultados tanto en simulación como con los valores medidos. Igual que en caso anterior para la implementación, se construirá el acoplador híbrido de 180 grados multisección, refiriéndose a que el diseño presentará cuatro secciones de anillos distribuidas de manera óptima en tecnología *Microstrip*.

Se elaborarán varios diseños de múltiples secciones buscando el más óptimo en cuanto al cumplimiento de parámetros, frecuencia de operación y ancho de banda. Con este diseño al igual que con el anillo híbrido de 180 grados de una sección, se procederá a realizar las pruebas de funcionamiento con el Analizador de Microonda N9918A propiedad de KEYSIGHT TECHNOLOGIES.

Finalmente el analizador de microonda tiene la opción de generar un archivo donde se muestra todos los datos de los gráficos generados en dos dimensiones (x: y); estos serán manejados con un programa a través del software Matlab 2014, el cual presenta la ventaja de mostrar los datos tiempo real y además permite una fácil interpretación de los resultados, esto permitirá realizar para las respectivas comparaciones entre las medidas reales y las de simulaciones, análisis de las gráficas obtenidas. Siendo estas últimas las conclusiones y recomendaciones de este proyecto de investigación la base para posteriores trabajos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseño, optimización e implementación de un acoplador direccional híbrido de 180 grados de múltiples secciones mediante tecnología *Microstrip* para banda C.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el Estado del Arte de acopladores direccionales de microondas de cuatro puertos, en base a investigaciones y trabajos relacionados.
- Diseñar y simular el acoplador híbrido y posteriormente generar cuatro secciones adicionales de este acoplador mediante el software Advanced Design System (ADS).
- Verificar el adecuado funcionamiento del acoplador direccional híbrido de 180°.
- Desarrollar un método de diseño del acoplador direccional híbrido de 180° en base a investigaciones.
- Construir el acoplador híbrido de cuatro secciones utilizando componentes de bajo coste y de menor tamaño y peso posible.

- Evaluar el desempeño y correcto funcionamiento del acoplador híbrido de 180 grados de doble banda para frecuencias de 6-8 GHz.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Guía de Onda (Wave Guide)

La guía de onda es un medio de comunicación muy usado y se basa en cualquier estructura física que guía una onda electromagnética. Dependiendo de la frecuencia a utilizar pueden ser construidas con materiales dieléctricos o conductores. Básicamente son del tipo rectangular, circular y elíptica, los cuales operan en el rango de las frecuencias comúnmente llamadas como microondas (en el orden de GHz), como se ilustra en la figura 2 (RedTauros, s.f.).



Figura 2 Guías de Onda

Fuente: (Ezequiel & Nicolas, 2012)

La construcción de este tipo de guía de onda se basa en material metálico por lo que no se puede decir que sea un cable. El ancho de banda es considerablemente grande y es usada principalmente cuando se requiere bajas pérdidas en la señal en condiciones de muy alta potencia como el caso desde una antena de microondas al receptor/transmisor de radio frecuencia.

Dentro de las aplicaciones típicas que emplean este medio de transmisión se tienen las centrales telefónicas, debido a que se necesita bajar/subir señales provenientes de antenas de satélite o estaciones terrenas de microondas (Galeon, s.f.)

2.2. Tecnología Microstrip

Es una de las tecnologías más manejadas en el campo de las microonda y radio frecuencia, es la tecnología impresa de líneas de transmisión tipo planar, más conocida como Microstrip. Las líneas Microstrip se elaboran en diferentes materiales dieléctricos mediante varios procesos, siendo el más empleado el proceso fotolitográficos (Seco Á. , 2009). Algunas de sus principales características son las detalladas a continuación:

- Bajo costo, esto es debido al proceso de fabricación al imprimir directamente sobre una placa PCB y utilizar materiales económicos.
- Potencias bajas, esto debido a que las dimensiones de las Microstrip son relativamente pequeñas.
- Fácil integración de componentes activos y pasivos.

Este tipo de línea de transmisión radica en el enrutamiento del metal de anchura fija el cual será el conductor de las señales, junto con un plano de tierra sólido ininterrumpido situado directamente debajo, el cual conforma la capa adyacente. Por

ejemplo, una Microstrip en la capa 1 (metal superior) requiere un plano de masa sólido en la capa 2 como se muestra en la figura 3.

La anchura del enrutamiento, el espesor de la capa dieléctrica y el tipo de dieléctrico determinan la impedancia característica que típicamente son 50Ω .

La estructura elemental de una línea Microstrip está constituida por: un plano de tierra en la parte inferior sobre el que se coloca un dieléctrico de permitividad relativa ϵ_r y espesor H. Sobre el sustrato se coloca la Microstrip de espesor t, ancho W y longitud L. Esta estructura se ilustra en la Figura 3.

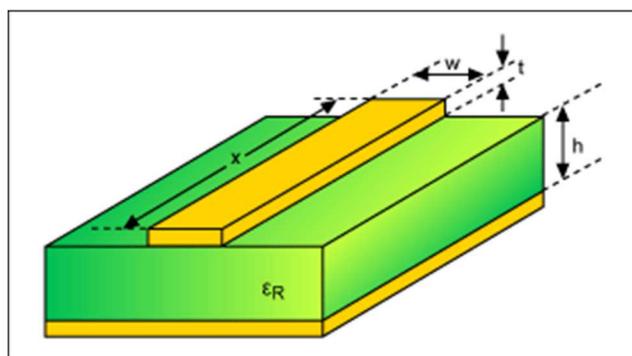


Figura 3 Estructura de una línea Microstrip

Fuente: (Integrated, s.f.)

La estructura de la línea Microstrip es abierta, debido a que el plano de tierra se encuentra separado de la cinta superior mediante el sustrato, por lo cual la línea Microstrip no puede soportar un modo TEM puro ya que la velocidad de fase TEM en una región dieléctrica es $c/\sqrt{\epsilon_r}$, mientras que en una región de aire es c . Es por esta razón que la línea Microstrip maneja un modo de propagación quasi-TEM, con lo que se define que la velocidad de fase y la constante de propagación se expresan como (Pozar D. M., 2012):

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (1)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\varepsilon_e} \quad (2)$$

El parámetro ε_e es la constante dieléctrica efectiva de la Microstrip. Este parámetro ε_e depende del dieléctrico, el espesor del sustrato, frecuencia, entre otras características.

Para obtener un acercamiento de ε_e , se realiza un análisis a partir del valor de constante relativa dieléctrica ε_r en función del ancho W y del espesor de la Microstrip H.

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} - \frac{1}{\sqrt{1 + 12H/W}} \quad (3)$$

2.2.1. Fórmulas de parámetros en una línea Microstrip

Para el análisis de las fórmulas de las líneas Microstrip se baja a partir de las dimensiones de la línea Microstrip y la constante relativa dieléctrica, por tanto, se procede a realizar una aproximación para el cálculo de la impedancia característica de la Microstrip, como se muestra a continuación en la expresión 4.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_e}} \ln \left(\frac{8H}{W} + \frac{W}{4H} \right) \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_e} \left[\frac{W}{H} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{H} + 1.444 \right) \right]} \end{cases} \quad (4)$$

En el primer caso para calcular Z_0 se utiliza cuando la relación $W / H \leq 1$. Al tener una relación $W / H \geq 1$ se utiliza el segundo caso de la expresión 4.

Para realizar un cálculo de la relación entre W / H , a partir de una impedancia característica definida Z_0 y un dieléctrico con constante relativa ϵ_r , se procede a utilizar la expresión 5 detallada a continuación:

$$\frac{W}{H} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \end{cases} \quad (5)$$

Al tener una relación $W / H < 2$, se utiliza el primer caso. En cambio cuando se tiene una relación $W / H > 2$ se utiliza el segundo caso. Para el cálculo de A y B , se emplean las fórmulas descritas en 6 y 7 respectivamente.

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (6)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

En último lugar al considerar un modo de propagación quasi-TEM, se puede determinar la atenuación α , la cual se expresa en función de la atenuación del dieléctrico α_d y la atenuación existente de los conductores α_c . Por lo tanto la atenuación total es semejante a la suma de las atenuaciones existentes del dieléctrico y de los conductores, como se muestra a continuación en la expresión 8 (Monzón, 2009).

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c \quad (8)$$

Se pueden realizar los cálculos de α_d y α_c , con el uso de las expresiones 9 y 10 respectivamente, las cuales se detallan a continuación:

$$\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2} \varepsilon_r (\varepsilon_e - 1) \varepsilon_e (\varepsilon_r - 1) = \frac{k \tan \delta}{2} \frac{\varepsilon_r (\varepsilon_e - 1)}{\sqrt{\varepsilon_e (\varepsilon_r - 1)}} \quad (9)$$

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 W} \quad (10)$$

Las unidades de las atenuaciones son Np/m, y el parámetro $R_s = \sqrt{\omega \mu_0 / 2 \sigma}$ representa la resistividad del conductor (Pozar D. M., 2012).

2.3. Aplicaciones de la Ingeniería de Microondas

Dentro de las aplicaciones de las microondas se maneja el concepto de que tanto las altas frecuencias y las longitudes de onda cortas de la energía de microondas provocan dificultades en el análisis y diseño de dispositivos, lo cual es un parámetro muy significativo para el desarrollo de este tipo de aplicaciones. Por tanto para desarrollar ciertas aplicaciones se deben considerar las siguientes pautas:

- La ganancia de antena es directamente proporcional al tamaño eléctrico de la antena. A frecuencias más altas, se puede obtener más ganancia de antena para un tamaño de antena físico dado.
- Se prioriza la velocidad de datos, por tanto, a frecuencias más altas se puede obtener más ancho de banda. El 1% de ancho de banda de 600 MHz es 6 MHz, si empleamos la Modulación de desplazamiento de fase binario, puede proporcionar una velocidad de datos de aproximadamente 6 Mbps, mientras que el 1% de ancho de banda de 60 GHz es de 600 MHz, lo que permite una velocidad de datos de 600 Mbps.
- Algunas aplicaciones con frecuencias de microondas son únicas en las áreas de ciencia básica, teledetección, diagnóstico y tratamientos médicos y métodos de calefacción.

La mayoría de las aplicaciones actuales de Radio Frecuencia y tecnología de microondas son: redes Inalámbricas, sistemas de comunicaciones, sistemas de seguridad inalámbricos, sistemas de radar, teledetección ambiental y los sistemas médicos.

Los sistemas satelitales también dependen de la tecnología RF y microondas, y los satélites han sido desarrollados para proporcionar conexiones celulares (voz), video y datos en todo el mundo. Los sistemas satelitales más pequeños, como el sistema de posicionamiento global por satélite (GPS) y el sistema de radiodifusión directa por satélite (DBS), han tenido un gran éxito a nivel mundial (Pozar D. M., 2009).

2.4. Redes de 4 Puertos

Una red de cuatro puertos ideal presenta la propiedad de que una onda incidente en el puerto 1 acopla la potencia al puerto 2 y 3, siendo estos los puertos de salida, pero no al puerto 4, el cual es el otro puerto de entrada, de manera semejante si la onda incide por el puerto 4 se acopla la potencia al puerto 2 y 3 pero no al 4. Entonces en si los puertos 1 y 4 están desacoplados (Vallejo & Cervantes, 2015). Las principales características de las redes de cuatro puertos son:

- **Simetría**

Es la propiedad de más importancia dentro del análisis de una red de 4 puertos y hace referencia a la simetría que posee la red con respecto a un plano determinado, tal como se observa en la figura 4. (Vallejo & Cervantes, 2015).

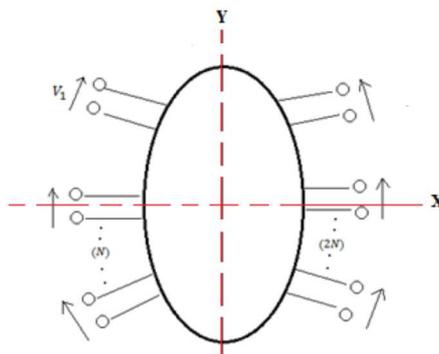


Figura 4 Simetría de Red de “n” puertos

Fuente: (Seco A. , Mayo 2009)

- **Reciprocidad**

Una red recíproca es aquella red pasiva en la que el intercambio entre un generador y un medidor no produce la modificación de la lectura del segundo (Vallejo & Cervantes, 2015). Cuando una red es simétrica, recíproca y sin pérdidas se puede obtener por deducción las siguientes igualdades en su matriz de parámetros “S”, como se ilustra en la figura 5.

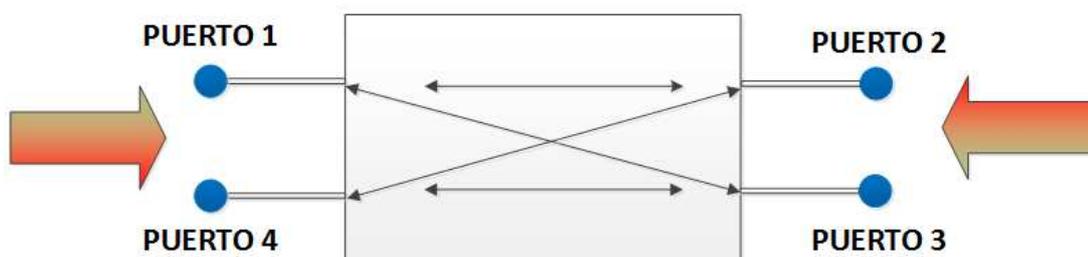


Figura 5 Reciprocidad Red de 4 Puertos

Fuente: (Vallejo & Cervantes, 2015)

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44}$$

$$S_{21} = S_{12} = S_{34} = S_{43}$$

$$S_{31} = S_{13} = S_{42} = S_{24}$$

$$S_{41} = S_{32} = S_{23} = S_{14}$$

2.4.1. Propiedades de las redes de cuatro puertos

Una red de cuatro puertos tiene la siguiente matriz

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix}$$

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0, k \neq j}$$

Si se considera que $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44}$, y además se tiene que $[S]$ es unitaria y la red recíproca, entonces se deben cumplir las siguientes relaciones que se derivan de $[S][S]^{t*} = [I]$.

$$|S_{11}|^2 + |S_{13}|^2 |S_{14}|^2 = 1$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 |S_{24}|^2 = 1$$

$$|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 |S_{34}|^2 = 1$$

$$|S_{14}|^2 + |S_{24}|^2 |S_{34}|^2 = 1$$

$$S_{13} S_{23}^* + S_{14} S_{24}^* = 0$$

$$S_{12} S_{23}^* + S_{14} S_{34}^* = 0$$

$$S_{12} S_{24}^* + S_{13} S_{34}^* = 0$$

$$S_{12} S_{13}^* + S_{24} S_{24}^* = 0$$

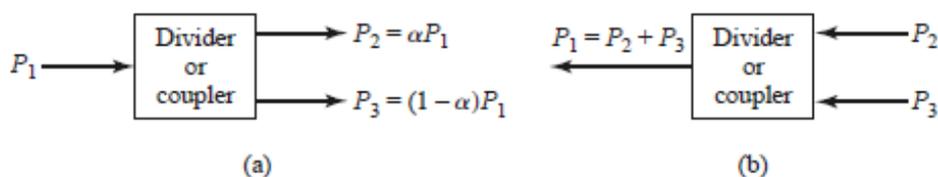
$$S_{12} S_{14}^* + S_{23} S_{34}^* = 0$$

$$S_{13} S_{14}^* + S_{23} S_{24}^* = 0$$

2.5. Acopladores Direccionales y Divisores de Potencia

Los divisores de potencia y los acopladores direccionales son componentes de microondas pasivos usados para la división de potencia o la combinación de potencia, como se muestra en la Figura 6. Cuando una señal de entrada se divide en dos o más señales de salida de menor potencia, tenemos una división de potencia, mientras que un combinador de potencia acepta dos o más señales de entrada y las combina en un puerto de salida. El acoplador o divisor puede tener tres puertos, cuatro puertos, o más, y puede ser idealmente sin pérdida. Las redes de tres puertos toman la forma de juntas en T y otros divisores de potencia, mientras que las redes de cuatro puertos adoptan la forma de acopladores direccionales e híbridos.

Los divisores de potencia normalmente proporcionan señales de salida en fase con una relación de división de potencia igual (-3 dB), pero también son posibles relaciones de división de potencia desiguales. Los acopladores direccionales se pueden diseñar para la división arbitraria de la energía, mientras que las uniones híbridas tienen generalmente división igualitaria de la energía. Las uniones híbridas tienen un cambio de fase de 90° o 180° entre los puertos de salida (Pozar D. M., 2009).



**Figura 6 Acopladores y Divisores de potencia; a) Divisor de Potencia;
b) Acoplador Direccional**

Fuente: (Pozar D. M., 2009)

2.5.1. Acoplador Direccional Híbrido de 180°

El acoplador híbrido de 180° es una red de cuatro puertos con un cambio de fase de 180° entre los dos puertos de salida. También puede funcionar de modo que las salidas estén en fase. Con referencia al símbolo híbrido de 180° mostrado en la figura 7, una señal aplicada al puerto 1 se dividirá de manera uniforme en dos componentes en fase en los puertos 2 y 3, en cambio el puerto 4 se aislará. En la segunda instancia si la entrada se aplica al puerto 4, se dividirá igualmente en dos componentes con una diferencia de fase de 180° en los puertos 2 y 3, y el puerto 1 se aislará.

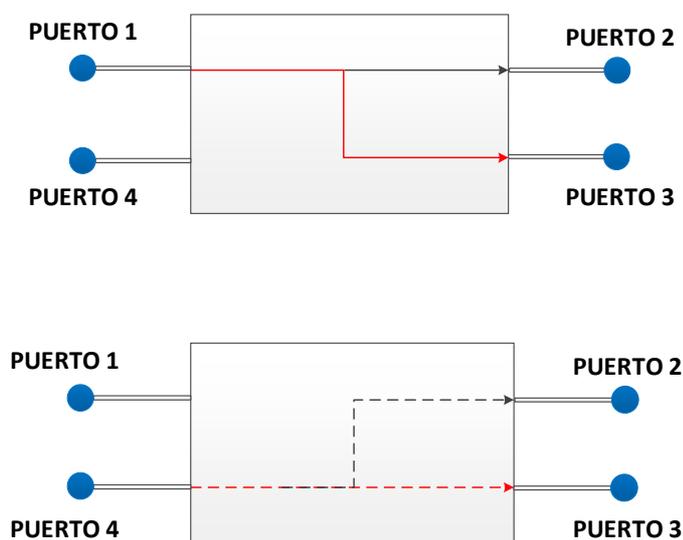


Figura 7 Acoplador Direccional Híbrido de 180°

Fuente: Propia

Cuando se lo emplea como un combinador, con señales de entrada aplicadas en los puertos 2 y 3, la suma de las entradas se formará en el puerto 1, como se muestra en la figura 6 b, mientras que la diferencia se formará en el puerto 4.

Por lo tanto, los puertos 1 y 4 se denominan puertos de suma y diferencia respectivamente. La matriz de dispersión para el híbrido ideal de 180° de 3 dB se muestra de la siguiente manera:

$$[S] = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Una vez expresada la matriz se puede verificar que esta matriz es unitaria y simétrica. El híbrido de 180° puede ser fabricado en varias formas, para este trabajo de investigación el anillo híbrido, también conocido como carrera de ratas (*rat-race*), se lo representará como el mostrado en la figura 8, el cual se construye en forma planar (*Microstrip o stripline*), pero cabe recalcar que además se puede construir este tipo de acoplador direccional en versiones de guías de onda, secciones de acoplamiento cónicas y líneas acopladas, guías de ondas o magia-T.

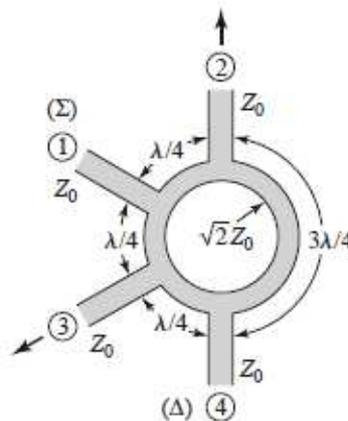


Figura 8 Acoplado Direccional Híbrido de 180° con tecnología Microstrip

Fuente: (Pozar D. M., 2009)

Para el análisis general del anillo híbrido en primer lugar se analizará el híbrido de anillo, utilizando un análisis de modo par-impar.

2.5.1.1. Análisis de modo par-impar del Anillo Cuadratura Híbrida de 90°

Para el análisis del anillo, se toma como base el circuito esquemático del acoplador de línea ramificada en forma normalizada, como en la figura 9, donde se entiende que cada línea representa una línea de transmisión con impedancia característica indicada normalizada a Z_0 .

No se muestra el retorno de tierra común para cada línea de transmisión, por tanto se asume una onda de amplitud de unidad $A_1 = 1$ es incidente en el puerto 1.

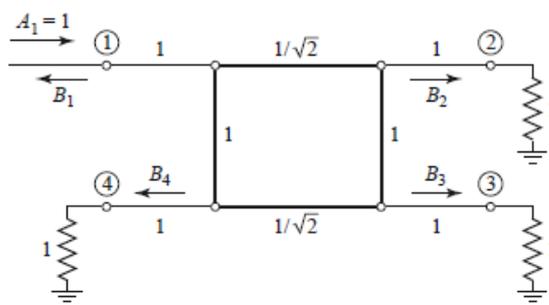


Figura 9 Circuito del Acoplador híbrido de línea ramificada en forma normalizada

Fuente: (Pozar D. M., 2009).

El circuito de la figura 9 puede descomponerse en la superposición de una excitación de modo par y una excitación en modo impar, como se muestra en la figura 10. La superposición de los dos conjuntos de excitaciones produce la excitación original de la figura 9, y dado que el circuito es lineal, la respuesta real, es decir, las ondas dispersadas, pueden obtenerse a partir de la suma de las respuestas a las excitaciones pares e impares.

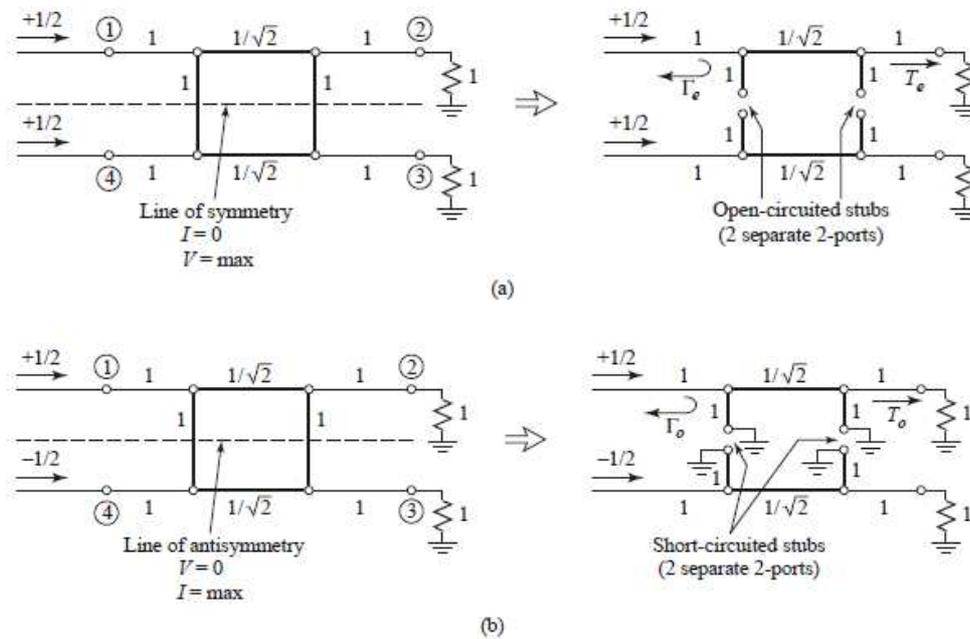


Figura 10 Descomposición del acoplador de línea ramificada en excitaciones de modo par-impar.

(a) Modo par (b) Modo impar

Fuente: (Pozar D. M., 2009).

Debido a la simetría o antisimetría de la excitación, la red de cuatro puertos puede descomponerse en un conjunto de dos redes desacopladas de dos puertos, como se muestra en la figura 10. Ya que las amplitudes de las ondas incidentes para estos dos puertos son $\pm 1/2$, las amplitudes de la onda emergente en cada puerto del híbrido de línea secundaria pueden expresarse de la siguiente manera:

$$B_1 = \frac{1}{2}\Gamma_e + \frac{1}{2}\Gamma_o \quad (12)$$

$$B_2 = \frac{1}{2}T_e + \frac{1}{2}T_o \quad (13)$$

$$B_3 = \frac{1}{2}T_e - \frac{1}{2}T_o \quad (14)$$

$$B_4 = \frac{1}{2}\Gamma_e - \frac{1}{2}\Gamma_o \quad (15)$$

Donde $\Gamma_{e,o}$ y $T_{e,o}$, son los coeficientes de reflexión y transmisión de modo impar y impar para las redes de dos puertos de la figura 8. Realizando el analisis correspondiente de este tipo de acoplador se obtiene finalmente:

$$\Gamma_e = \frac{(-1 + j - j + 1)/\sqrt{2}}{(-1 + j + j - 1)/\sqrt{2}} = 0 \quad (16)$$

$$T_e = \frac{2}{(-1 + j + j - 1)/\sqrt{2}} = \frac{-1}{\sqrt{2}}(1 + j) \quad (17)$$

$$\Gamma_o = 0 \quad (18)$$

$$T_o = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - j) \quad (19)$$

Por tanto tendremos los siguientes resultados:

$$B_1 = 0 \quad (20)$$

$$B_2 = -\frac{j}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

$$B_3 = -\frac{1}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

$$B_4 = 0 \quad (23)$$

$B_1 \rightarrow$ El puerto 1 coincide.

$B_2 \rightarrow$ Media potencia, cambio de fase de -90° del puerto 1 a 2.

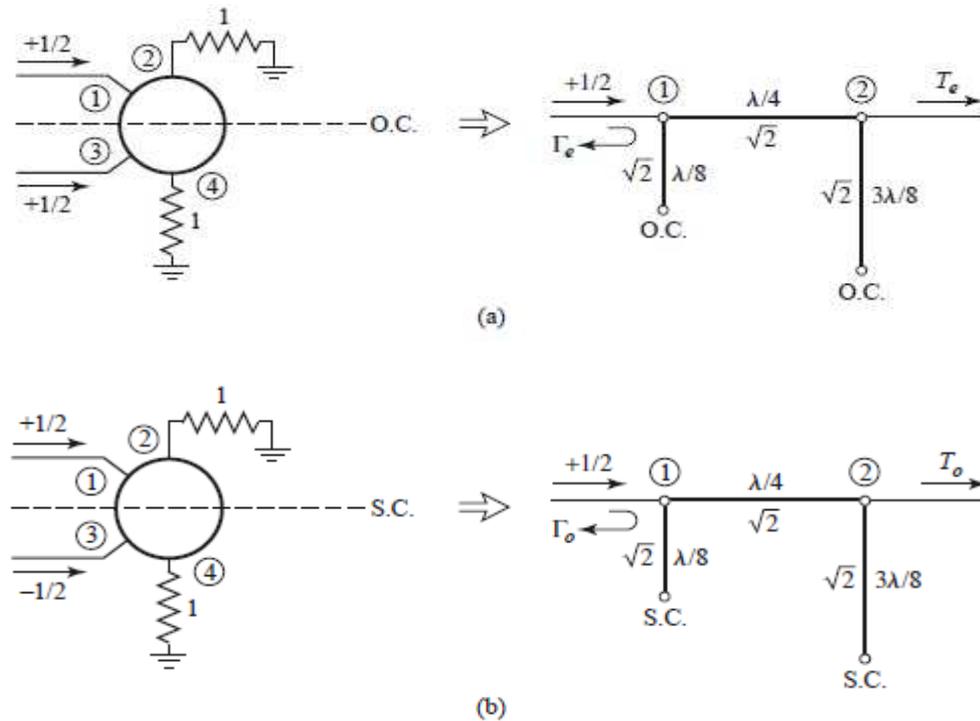
$B_3 \rightarrow$ Media potencia, cambio de fase de -180° desde el puerto 1 a 3.

$B_4 \rightarrow$ Sin alimentación al puerto 4.

2.5.1.2. Análisis de modo par-impar del Anillo Híbrido 180°

Para el análisis del anillo híbrido de 180° se considerará en primer lugar una onda de amplitud unitaria incidente en el puerto 1 del híbrido anular de la figura 8. En la unión anular esta onda se dividirá en dos componentes, los cuales llegan ambos en fase en los puertos 2 y 3, y 180° fuera de fase en el puerto 4. Usando la técnica de

análisis de modo impar-impar detallada en 2.5.1.1, podemos descomponer este caso en una superposición de los dos circuitos y excitaciones más simples mostrados en la figura 11.



**Figura 11 Descomposición de modo par e impar del híbrido de anillo cuando el puerto 1 es excitado con una onda de incidencia de amplitud unitaria.
(a) Modo par (b) Modo impar**

Fuente: (Pozar D. M., 2009).

Las amplitudes de las ondas dispersas del híbrido de anillo serán:

$$B_1 = \frac{1}{2}\Gamma_e + \frac{1}{2}\Gamma_o \quad (24)$$

$$B_2 = \frac{1}{2}T_e + \frac{1}{2}T_o \quad (25)$$

$$B_3 = \frac{1}{2}\Gamma_e - \frac{1}{2}\Gamma_o \quad (26)$$

$$B_4 = \frac{1}{2}T_e - \frac{1}{2}T_o \quad (27)$$

Se evalúan los coeficientes de reflexión y transmisión requeridos definidos en la figura 11 usando la matriz ABCD para los circuitos de dos puertos, pares e impares. Los resultados son:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} 1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_o = \begin{bmatrix} -1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Dado estos valores, se puede deducir los valores de Γ_e , Γ_o , T_e y T_o , los cuales son:

$$\Gamma_e = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (30)$$

$$T_e = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

$$\Gamma_o = \frac{j}{\sqrt{2}} \quad (32)$$

$$T_o = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (33)$$

Sustituyendo estos valores en las amplitudes de ondas correspondientes, se obtiene:

$$B_1 = 0 \quad (34)$$

$$B_2 = -\frac{j}{\sqrt{2}} \quad (35)$$

$$B_3 = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (36)$$

$$B_4 = 0 \quad (37)$$

Se muestra que el puerto de entrada está adaptado, el puerto 4 está aislado y la potencia de entrada está dividida uniformemente y en fase entre los puertos 2 y 3. Estos

resultados forman la primera fila y columna de la matriz de dispersión en la ecuación (11).

Se considera a continuación una onda de amplitud unitaria incidente en el puerto 4, también conocido como el puerto de diferencia del anillo híbrido de la Figura 8. Los dos componentes de onda del anillo llegarán en fase en el puerto 2 y en el puerto 3, con una diferencia de fase relativa de 180° entre estos dos puertos. Los dos componentes de onda estarán fuera de fase 180° en el puerto 1. Este caso se puede descomponer en una superposición de los dos circuitos y excitaciones más sencillos mostrados en la figura 12.

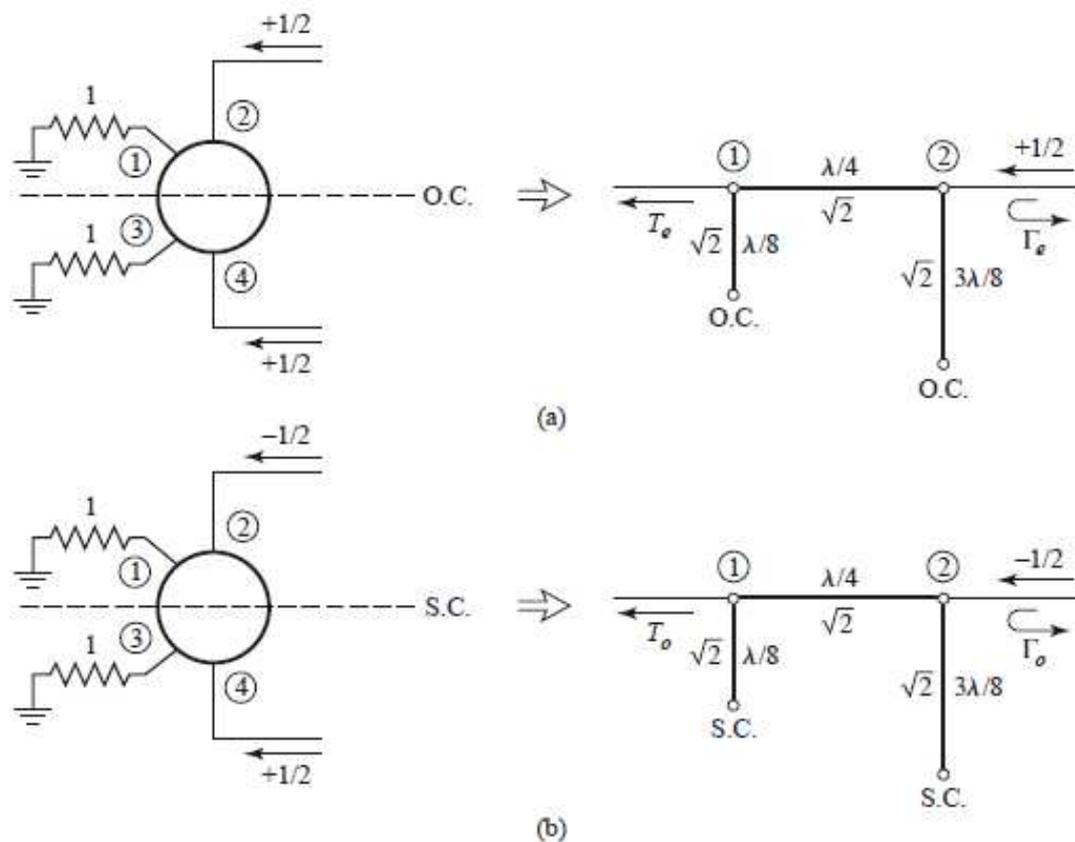


Figura 12 Descomposición de modo par e impar del híbrido de anillo cuando el puerto 4 es excitado con una onda de incidencia de amplitud unitaria.

(a) Modo par (b) Modo impar

Fuente: (Pozar D. M., 2009).

Las amplitudes de las ondas dispersas del híbrido de anillo serán:

$$B_1 = \frac{1}{2}T_e - \frac{1}{2}T_o \quad (38)$$

$$B_2 = \frac{1}{2}\Gamma_e - \frac{1}{2}\Gamma_o \quad (39)$$

$$B_3 = \frac{1}{2}T_e + \frac{1}{2}T_o \quad (40)$$

$$B_4 = \frac{1}{2}\Gamma_e + \frac{1}{2}\Gamma_o \quad (41)$$

Se evalúan los coeficientes de reflexión y transmisión requeridos definidos en la figura 12 usando la matriz ABCD para los circuitos de dos puertos, pares e impares. Los resultados son:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} -1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_o = \begin{bmatrix} 1 & j\sqrt{2} \\ j\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

Dado estos valores, se puede deducir los valores de Γ_e , Γ_o , T_e y T_o , los cuales son:

$$\Gamma_e = \frac{j}{\sqrt{2}} \quad (44)$$

$$T_e = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (45)$$

$$\Gamma_o = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (46)$$

$$T_o = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (47)$$

Sustituyendo estos valores en las amplitudes de ondas correspondientes, se obtiene:

$$B_1 = 0 \quad (48)$$

$$B_2 = \frac{j}{\sqrt{2}} \quad (49)$$

$$B_3 = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (50)$$

$$B_4 = 0 \quad (51)$$

Donde se muestra que el puerto de entrada está adaptado, el puerto 1 está aislado y la potencia de entrada está dividida uniformemente en los puertos 2 y 3 con una diferencia de fase de 180° . Estos resultados forman la cuarta fila y columna de la matriz de dispersión expresada en (11). Los elementos restantes de esta matriz se pueden encontrar a partir de consideraciones de simetría. El ancho de banda del híbrido de anillo está limitado por la dependencia de la frecuencia del tamaño del anillo pero es generalmente del orden de 20% - 30%.

2.6. Matriz de Parámetros “S”

Los parámetros de dispersión son los coeficientes de reflexión y transmisión entre la onda incidente y reflejada, los cuales conforman la matriz “S”. El análisis de estos parámetros permite comprender el comportamiento de un dispositivo en algunas condiciones en un determinado rango de frecuencia. Los parámetros se caracterizan por su magnitud, ganancia o pérdidas en decibeles (dB) y fase, estos parámetros se utilizan para redes que trabajan en radiofrecuencia y microondas. Se debe tener en cuenta que los parámetros S varían con la frecuencia por ende es necesario especificar la frecuencia a la cual se deben medir los parámetros “S” y la impedancia característica o impedancia del sistema (Cobo, 2012).

El término dispersión con el que se alude a los parámetros “S” hace referencia a la forma en que las corrientes y voltajes que se trasladan en una línea de transmisión son afectadas cuando se encuentran con una discontinuidad debido a la introducción de una red en una línea de transmisión, o a su vez que posea una impedancia diferente a la impedancia característica (Cobo, 2012).

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Introducción

En este capítulo se describen los parámetros fundamentales para la realización del proyecto de investigación como son los materiales y métodos a emplearse. Se detallará los parámetros de diseño, construcción, el software de simulación, sustratos, conectores y equipos para el análisis en la etapa final de ejecución.

3.2 Software para Diseño y Simulación en Microstrip

Existen varios software para diseño, simulación y construcción de acopladores direccionales en Microstrip, para el desarrollo de este trabajo, se empleará como herramienta de desarrollo el software Advanced Design System, más conocido por sus iniciales como ADS.

3.2.1. Advanced Design System (ADS)

Advanced Design System, es un software procedente de Agilent EEsofEDA, el cual forma parte de una unidad de Agilent Technologies. Fundamentalmente es un software creado para el diseño de una extensa variedad de dispositivos de

telecomunicaciones tales como amplificadores, redes de banda ancha, osciladores, sistemas de radiocomunicación y por satélite, acopladores híbridos, entre otros, ver figura 13.

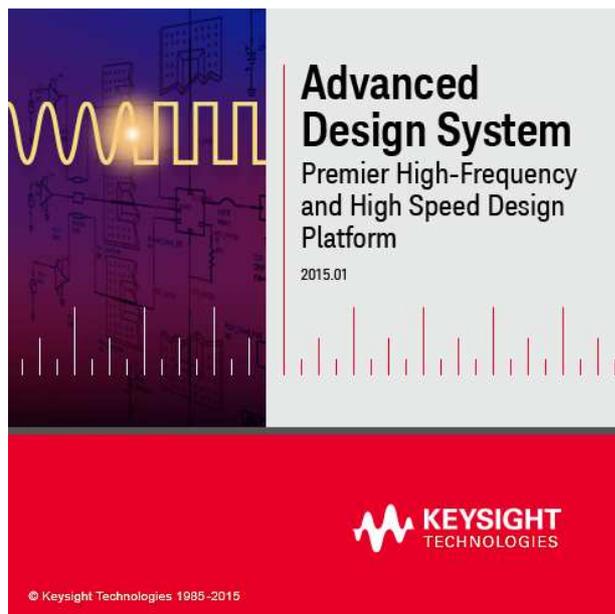


Figura 13 Software Advanced Design System (ADS)

Fuente: (Keysight Technologies, 2015)

La principal función de este software es la de realizar modernas simulaciones con gran precisión sobre circuitos constituidos por elementos incluidos en las librerías de ADS, además brinda herramientas para diseño de circuitos integrados de radio frecuencia como son:

- Simuladores de circuitos lineales y no lineales
- Herramientas de análisis EM.
- Librerías de parámetros con una función DCR.
- Manuales de Uso
- Data Sheet de los componentes
- Ejemplos

Al realizar simulaciones de forma simultánea y con la ayuda de herramientas de análisis de circuitos, se logra obtener un diseño adecuado a nuestra conveniencia, además cuenta con algoritmos de simulación y rutinas de convergencia avanzadas lo que reduce de manera considerable el tiempo que dura la simulación respecto a otros programas (FIALLOS CHRISTIAN, 2016).

El software se lo ejecuta en dos tipos de ventanas para los circuitos, una de estas primeras ventanas es donde se muestra el modelo de tipo esquemático en la que se conectan los elementos como se requiere y sobre la que se efectúa las simulaciones y análisis y la otra ventana es el layout en la que se observa el formato que tendrá el circuito plasmado en la placa, cabe mencionar que ambas ventanas están interconectadas entre sí para que cuando se optimiza el diseño, este se reubique de manera adecuada en la placa del sustrato (Vallejo & Cervantes, 2015).

A continuación en la figura 14 se muestra la interface del software a emplearse.

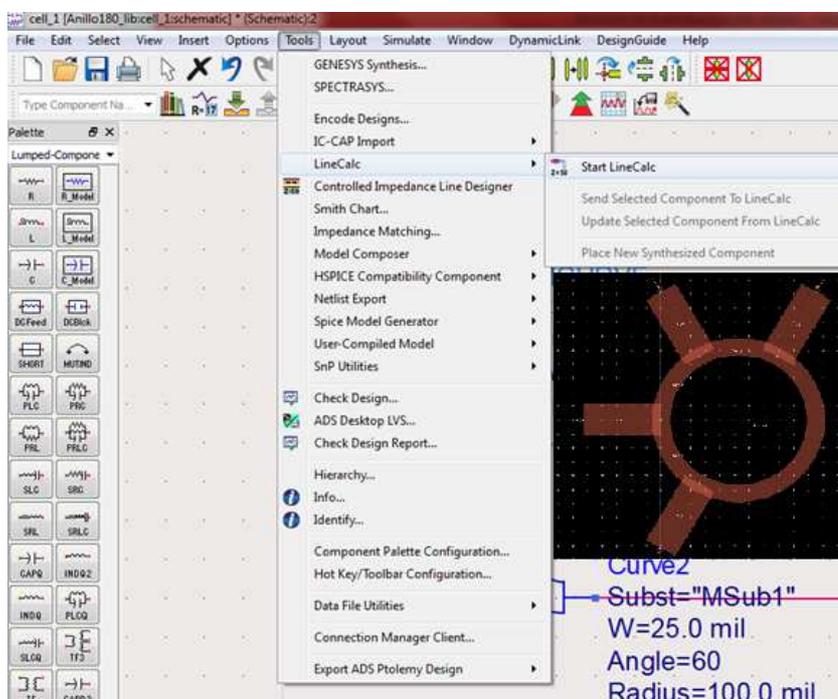


Figura 14 Interface del Software Advanced Design System (ADS)

Fuente: (Keysight Technologies, 2015)

3.2.1.1 Herramientas Principales del ADS

3.2.1.1.1 LineCalc

LineCalc es la herramienta de software ilustrada en la figura 15, básicamente es un controlador de utilidad para líneas de transmisión, lo cual es fundamental en el diseño de los acopladores híbridos propuestos en el trabajo, esta herramienta proporciona la equivalencia entre el ancho de la línea y su impedancia característica, así como también la relación entre la longitud física y eléctrica.

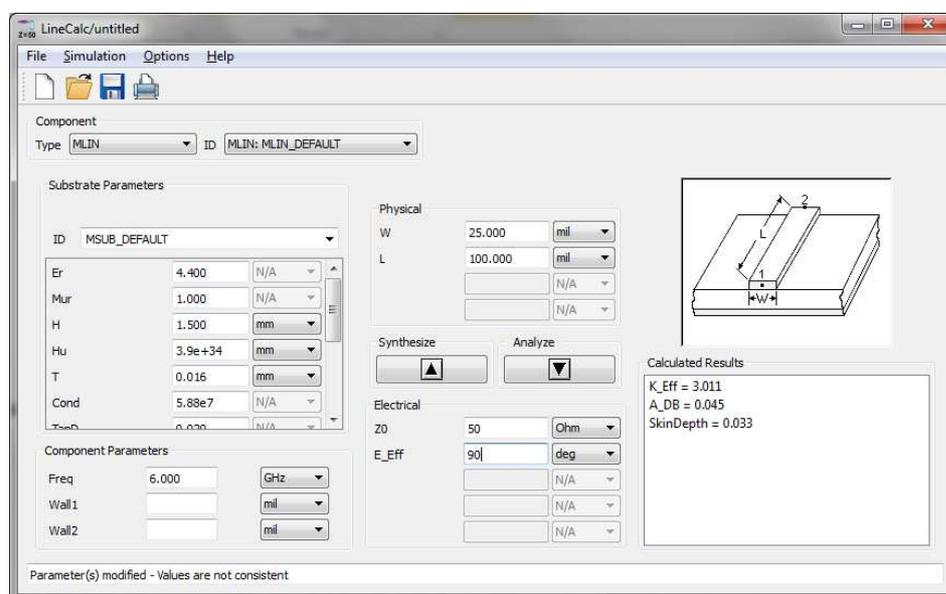


Figura 15 Herramienta LineCalc de ADS

Fuente: Propia, (Keysight Technologies, 2015)

Al momento que se utiliza Linecalc es necesario también especificar las características o parámetros del sustrato a utilizarse, los cuales se detallarán posteriormente, una vez colocados dichos valores, se procede a colocar el valor de la frecuencia con la que se desea trabajar y los valores calculados de las impedancias características.

La herramienta entrega automáticamente los siguientes valores:

- Longitud de las líneas de transmisión (L).
- Ancho de las líneas de transmisión (W).

Como se muestra en la figura 16, una vez colocados los parámetros del sustrato y la frecuencia de operación e impedancia característica, se calcula automáticamente los valores de L y W, mencionados anteriormente.

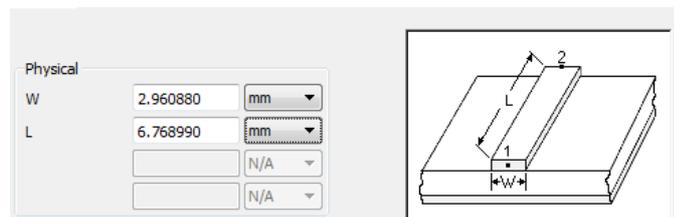


Figura 16 Parámetros Físicos W y L en mm

Fuente: Propia, (Keysight Technologies, 2015)

Cabe mencionar que los parámetros ingresados para la obtención de la anchura y longitud de las líneas de transmisión son los descritos en la figura 17, los cuales tienen relación principalmente con el tipo de sustrato, parámetros generales de simulación y frecuencia de operación.

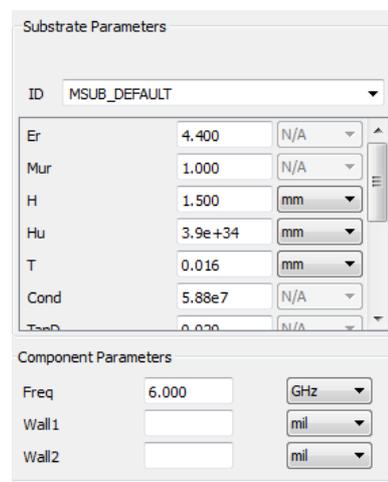


Figura 17 Parámetros del Sustrato y Parámetros del Componente

Fuente: Propia, (Keysight Technologies, 2015)

3.3.1 Software: Matlab

Para la realización de este trabajo de investigación se ha empleado el software Matlab como herramienta gráfica y de cálculo para analizar y comparar los parámetros S simulados (mediante el software ADS) y medidos (mediante pruebas con el analizar de puertos) entre los acopladores direccionales híbridos de 180 grados de una sección y de múltiples secciones tanto en potencia como en sus fases.

Al software Matlab se lo puede trabajar con el software ADS ya que dicho software posee la facilidad de exportar los datos de las gráficas, en forma de vector ascendente. Lo cual permite graficar dichos puntos en dos dimensiones de las distintas simulaciones a realizarse para los parámetros S. El archivo de puntos generado por el simulador para el diseño del acoplador híbrido es de tipo s1p y s2p.

3.4 Materiales

3.4.1. Sustrato

El sustrato que se ha utilizado es el FR-4, ver figura 21, el cual es un tipo de sustrato asignado a las hojas de vidrio laminado reforzado con epoxi, tubos, varillas y placas de circuito impreso (PCB), cuyos parámetros se detallan en la Tabla 1. El término “FR” se refiere *Flame retardant* que significa retardante de la llama esto quiere decir que la seguridad de inflamabilidad del sustrato FR-4 está en conformidad con la norma UL94V-0.

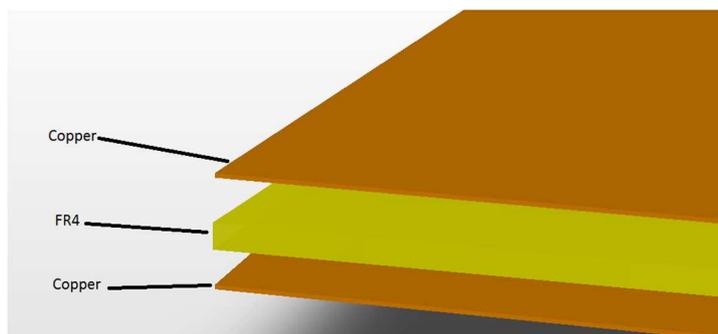


Figura 18 Sustrato FR-4

Fuente: (BlackStick, s.f.)

Tabla 1

Parámetros del Sustrato FR-4

PARÁMETRO	VALOR
Gravedad específica/densidad	1,850 g / cm ³ (3,118 lb / cu yd)
Absorción de agua	-0,125 En <0,10%
índice de temperatura	140 ° C (284 ° F)
Conductividad térmica , a través del plano	0,29 W / (m·K), 0,343 W/(m · K)
Conductividad térmica, en el plano	0,81 W / (m·K), 1,059 W/(m · K)
Dureza Rockwell	Escala de 110 M
Resistencia de unión	> 1,000 kg (2,200 libras)
Resistencia a la flexión (A; 0.125 en) - LW	> 440 MPa (64,000 psi)
Resistencia a la flexión (A; 0.125 en) - CW	> 345 MPa (50,000 psi)
Resistencia a la tracción (0,125 pulgadas) LW	> 310 MPa (45,000 psi)
Resistencia al impacto Izod - LW	> 54 J / m (10 ft · lb / in)
Resistencia al impacto Izod - CW	> 44 J / m (8 pies · lb / in)
Resistencia a la compresión - de plano	> 415 MPa (60,200 psi)
Ruptura dieléctrica (A)	> 50 kV
Ruptura dieléctrica (D48 / 50)	> 50 kV

Continua



Resistencia dieléctrica	20 MV / m
Permitividad relativa (A)	4,8
Permitividad relativa (D24 / 23)	4,8
Factor de disipación (A)	0,017
Factor de disipación (D24 / 23)	0,018
Permitividad constante dieléctrica	4,70máx., 4,35 @ 500 MHz, 4,34GHz @ 1
Temperatura de transición del vidrio	Puede variar, pero es de más de 120 ° C
Módulo de Young - LW	$3,5 \times 10^6$ psi (24 GPa)
Módulo de Young – CW	$3,0 \times 10^6$ psi (21 GPa)
Coefficiente de dilatación térmica - eje x	$1,4 \times 10^{-5}$ K ⁻¹
Coefficiente de dilatación térmica - eje y	$1,2 \times 10^{-5}$ K ⁻¹
Coefficiente de expansión térmica - eje z	$7,0 \times 10^{-5}$ K ⁻¹
SW velocidad del sonido	3369 m / s
impedancia acústica LW	6,64 Mrayl

Fuente: (Wikipedia, s.f.)

El sustrato FR-4 está combinado por tejido de fibras de vidrio de tela con una resina epoxi aglutinante que es resistente a la llama (auto extingible), en sí es un material termoestable de alta presión con buena resistencia al peso, con un grado de absorción de agua de cero, se emplea como aislante eléctrico con una gran resistencia mecánica, por tanto cumple las condiciones necesarias para ser empleado en la fabricación del acoplador direccional híbrido de 180 grados ya que mantiene estas características tanto en ambientes secos como húmedos.

3.4.1.1. Características del Sustrato FR-4

El sustrato posee distintas características entre las cuales recalcan las características mecánicas, químicas y térmicas. Para el diseño del acoplador direccional híbrido los parámetros a tomar en cuenta son:

- **Constante dieléctrica relativa (ϵ_r)**

Es la magnitud física que cuantifica la capacidad de un material para acumular carga eléctrica, y por tanto energía entre dos placas metálicas. Para pequeñas constantes eléctricas se tienen asociados mejores eficiencias de radiación, menos pérdidas en el dieléctrico y una disminución de las ondas de superficie. (Agilent EEsof, 2000)

- **Tangente de Pérdidas ($\tan \delta$)**

Es la magnitud adimensional que refleja las pérdidas de energía en un dieléctrico. Se la define como el inverso del factor de calidad.

- **Permeabilidad Relativa (μ_r)**

Es la magnitud adimensional, es el cociente entre la permeabilidad absoluta del medio específico y la permeabilidad del vacío.

3.4.2. Conectores de Radio Frecuencia

Para el diseño final del acoplador direccional híbrido de 180° , se utilizarán los conectores SMA, este término proviene de *SubMiniature version A*, estos conectores RF fueron diseñados en los años 60 por Bendix Scintilla Corporation y Omni-Spectra Corporation, se emplean en conexiones a transmisores de radio, GPS y en montajes que incluyen filtros, microondas, atenuadores, osciladores y mezcladores (RadioNoticias, s.f.).

Los conectores SMA son conectores de semi-precisión usados en aplicaciones para alta frecuencia con valores entre los 18 GHz y en algunos casos hasta de 26,5 GHz proporcionando resultados confiables en sistemas de banda ancha, admitiendo la transmisión de señales, la impedancia característica de estos conectores es de 50Ω , estos conectores generalmente llevan un acabado de oro para evitar la oxidación (Muchotrasto, 2017).

En la tabla 2 (RadioNoticias, s.f.), se muestran los tipos de conectores SMA y sus medidas las cuales están expresadas en milímetros, adicionalmente se muestran en las figuras 19 y 20 los tipos de conectores SMA hembra y macho respectivamente para la construcción del acoplador direccional híbrido de 180 grados.

Tabla 2

Tipos de Conectores SMA con sus respectivas medidas

TIPOS DE SMA	MEDIDAS (mm)		
	1	2	3
901-9601-1SF	15,7	8,9	3,0
901-9601-3	15,7	8,9	3,0
901-9601-3SF	15,7	8,9	3,0
901-9602-1	15,5	8,6	2,8
901-9602-3	15,5	8,6	2,8
901-96010- 1SF	15,5	8,6	2,8
901-96010-3	15,5	8,6	2,8
901-10015	12,5	-	2,4

Fuente: (RadioNoticias, s.f.).

3.3.2.1 Conector Hembra recto para PCB

El conector SMA hembra se muestra en la figura 19.



Figura 19 Conector Hembra recto para PCB

Fuente: Propia

3.3.2.2. Conector Macho de Engaste

El conector SMA macho se muestra en la figura 20.



Figura 20 Conector macho de engaste

Fuente: (Virtual, s.f.)

3.3.3. Placa de Circuito Impreso (PBC)

Es la superficie constituida por caminos, pistas o buses de material conductor laminadas sobre una base no conductora. El circuito impreso se utiliza para conectar eléctricamente a través de las pistas conductoras, y sostener mecánicamente, por medio de la base, un conjunto de componentes electrónicos. Las pistas son generalmente de cobre mientras que la base se fabrica generalmente de resinas de fibra de vidrio reforzada, Pertinax, pero también cerámica, plástico, teflón o polímeros como la baquelita. Es por tanto la representación más perfeccionada y que ofrece el acabado más fiable de todos.

Existen placas a simple cara y a doble cara (LCardaba, 2016). Existen a su vez diferentes tipos de placa que dependen del material de que está fabricada la placa, podemos distinguir dos tipos fundamentales:

- Baquelita
- Fibra de vidrio

Para este trabajo de investigación se empleará de tipo fibra de vidrio, por su calidad y economía, además ya que ofrecen buena resistencia mecánica y aislamiento.

Para obtener las pistas de cobre, se emplea una prototipadora. A continuación se muestra el circuito de la placa PBC del acoplador híbrido desarrollado, ver figura 21 y figura 22 respectivamente.



Figura 21 Placa PBC Acoplador Direccional Híbrido 180°

Fuente: Propia



(a)



(b)

Figura 22 Placa PBC Acoplador Direccional Híbrido 180° Múltiples Secciones

(a)Parte Superior (b) Parte Posterior

Fuente: Propia

3.3.4. Cables para la Conexión a Equipos

Para ejecutar las mediciones y pruebas de cada diseño de los acopladores direccionales híbridos de 180° se emplearon cables PASTERNAK PE304-24 mostrados en la figura 23 (Pasternack Enterprises, 2016), los cuales son cables de alta precisión y de alta gama.

Este tipo de cables están acoplados a uno de sus extremos un conector tipo N macho y en su otro extremo un conector SMA macho. El conector tipo N macho se utiliza para conectar el cable con el analizador de redes de dos puertos, mientras que el conector tipo SMA macho se conecta con el conector SMA hembra de la placa PCB.



Figura 23 Cable PASTERNAK SMA-N 18GHz

Fuente: Propia

Algunas de las características más importantes del cable y sus conectores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3**Características cable PASTERNAK**

Tipo de cable	<i>Coaxial 160</i>
Conector 1	SMA macho
Conector 2	N macho
Frecuencia	18 GHz
Impedancia cable	50Ω
Impedancia de cada conector	50Ω
Protección RF	90 dB
Longitud	30,58 cm

Fuente: (Pasternack Enterprises, 2016)

3.3.5. Cargas

Las cargas son un elemento indispensable para realizar las mediciones de los parámetros S correspondientes a cada acoplador direccional híbrido de 180^0 , se acoplaron cargas de $50\ \Omega$ a los conectores SMA hembra de la placa PCB, dichas cargas se colocaban en los puertos que no iban a ser acoplados como se muestra en la figura 24. Las cargas de $50\ \Omega$ son un producto de la empresa mini-circuits, las características de las cargas se muestran en la Tabla 4.

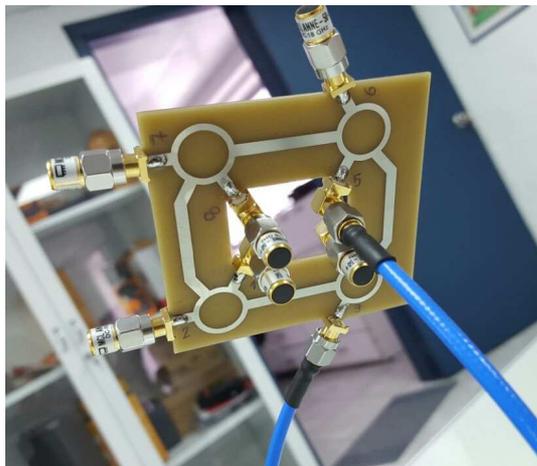


Figura 24 Cargas de 50 ohm colocados en los puertos no acoplados

Fuente: Propia

Tabla 4

Características carga 50Ω

Conector/Tipo	<i>SMA macho</i>
Modelo	ANNE -50+
Impedancia	50Ω
Potencia nominal	1W
Material externo	Cobre
Material interno	Plato de oro
Pérdida de retorno	27 dB de 4 a 8 GHZ

Fuente: (Mini-Circuits, s.f.)

En la figura 25 se muestran las cargas ANNE-50+ de MINI CIRCUITS empleadas para pruebas en los acopladores direccionales híbridos.



Figura 25 Cargas 50 ohm

Fuente: Propia

3.3.6 Equipos de Medición

Como equipo esencial para realizar mediciones y pruebas, se empleó el analizador de redes de dos puertos N9918A propiedad de KEYSIGHT TECHNOLOGIES el cual es un instrumento de medición enfocado sobre la impedancia y los parámetros S, se utiliza sobre sistemas de microondas debido a sus distintos beneficios como son: fiabilidad, precisión, estabilidad, entre otras más (Monzón, 2009).

Para la obtención de los parámetros S el equipo se basa en la tensión y la corriente de cada puerto (Seco Á. , 2009), las características más importantes de este equipo de medición son (Keysight Technologies, 2016):

- Frecuencia de trabajo máxima es de 26.5 GHz.
- Es el analizador portátil más integrado del mundo, el modelo estándar incluye un analizador de cable y antena.
- Trabaja como analizador de espectros, medidor de potencia, voltímetro vectorial, entre otros.
- Ahorra tiempo mediante la medición de DTF y TDR en el mismo barrido.

- Permite medir simultáneamente los 4 parámetros S.
- Permite hacer mediciones precisas con el analizador de espectros (± 0.5 dB) sin necesidad de calentamiento.
- Pesa 6,6 libras.

En la Figura 26 se muestra una imagen del equipo mencionado.



Figura 26 Analizador de microondas N9918A.

Fuente: (Keysight Technologies, 2016)

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL ACOPLADOR DIRECCIONAL HÍBRIDO DE 180°

En este capítulo del proyecto de investigación se va a detallar el proceso de diseño, simulación y construcción del prototipo del acoplador direccional híbrido de 180° de múltiples secciones. Esta es una parte muy importante ya que el realizar un óptimo diseño conlleva una adecuada construcción y logro de resultados deseados. Se realizará dos diseños, el primer diseño cuenta con la elaboración de un solo acoplador direccional híbrido de 180° y el segundo diseño tendrá la característica de ser un acoplador de múltiples secciones, cuatro secciones se ha propuesto en el diseño de este trabajo.

Para la elaboración del diseño del acoplador direccional híbrido con tecnología Microstrip es indispensable definir los principales parámetros los cuales se emplearán en la elaboración del mismo, por tanto en esta sección se describirá cada uno de estos.

4.1. Pasos para el diseño de un acoplador direccional híbrido

Se elabora una serie de pasos para la elaboración del acoplador direccional híbrido, estos pasos son de vital importancia para obtener resultados óptimos de acuerdo a los parámetros planteados teóricamente. Los pasos a desarrollarse son:

- 1) Definir e identificar especificaciones de diseño.
- 2) Realizar el análisis matemático del acoplador de acuerdo a las ecuaciones mostradas en el capítulo 2.
- 3) Calcular los valores L y W.

- 4) Simular diseño con la herramienta ADS.
- 5) Generar Layout.
- 6) Construir prototipos finales
- 7) Realizar pruebas con los equipos de medición descritos.

4.2. Criterios de diseño de un acoplador direccional

Para diseñar acopladores direccionales híbridos en general se debe considerar ciertos criterios, estos a su vez tendrán una variación dependiendo del número de secciones a colocarse, en este caso, se utilizarán cuatro acopladores híbridos con la finalidad de diseñar un acoplador 4 x 4 de 4 entradas y 4 salidas.

4.2.1. La impedancia característica (Z_0)

Es el valor de la relación entre el voltaje y la corriente en la línea. Una característica fundamental de la impedancia característica es que depende de la permitividad, permeabilidad, frecuencia de operación y geometría de la línea.

Para el diseño descrito, se ha asumido una impedancia característica $Z_0 = 50 \Omega$ ya que los materiales a emplearse en la construcción tienen una impedancia característica similar de 50Ω .

4.2.2. La frecuencia de diseño del acoplador (f)

La frecuencia de operación es el parámetro principal en los dispositivos de radiofrecuencia, ya que los dispositivos construidos solamente trabajarán a dicha

frecuencia establecida. Los acopladores direccionales híbridos de 180° se han diseñado para trabajar dentro del rango de la banda C entre los que tenemos 3,7 a 4,2 GHz y 5,9 a 6,4 GHz.

Los acopladores desarrollados para este proyecto se han diseñado para trabajar a 6 GHz dentro de la banda C.

4.2.3. La constante dieléctrica relativa (ϵ_r)

Si entre las placas de un condensador plano introducimos un dieléctrico, el campo eléctrico, y por tanto la diferencia de potencial, disminuye como consecuencia de la polarización en su interior. Al factor de disminución se le llama constante dieléctrica, y es un número adimensional característico de cada material (Conductores, s.f.).

4.2.4. La longitud eléctrica efectiva (E_{Eff})

Es una unidad de medida que se usa en el estudio de las líneas de transmisión de energía eléctrica, se define como el producto entre la constante de fase de onda (ϕ) y la distancia a la que están separados de la carga.

4.3. Diseño y simulación en ADS de un acoplador direccional Híbrido de 180° sección simple.

4.3.1. Valores Parámetros de Diseño

Para el diseño del acoplador direccional híbrido de 180° , se han colocado los parámetros mostrados en la tabla 5. Adicionalmente a los parámetros detallados se

debe tomar en consideración que el anillo híbrido tendrá entre sus puertos 1-3, 3-4 una separación $\lambda/2$, mientras que entre el puerto 2-4 una separación de $3\lambda/4$.

Tabla 5

Valores definidos de los parámetros de diseño

PARÁMETRO	VALOR
Er	4.4
Mur	1
H	1.5
Hu	3.9×10^{34} mm
T	0.016 mm
Cond	$5,88 e^7$
Tan D	0.02
F	6 GHz

Fuente: Propia

4.3.2. Cálculos para Diseño del anillo híbrido de 180° acopladas de sección simple

Para diseñar el anillo híbrido de 180° con una impedancia característica de 50 Ω y con una frecuencia de operación de 6GHz, se realiza el siguiente cálculo:

Solución:

Con referencia a la figura 8, la impedancia característica de la transmisión de anillo es $Z_0=50 \Omega$, esta impedancia característica se manejará en cada uno de los puertos de entrada y salida, el valor de la circunferencia interna del anillo tendrá una impedancia de $\sqrt{2} Z_0$, esto debido al análisis realizado en capítulos anteriores, por tanto:

$$\sqrt{2} Z_0$$

Se define a $Z_0 = 50 \Omega$, por tanto:

$$\sqrt{2} (50 \Omega) = 70.7 \Omega$$

4.3.3. Desarrollo del acoplador direccional híbrido de 180° de sección simple a 6GHz

Como primer paso para el desarrollo del acoplador direccional híbrido se elige la opción de TLines-Microstrip que se encuentra ubicada en la paleta del software ADS, ver figura 27, esta opción permite acceder al menú de componentes gráficos para tecnología Microstrip.

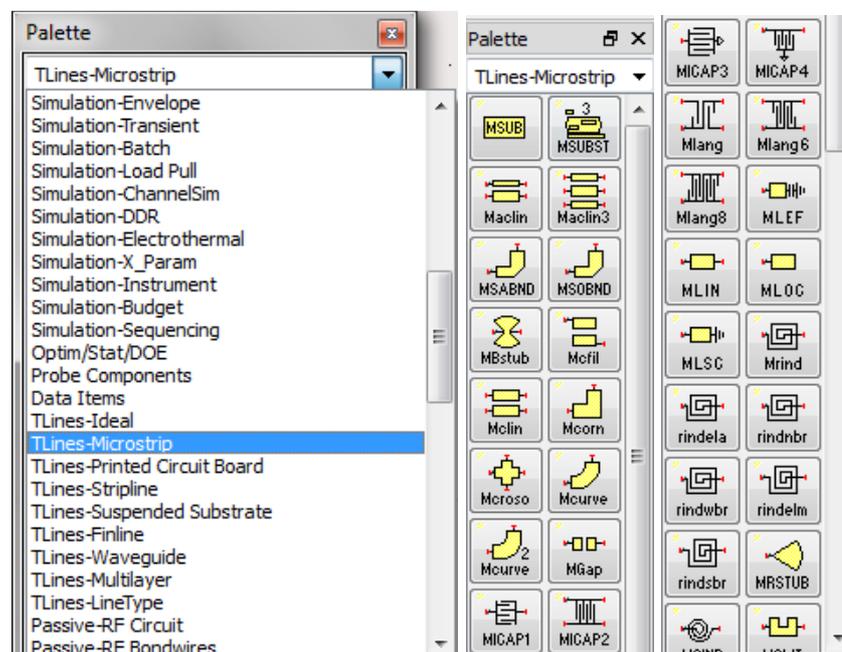


Figura 27 Paleta de Componentes TLines-Microstrip

Fuente: Propia, (Keysight Technologies, 2015)

Se empieza la generación del anillo híbrido de 180° seleccionando los componentes detallados a continuación, ver figura 28.

- Cuatro componentes Mcurve (Microstrip Curved Bend)
- Cuatro componentes

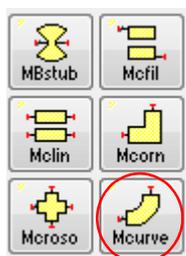


Figura 28 Componente MCurve para Acoplador Híbrido de 180°

Fuente: Propia, (Keysight Technologies, 2015)

Se eligen cuatro componentes ya que se requiere formar una estructura circular en forma de anillo, posteriormente se selecciona la opción cable (wire) la cual permite unir los extremos de cada componente formando así el anillo. Para el cálculo de las dimensiones físicas de las líneas Microstrip como son la longitud de la línea Microstrip (L) y el ancho de la línea (W), se procede a utilizar la herramienta Linecalc del software ADS (Advanced Design System).

En la tabla 6 se muestra los valores de W y L calculados con una impedancia $Z_0 = 50 \Omega$ y $E_{\text{Eff}} = 90^\circ$, estos valores serán utilizados como el componente de conexión de los cuatro puertos del anillo.

Para los puertos de entrada 1-2 y salida 3-4 se empleará como impedancia característica $Z_0 = 50 \Omega$ y $E_{\text{Eff}} = 90^\circ$, el valor de 90° , viene del siguiente cálculo.

Para $Z_0 = 50 \Omega \rightarrow$ se manejará separación de $\lambda/2$, por tanto:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{180^\circ}{2} = 90^\circ$$

Tabla 6**Parámetros W y L Acoplador Híbrido 180°**

PARÁMETRO	VALOR
L	6,768990 mm
W	2,960880 mm

Fuente: Propia

Ahora se procede a cambiar el valor de $E_{\text{Eff}} = 270^\circ$ y el valor de la impedancia $Z_0 = 70.71 \Omega$, se obtienen los valores mostrados en la tabla 7.

$$Z_0 = \sqrt{2} Z_0 = 70.71 \Omega$$

Para: $70.71 \Omega \rightarrow$ se manejará separación de $3\lambda/4$, por tanto:

$$\frac{3\lambda}{4} = \frac{3(180^\circ)}{2} = \frac{3(180^\circ)}{2} = 270^\circ$$

Tabla 7**Parámetros W y L Acoplador Híbrido 180°**

PARÁMETRO	VALOR
L	41,872900 mm
W	1,561340 mm

Fuente: Propia

Con los valores calculados se procede a calcular el radio de los componentes curvos.

$$L_{final} = L_{inicial} / 2 / \pi$$

$$L_{final} = 41.872900 / 2 / \pi$$

$$L_{final} = 6.66427 \text{ mm}$$

Estos valores, serán reemplazados en los datos del componente curvo del simulador ADS:

$$W_{final} = 1.561340 \text{ mm}$$

$$Radius_{final} = 6.66427 \text{ mm}$$

En la figura 29 se muestra el diseño del acoplador direccional híbrido de 180° de sección simple a 6 GHz.

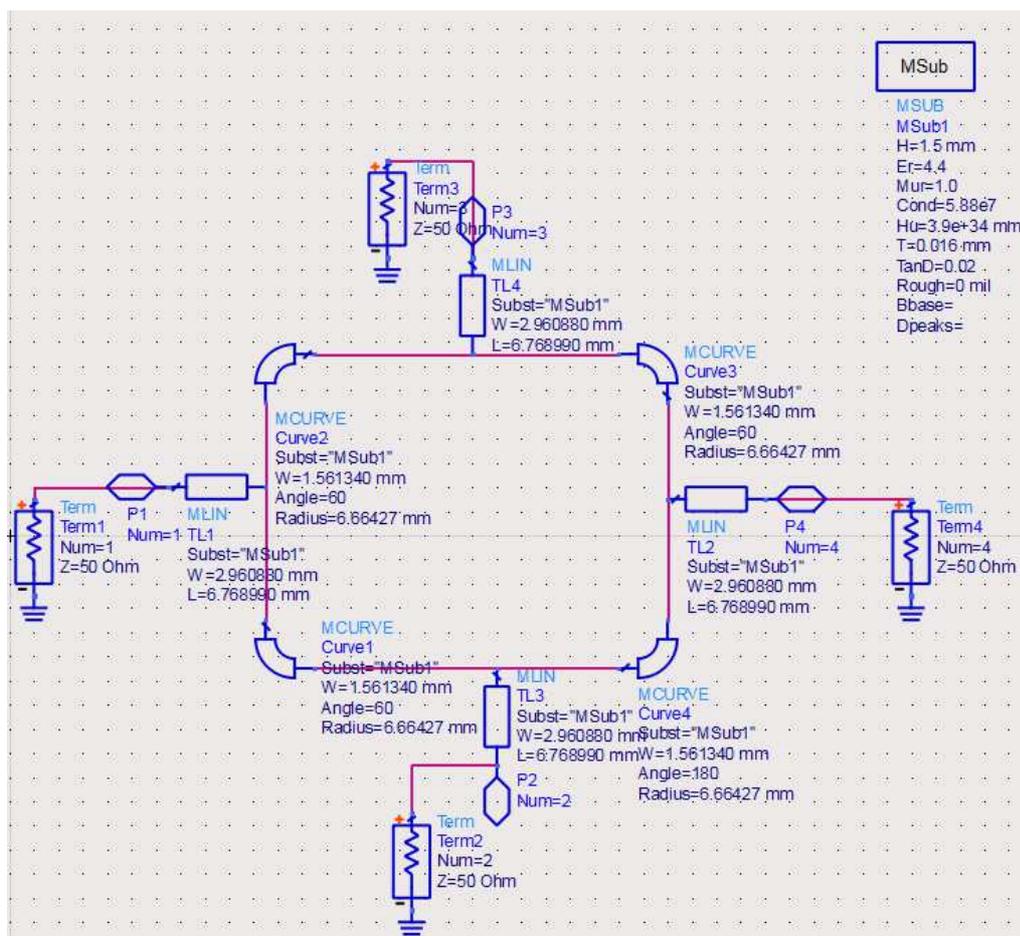


Figura 29 Acoplador direccional híbrido de 180° de sección simple a 6 GHz

Fuente: Propia

4.3.4. Simulación en 3D del Anillo Híbrido de 180° a 6 GHz

Una vez realizado el diseño del anillo híbrido, se verifica el funcionamiento del mismo. Mediante el uso de la herramienta EM Simulation Setup se configuran características como el tipo de sustrato, la cantidad de puertos, la frecuencia de operación, frecuencia inicial y frecuencia final y parámetros S (*Scattering*). En la figura 30, se observa el diseño en 3 dimensiones del acoplador híbrido de 180° de sección simple.

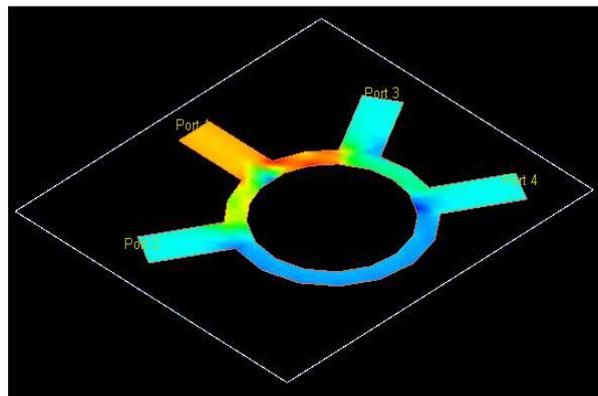


Figura 30 Acoplador Direccional Híbrido de 180° visto en 3D

Fuente: Propia

Dentro de esta ventana se manejan escalas de colores como se muestra en la figura 31, donde de acuerdo a la intensidad del color se tiene una característica puntual como se detalla en la tabla 8:

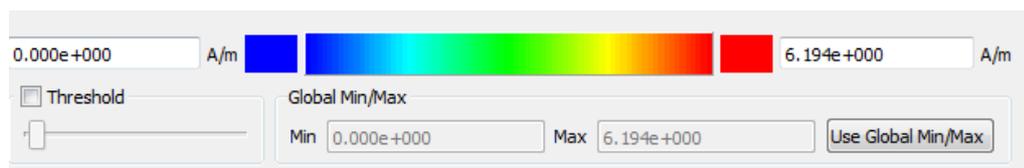


Figura 31 Paleta de Intensidad de señal

Fuente: Propia

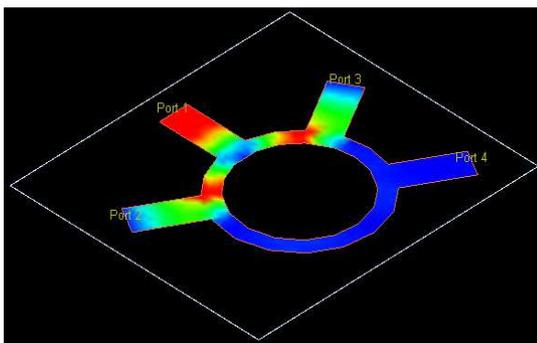
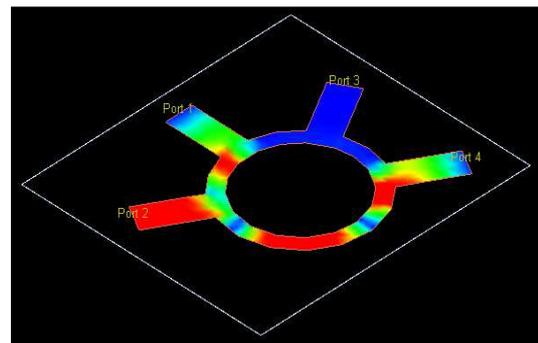
Tabla 8**Nivel de transmisión por Intensidad de Color**

INTENSIDAD DEL COLOR	CARACTERÍSTICA
Azul	No se transmite la señal
Naranja	Se transmite al 70%
Rojo	Transmisión del 90%-100%

Fuente: Propia

En la figura 32 se muestra al acoplador direccional híbrido de 180° cuando es alimentado por cada uno de sus puertos. Se comprueba que cuando la señal ingresa por el puerto 1, esta se distribuye hacia los puertos 2 y 3 quedando el puerto 4 aislado, cumpliendo así las características del acoplador direccional híbrido.

De la misma manera cuando la señal ingresa por el puerto 4, esta se distribuye hacia los puertos 2 y 3 quedando el puerto número 1 aislado.

**(a)****(b)**

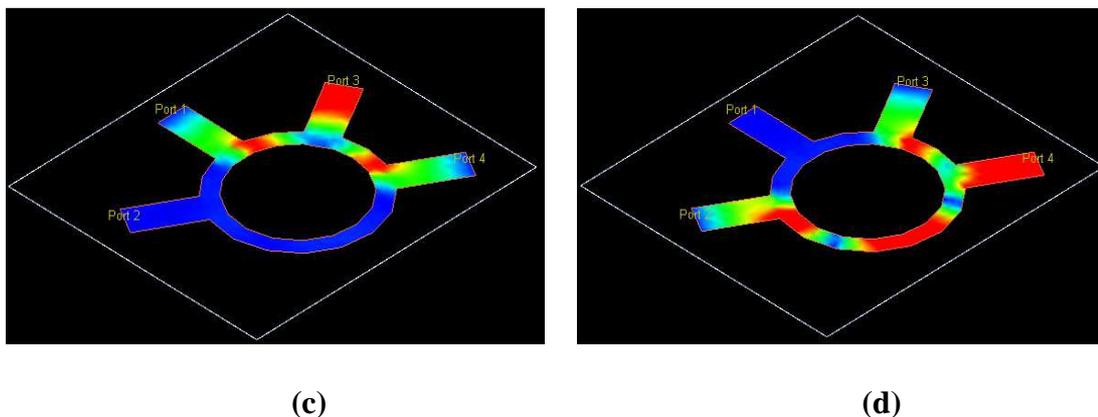


Figura 32 Acoplador Híbrido inducido por cada puerto

(a) Puerto 1; (b) Puerto 2; (c) Puerto 3; (d) Puerto 4

Fuente: Propia

4.3.5. Construcción e implementación del Anillo Híbrido de 180° de sección simple

Una vez desarrollado el anillo híbrido de 180° , se verificará el layout o diseño final propio del software ADS, ver figura 33, este layout permitirá visualizar si el acoplador cumple los parámetros de diseño, dimensiones de W y L.

Para la impresión de los diseños finales se debe generar un archivo *.GBR más conocido como archivo *.gerber. Ya que el simulador ADS es una herramienta amigable con el usuario, se permite de manera directa exportar el archivo escogiendo la opción EXPORT GERBER/DRILL.

En la figura 34 se muestra el layout del acoplador extraído del archivo *.gbr, el cual se utiliza para ser impreso en el sustrato FR-4, posteriormente se muestra el acoplador implementado real, soldado los conectores SMA en cada uno de sus puertos, ver figura 35.

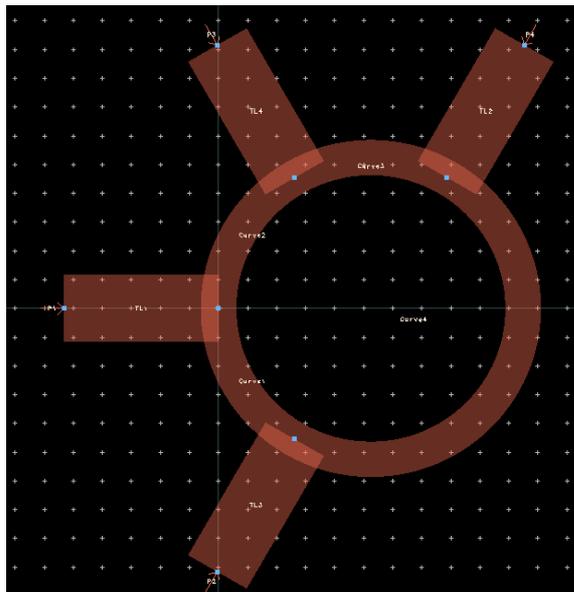


Figura 33 Layout Anillo Híbrido 180°

Fuente: Propia

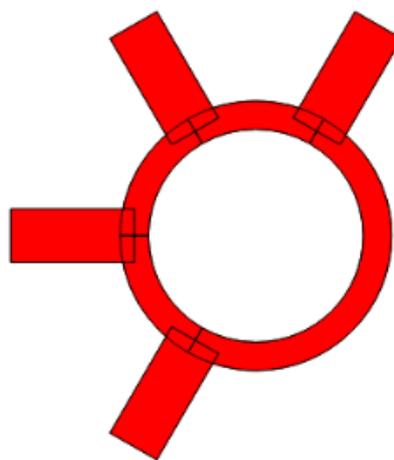


Figura 34 Layout *.gbr

Fuente: Propia

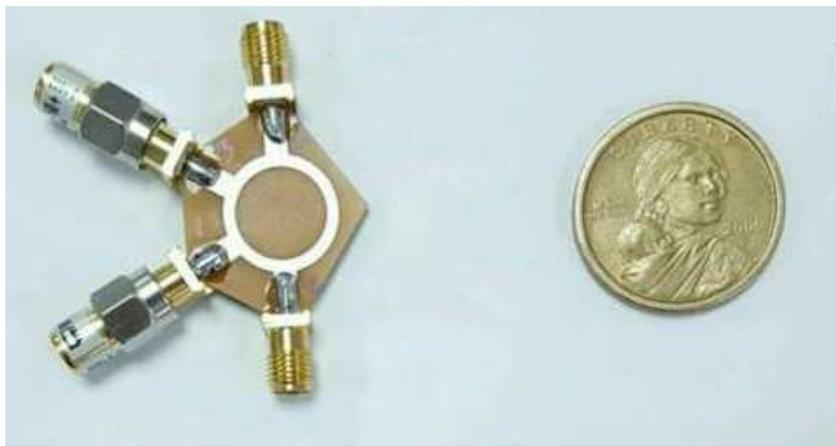


Figura 35 Acoplador direccional Híbrido de 180^0 de sección simple a 6 GHz implementado

Fuente: Propia

4.3.6. Resultados de la simulación del acoplador direccional Híbrido de sección simple a 6GHz

En la figura 36 se puede apreciar el resultado en dB de los parámetros S que se obtienen de la simulación del acoplador direccional híbrido de 180^0 con frecuencia de trabajo de 6 GHz.

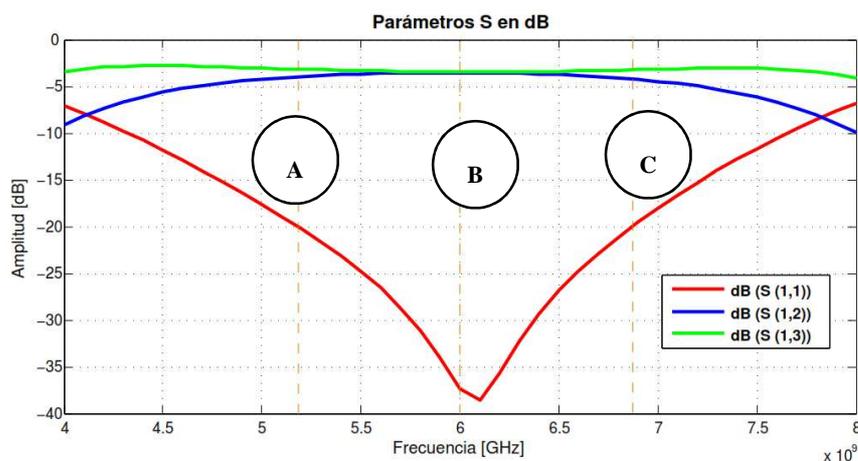


Figura 36 Parámetros S expresados en dB - Simulación

Fuente: Propia

La figura 36 muestra que el acoplador direccional híbrido de 180° tiene un desplazamiento de la frecuencia de operación original (6GHz), esta se ha desplazado al valor de 6.1 GHz, esta variación no afecta al diseño del acoplador, debido a los errores en la construcción.

Los valores en frecuencia utilizados para el cálculo del ancho de banda porcentual del acoplador híbrido son en -20 dB. Adicionalmente se verifica que el pico más bajo es alrededor de los -38dB.

Los puntos A, B y C muestran puntos de corte entre las señales y su amplitud en dB. En A y C, se muestra a la señal de transmisión S (1,1) cortando en los -20 dB detallados anteriormente, mientras que en B se muestra la frecuencia de operación a la cual fue desarrollada el acoplador, ver tabla 9.

Tabla 9

Parámetros S expresados en dB - Simulación

PUNTOS	S 1,1		S 1,2		S 1,3	
	X	Y	X	Y	X	Y
	[GHz]	[dB]	[GHz]	[dB]	[GHz]	[dB]
A	5,25	-20,260	5,25	-3,924	5,25	-3,172
B	6	-37,361	6	-3,549	6	-3,460
C	6,9	-19.558	6,9	-4,280	6,9	-3,228

Fuente: Propia

El porcentaje de ancho de banda se lo calcula al emplear a siguiente fórmula:

$$\%AB = \frac{fr3 - fr1}{fr \text{ (trabajo)}} \cdot (100\%) \quad (53)$$

$$fr1 = 6,90 \text{ GHz}$$

$$fr3 = 5,2 \text{ GHz}$$

$$\%AB = \frac{(6,90 - 5,25)\text{GHz}}{6 \text{ GHz}} \cdot (100\%)$$

$$\%AB = \frac{1,65}{6} \cdot (100\%)$$

$$\%AB = 27,5 \%$$

El porcentaje de ancho de banda es de 27,5%.

El parámetro S (1,4) a 6 GHz, tiene una potencia de -45,595 dB, el puerto 4 está aislado, además el valor de potencia que es cero. La tabla 10 muestra el valor de magnitud de S (1,1), S (1,2), S (1,3) y S (1,4).

Tabla 10

Relación entre magnitud y los Parámetros S a 6 GHz

PARÁMETRO	MAGNITUD
S (1,1)	0,014
S (1,2)	0,665
S (1,3)	0,671
S (1,4)	0,005

Fuente: Propia

Para que el acoplador sea llamado híbrido de 180⁰ debe cumplir la condición detallada a continuación en la figura 37.

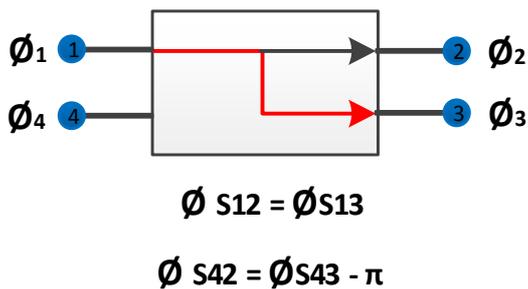


Figura 37 Análisis de ángulos Acoplador 180°

Fuente: Propia

El ángulo entre el puerto S (1,2) y S (1,3) deben ser iguales y el ángulo entre S (4,2) en relación a S (4,3) esté desfasado 180° o π rad.

A continuación en la figura 38 se mostrará el resultado en fase del acoplador direccional híbrido de 180°, ese parámetro es importante ya que lo que se desea obtener es un desfase de 180° entre las señales.

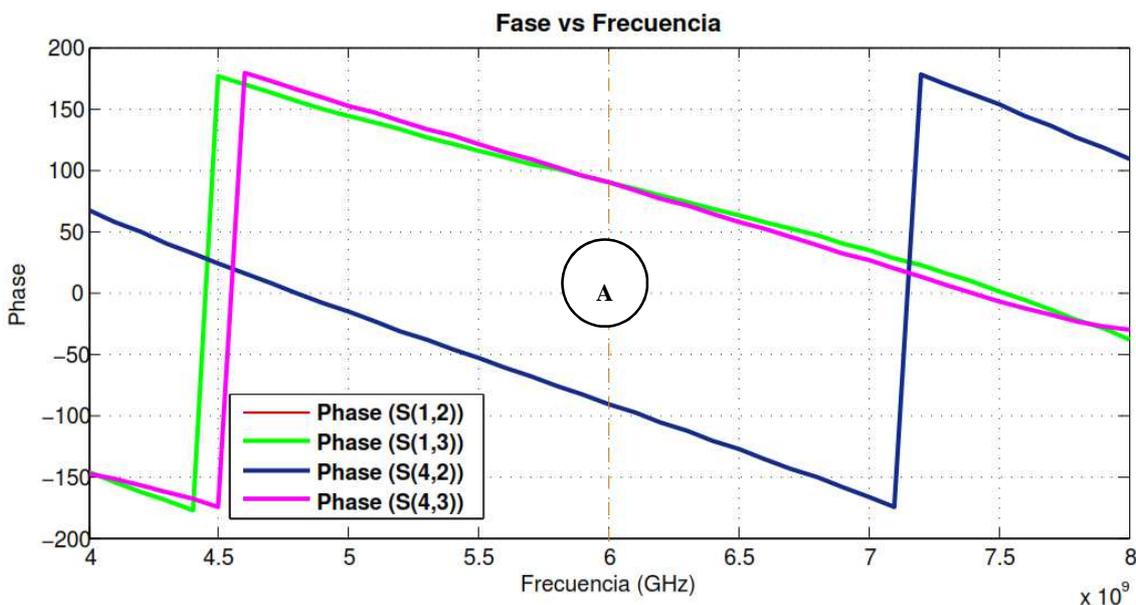


Figura 38 Parámetros S expresados en Fase - Simulación

Fuente: Propia

El punto A, se encuentra en X a una frecuencia de 6 GHz, a continuación se muestra la tabla 11, donde se detallan los puntos de corte a dicha frecuencia.

Tabla 11

Datos obtenidos a una distancia de 50 cm

PARÁMETROS S	FASE [°]
S (1,2)	89,382
S (1,3)	89,559
S (4,2)	-90,824
S (4,3)	89,382

Fuente: Propia

Se comprueba que se tiene un desfase de -180^0 entre el parámetro S (4,2) y S (4,3). Por tanto finalmente es acertado mencionar que se ha cumplido con los parámetros de diseño especificados para el acoplador direccional híbrido de 180^0 y por tanto puede entrar en la etapa de construcción.

4.3.7. Comparación de resultados simulados y medidos del acoplador direccional

Híbrido de sección simple a 6GHz.

Se realizará la comparación y análisis de resultados entre la simulación y la medición real del acoplador direccional híbrido en el equipo detallado en el capítulo 3.

En la figura 39 se puede visualizar los parámetros S en dB del acoplador direccional híbrido de sección simple, como se visualiza la frecuencia de operación ha variado, esto conlleva a que la señal del puerto de entrada S (1,1) esté trabajando

alrededor de los 5,4 GHz, este desplazamiento de frecuencia con la frecuencia inicial de 6 GHz, es debido a la construcción del híbrido, así como también se debe a las características del sustrato FR4 y factores al momento de grabar la placa y soldadura que influyen en el acoplador final. El parámetro S (1,1) se desplaza para arriba alrededor de 10 dB, disminuyendo el ancho de banda del diseño original.

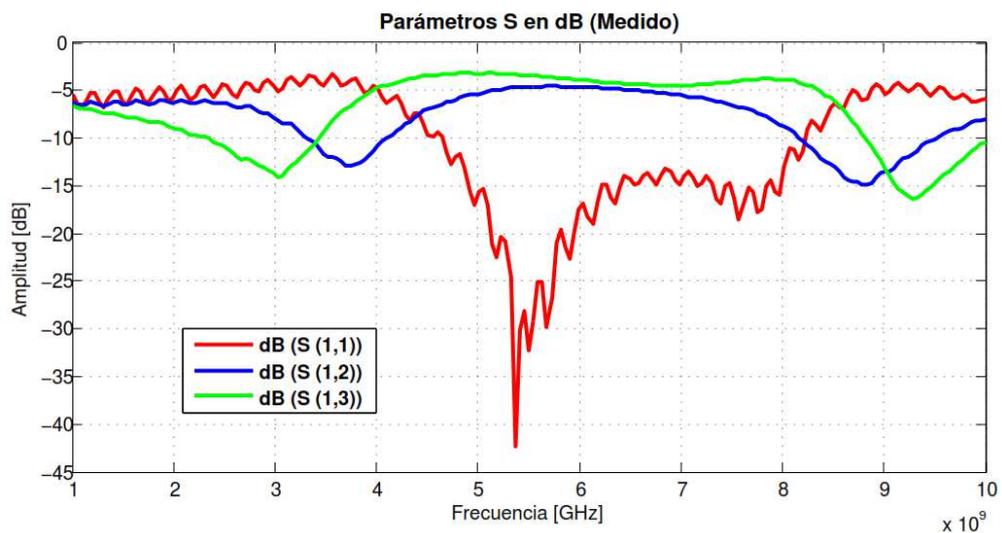


Figura 39 Parámetro S en dB (Medido)

Fuente: Propia

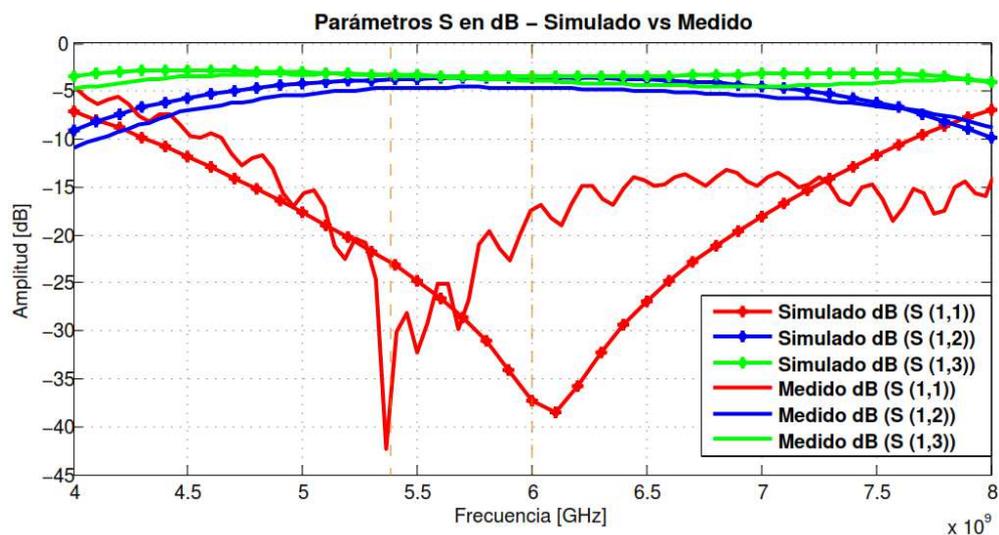


Figura 40 Parámetro S en dB Simulado vs Medido

Fuente: Propia

En la figura 40 se muestra los parámetros de las señales simuladas y las señales medidas para el anillo híbrido de 180^0 de sección simple.

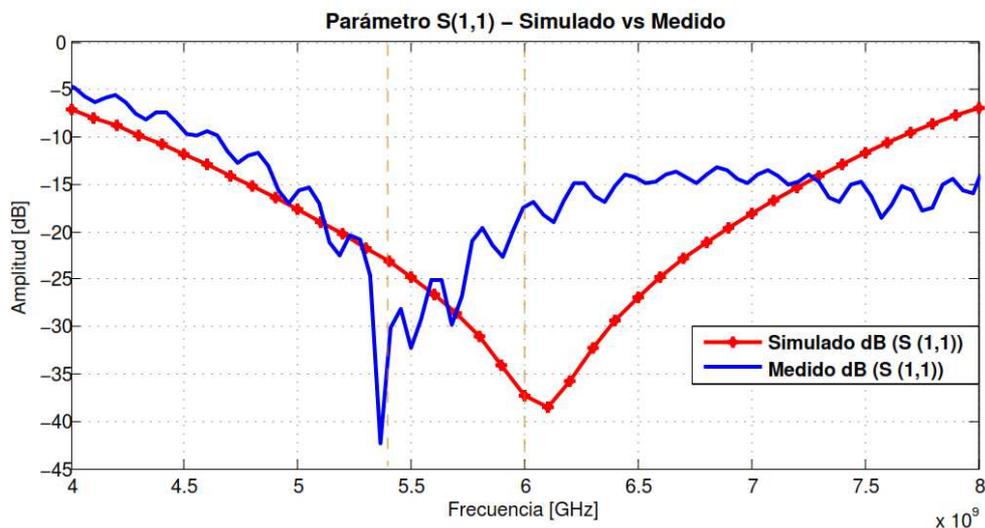


Figura 41 Parámetro S (1,1) Simulado vs Medido

Fuente: Propia

En la figura 41 se muestra el parámetro S (1,1) simulado de color rojo y el medido con el analizador en color azul, este parámetro es la reflexión de la señal, además se verifica que existe una variación en la frecuencia de 0,6 GHz, es decir el acoplador real construido está trabajando a una frecuencia de 5,4 GHz aproximadamente, esto se comprueba al observar el pico más bajo alrededor de los -40 dB aproximadamente de la señal en color azul, esta amplitud en dB pertenece acoplador real.

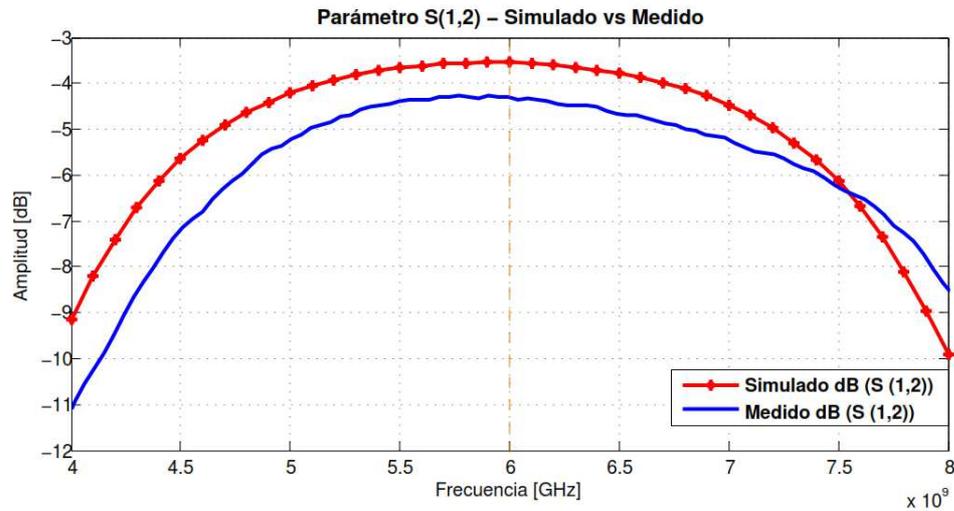


Figura 42 Parámetro S (1,2) Simulado vs Medido

Fuente: Propia

En la figura 42 se observa el parámetro S (1,2), este es el parámetro de transmisión, el cual representa la señal de salida del puerto 2 del acoplador direccional híbrido de 180° , como se verifica en la figura los valores simulados y reales siguen una misma tendencia, existe una leve variación entre las dos señales debido a factores de implementación física, lo que hace variar de -3.5 dB a -4.1 dB entre las dos curvas, esto se produce por las pérdidas de inserción en el material.

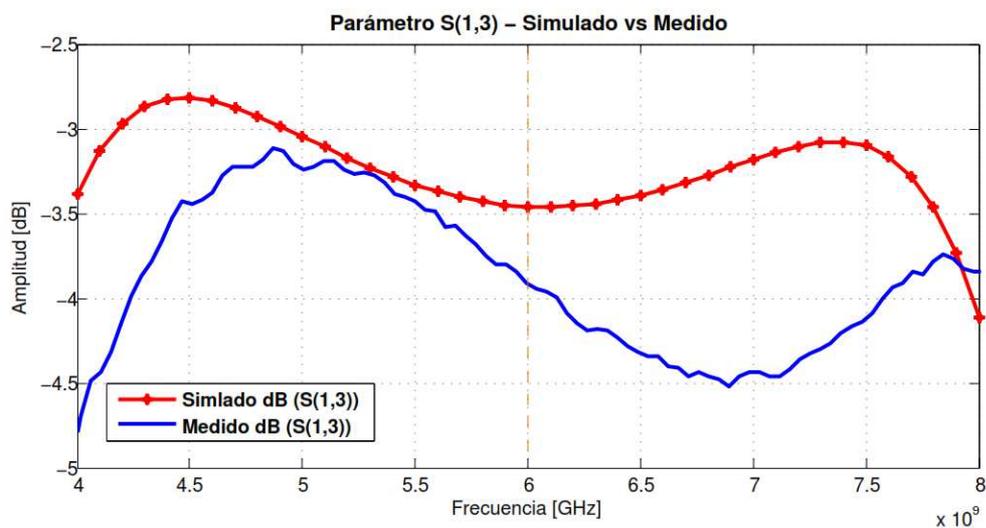


Figura 43 Parámetro S (1,3) Simulado vs Medido

Fuente: Propia

En la figura 43 se observa el parámetro S (1,3) el cual representa la señal de salida del puerto 3 del acoplador direccional híbrido de 180° , al igual que en la figura anterior esta señal representa la reflexión en el puerto. Se confirma en la figura los valores simulados y experimentales siguen una misma tendencia, existe una leve variación entre las dos señales debido a factores de implementación física, esta variación es de 1 dB al inicio de cada señal y de aproximadamente 0.4 dB entre las señales a la frecuencia de 6 GHz.

En la figura 44 se muestra las fases del anillo de sección simple, como se puede verificar las fases S(1,2) y S(1,3) son iguales, mientras que en S(4,2) y S(4,3) existe una variación de fase la cual será explicada en las comparaciones entre los valores simulados y medidos en cada uno de los puertos.

De las figuras 45 a la 48 se muestran los valores de fase tanto en simulación como de manera experimental de la construcción del acoplador híbrido. El análisis de cada parámetro se realiza para cada puerto.

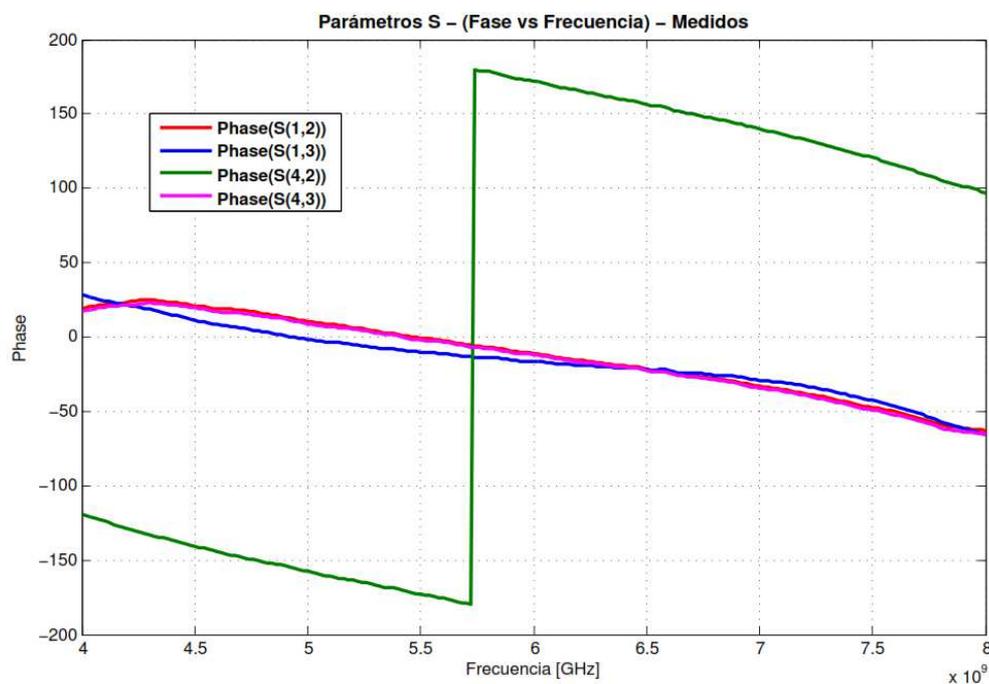


Figura 44 Parámetro S en Fase Medido

Fuente: Propia

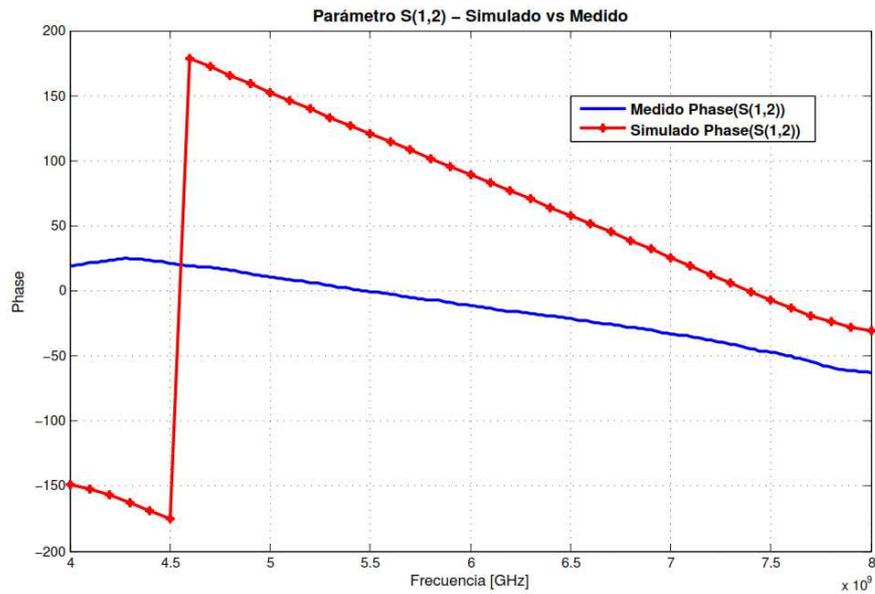


Figura 45 Parámetro S (1,2) en Fase Simulado vs Medido

Fuente: Propia

La figura 45 representa el parámetro S (1,2) en fase del acoplador direccional híbrido de 180° en simulación y de manera experimental. A una frecuencia de 6 GHz el acoplador tiene una fase de $89,9^{\circ}$, a su vez a la frecuencia de operación real de 5,5 GHz esta fase se encuentra a 0° . A los 6 GHz en la señal medida, se observa que tiene una fase de -5° aproximadamente. Por tanto se tiene una diferencia de aproximadamente 95° .

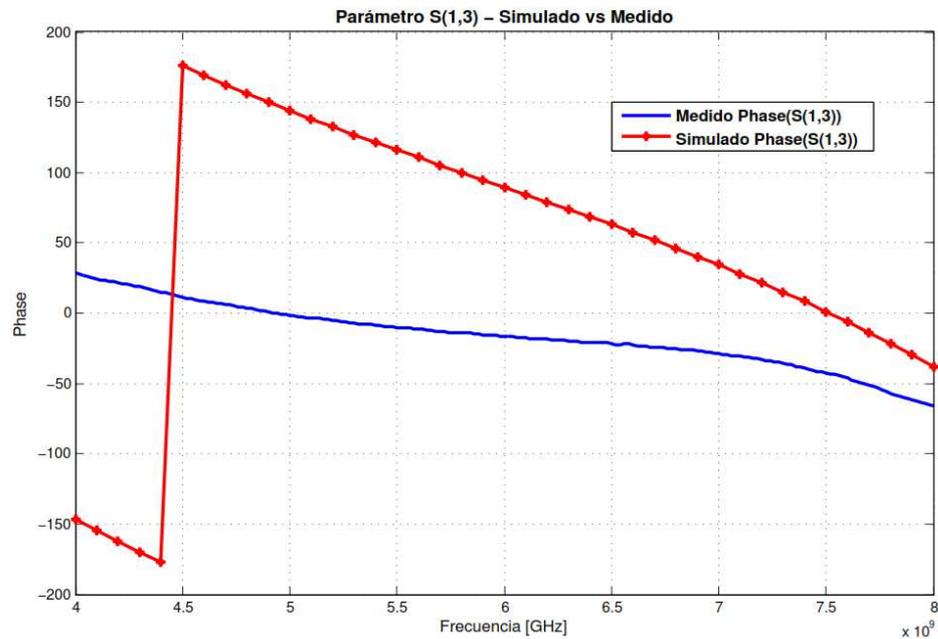


Figura 46 Parámetro S (1,3) en Fase Simulado vs Medido

Fuente: Propia

La figura 46 representa el parámetro S (1,3) en fase del acoplador direccional híbrido de 180° en simulación y de manera experimental. A una frecuencia de 6 GHz el acoplador tiene una fase de $89,9^{\circ}$. A la misma frecuencia de operación se obtiene una medida de -5° , esto nos muestra que el diseño final tiene un desfase de 90° aproximadamente. Pero el punto importante de este análisis es que se verifica que tanto el parámetro S (1,2) y S (1,3) en fase tienen un valor igual, cumpliendo así las condiciones descritas anteriormente.

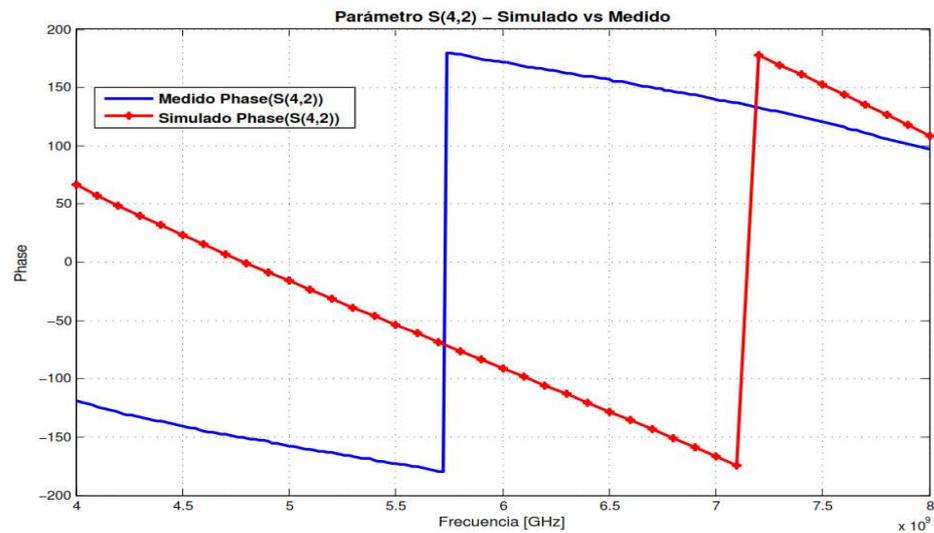


Figura 47 Parámetro S (4,2) en Fase Simulado vs Medido

Fuente: Propia

La figura 47 representa el parámetro S (4,2) en fase del acoplador direccional híbrido de 180° en simulación y de manera experimental. A una frecuencia de 6 GHz el acoplador tiene una fase de -90° aproximadamente de manera ideal. La fase en este puerto cambia a alrededor de los 180° aproximadamente cuando es medido con el analizador con el prototipo diseñado, para recompensar este desfase el parámetro S (4,3) debe variar 180° .

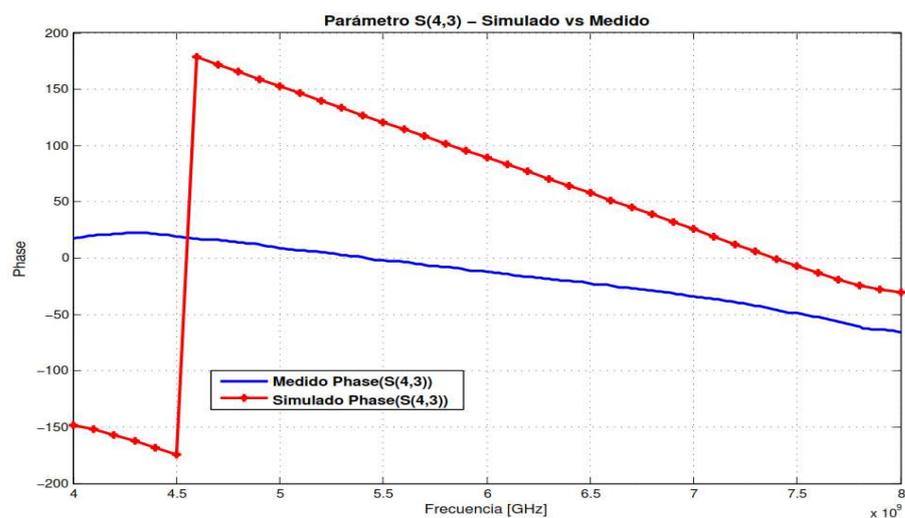


Figura 48 Parámetro S (4,3) en Fase Simulado vs Medido

Fuente: Propia

La figura 48 representa el parámetro S (4,3) en fase del acoplador direccional híbrido de 180^0 en simulación y de manera experimental. A una frecuencia de 6 GHz el acoplador tiene una fase de 90^0 aproximadamente. La fase en este puerto cambia a alrededor de los 0^0 , por tanto se verifica que el ángulo ya no estará los 180^0 ideales sino con un margen de error de $\pm 5^0$, pero aún cumple el parámetro principal del anillo híbrido que es que sus fases tengan una diferencia de 180^0 entre el S (4,2) y S (4,3).

4.4. Diseño y simulación de un Acoplador de 4 Entradas y 4 Salidas

Para el diseño del acoplador direccional híbrido de 180^0 de 4 entradas y 4 salidas, se emplearán los mismos parámetros descritos en la tabla 5, los cuales pertenecen a los parámetros del anillo de sección simple. En la figura 49 y 50 se muestra el diagrama del diseño del acoplador cuando es alimentado por el puerto 1 y el puerto 4.

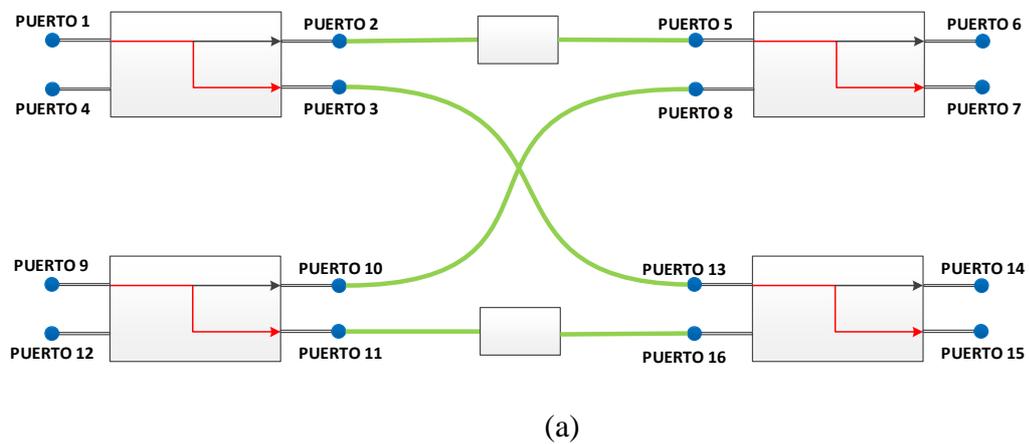


Figura 49 Acoplador Direccional Híbrido de 180^0 4x4 inducido por los puertos 1-5-9-13

Fuente: Propia

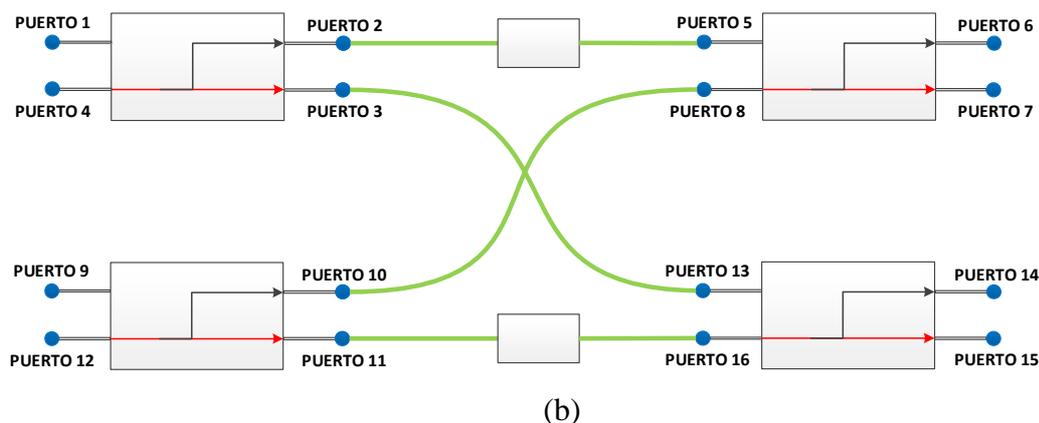


Figura 50 Acoplador Direccional Híbrido de 180° 4x4 inducido por los puertos 4-8-12-16

Fuente: Propia

El objetivo de esta segunda simulación es concatenar cuatro acopladores en forma de anillo sin afectar las características originales de un acoplador híbrido como es la de permitir un acople adecuado de la señal, es decir, un reparto equitativo de la potencia entre su rama directa y la acoplada con el fin de conseguir un acoplador de 4 entradas y 4 salidas.

Adicional se colocaron componentes MLIN de $\lambda/2$ similares características a las líneas de los puertos para obtener una adecuada simetría entre los anillos de 180° , estos fueron colocados desde el puerto 2 hacia el puerto 5 y desde el puerto 11 al puerto 16 de la red de acopladores híbridos, este acople no influye en el diseño del prototipo ya que fue realizado con impedancia característica típica de 50Ω .

Los puertos 1 y 4 del primer anillo direccional híbrido de 180° se configuraron como los puertos de entrada (IN), mientras que los puertos 2 y 3 serán los puertos de salida (OUT).

Los puertos 5 y 8 del segundo anillo direccional híbrido de 180° se configuraron como los puertos de entrada (IN), mientras que los puertos 6 y 7 serán los puertos de salida (OUT). Los puertos 9 y 12 del tercer anillo direccional híbrido de 180° se configuraron como los puertos de entrada (IN), mientras que los puertos 10 y 11 serán los puertos de salida (OUT).

Los puertos 13 y 16 del cuarto anillo direccional híbrido de 180° se configuraron como los puertos de entrada (IN), mientras que los puertos 14 y 15 serán los puertos de salida (OUT).

La distribución de los puertos mencionados se muestra en la figura 51. Las flechas de color negro muestran los puertos de entrada (IN) mientras que las rojas muestran los puertos de salida (OUT).

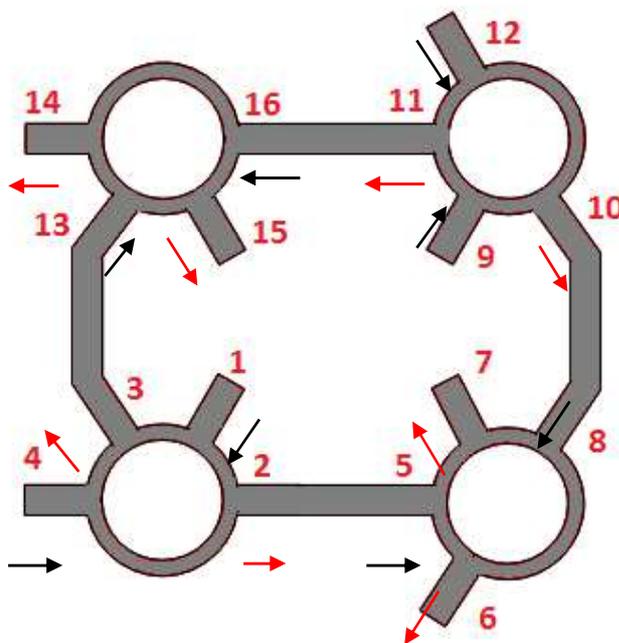


Figura 51 Distribución de Puertos de Acoplador Direccional Híbrido 4x4

Fuente: Propia

El diseño esquemático final es el que se muestra en la figura 52.

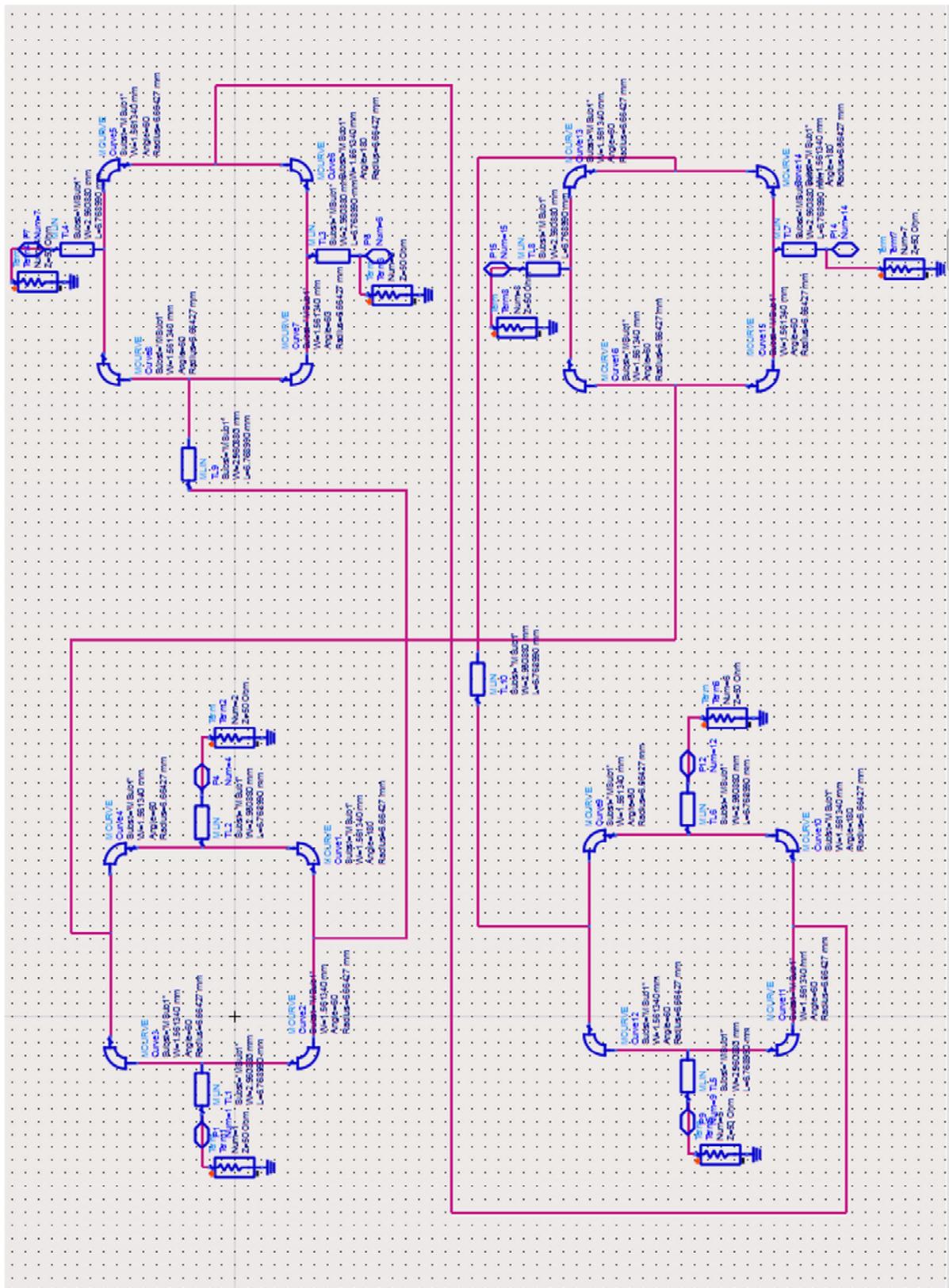


Figura 52 Acoplador Direccional Híbrido de 180° 4x4 a 6Hz

Fuente: Propia

4.4.1. Valores Parámetros de Diseño

Para el diseño del acoplador direccional híbrido de 180° de múltiples secciones, se han colocado los parámetros mostrados en la tabla 5, los cuales son los mismos valores del diseño del acoplador de sección simple.

4.4.2. Simulación en 3D del Acoplador Direccional Híbrido de 180° 4x4 a 6GHz

Una vez realizado el diseño del anillo híbrido de múltiples secciones, se procede a verificar el correcto funcionamiento del mismo. Mediante el uso de la herramienta EM Simulation Setup se configuran características como el tipo de sustrato, la cantidad de puertos, la frecuencia de operación, frecuencia inicial y frecuencia final y parámetros S (Scattering). En la figura 53, se observa el diseño en 3 dimensiones del acoplador híbrido de múltiples secciones que conforman el acople final.

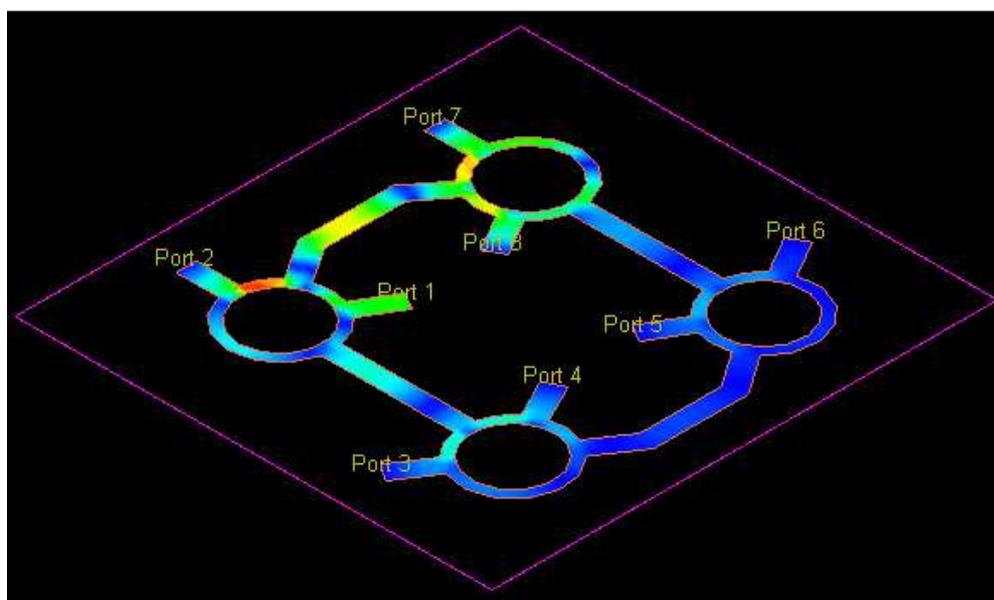


Figura 53 Acoplador Direccional Híbrido de 180° 4x4 visto en 3D

Fuente: Propia

En la figura 54 se muestra al acoplador direccional híbrido 4x4. Se comprueba que cuando la señal ingresa por el puerto 1, esta se distribuye hacia los puertos 2 y 3 quedando el puerto 4 aislado, cumpliendo así las características del acoplador direccional híbrido. De la misma manera cuando la señal ingresa por el puerto 4, esta se distribuye hacia los puertos 2 y 3 quedando el puerto número 1 aislado. Con el diseño final mostrado en la figura 54, cuando se alimenta por el puerto 1, la señal se distribuye hacia el puerto 2 y 3, la señal que sale por el puerto 2 se convierte en una nueva señal ahora de entrada en el puerto 5, de este puerto de entrada se tienen 2 salidas, las que pertenecen a los puertos 6 y 7. De igual manera cuando la señal es alimentada por el puerto 9, esta se distribuye hacia el puerto 10 y 11, la señal que sale por el puerto 11 se convierte en una nueva señal ahora de entrada en el puerto 16, de este puerto de entrada se tienen 2 salidas, las que pertenecen a los puertos 14 y 15.

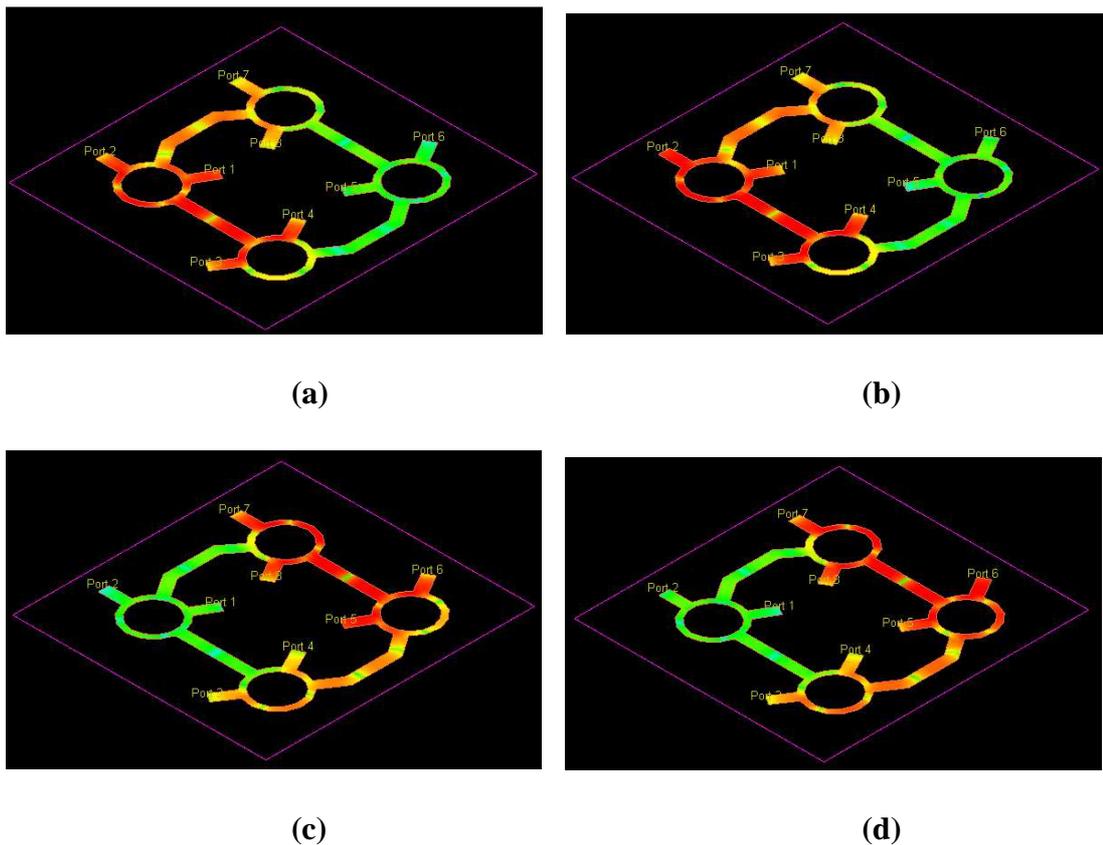


Figura 54 Acoplador Híbrido de 180° 4x4 inducido por cada puerto

(b) Puerto 1; (b) Puerto 4; (c) Puerto 9; (d) Puerto 12

4.4.3. Construcción e implementación del Acoplador de 4x4

Una vez implementado el acoplador 4x4, como se muestra en la figura 55, adicional se muestra el diseño final del acoplador 4x4, con las dimensiones de W y L optimizadas. Se generaron varios diseños de layout, los cuales se muestran en el anexo 1, pero el que mejores resultados tuvo fue el que se ilustra en la figura 55.

En la figura 56 se muestra el layout del acoplador extraído del archivo *.gbr, el cual se utiliza para ser implementado en el sustrato FR-4. La figura 57 muestra el diseño final del acoplador incluyendo los conectores SMA utilizados.

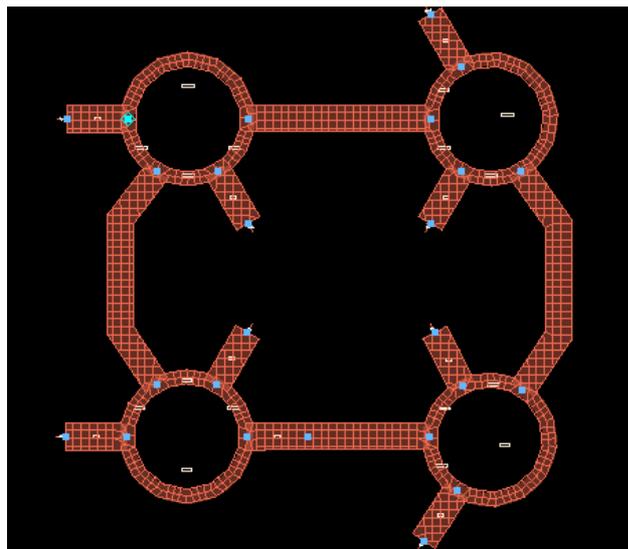


Figura 55 Layout Anillo Híbrido 180°

Fuente: Propia

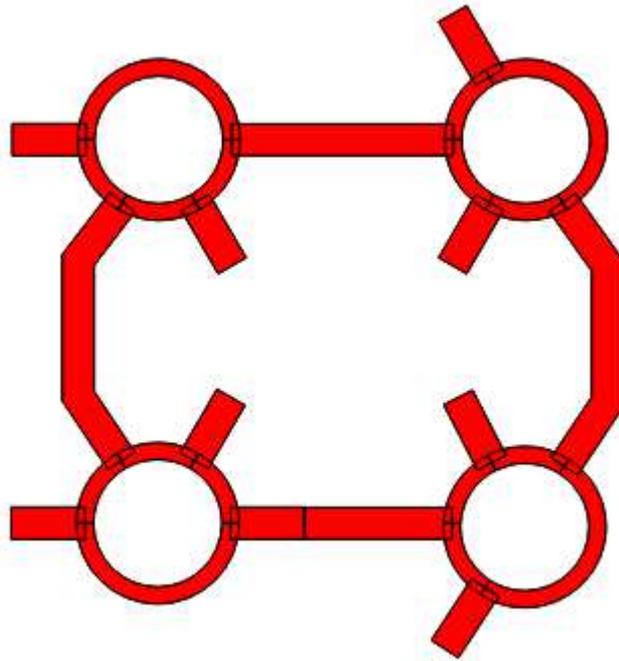


Figura 56 Layout *.gbr

Fuente: Propia

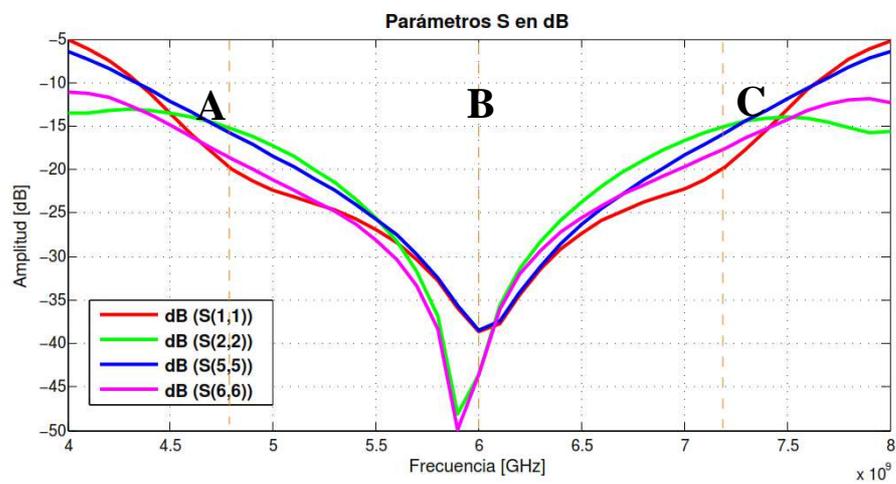


Figura 57 Acoplador direccional Híbrido de 180° 4x4 a 6 GHz implementado

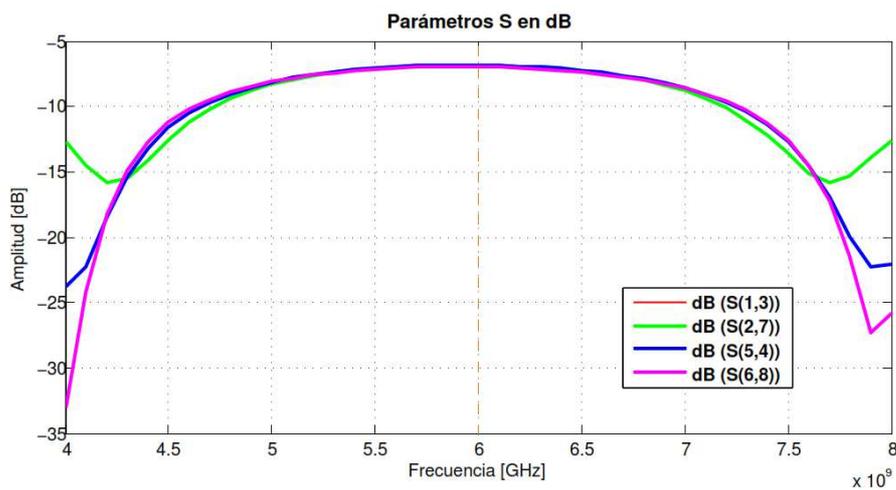
Fuente: Propia

4.4.4. Resultados de la simulación del Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180° con 50% de ancho de banda

En la figura 58 se aprecia el resultado en dB de los parámetros S que se obtienen de la simulación del acoplador direccional híbrido de 180° con frecuencia de trabajo de 6 GHz.



(a)



(b)

Figura 58 Parámetros S expresados en dB – Simulación

a) Reflexión b) Transmisión

Fuente: Propia

La figura 58 muestra el acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180° está trabajando a la frecuencia de operación de 6 GHz en los parámetros de S (1,1) y S (5,5) mientras que existe un desplazamiento de la frecuencia de operación original (6 GHz) hacia la izquierda, este desplazamiento tiene un valor de 0,2 GHz, teniendo así, una frecuencia de trabajo de aproximadamente 5,8 GHz, esta variación no afecta al diseño del acoplador, ya que son provocados por el tipo de sustrato en la placa, por soldadura, entre otros.

Los valores en frecuencia utilizados para el cálculo del ancho de banda porcentual del acoplador híbrido son en -20 dB. Adicionalmente se verifica que el pico más bajo es alrededor de los -43,55 dB.

Los puntos A, B y C muestran puntos de corte entre las señales y su amplitud en dB. En A y C, se muestra a la señal de transmisión S (1,1) cortando en los -20 dB detallados anteriormente, mientras que en B se muestra la frecuencia de operación a la cual fue desarrollada el acoplador, ver tabla 12.

Tabla 12

Parámetros S expresados en dB - Simulación

PUNTOS	S 1,1		S 2,2		S 5,5		S 6,6	
	X	Y	X	X	X	Y	X	Y
	[GHz]	[dB]	[GHz]	[GHz]	[GHz]	[dB]	[GHz]	[dB]
A	4,8	-19,984	4,8	-15,328	4,8	-15,928	4,8	-18,775
B	6	-38,690	6	-43,644	6	-38,484	6	-43,555
C	7,2	-19,695	7,2	-14,989	7,2	-15,735	7,2	-17,493

Fuente: Propia

El porcentaje de ancho de banda se lo calcula al emplear a siguiente fórmula:

$$\%AB = \frac{fr3 - fr1}{fr \text{ (trabajo)}} \cdot (100\%)$$

Para las señales de reflexión S (1,1) se tiene:

$$fr1 = 7,2 \text{ GHz}$$

$$fr3 = 4,8 \text{ GHz}$$

$$\%AB = \frac{(7,20 - 4,80)\text{GHz}}{6 \text{ GHz}} \cdot (100\%)$$

$$\%AB = \frac{2,4}{6} \cdot (100\%)$$

$$\%AB = 40 \%$$

El porcentaje de ancho de banda es de 40 % el cual es un ancho de banda aproximadamente dos veces mayor al generado del acoplador híbrido de sección simple.

Para las señales de reflexión S (2,2) y S (6,6) se tiene:

$$fr1 = 7,5 \text{ GHz}$$

$$fr3 = 4,5 \text{ GHz}$$

$$\%AB = \frac{(7,50 - 4,50)\text{GHz}}{6 \text{ GHz}} \cdot (100\%)$$

$$\%AB = \frac{3}{6} \cdot (100\%)$$

$$\%AB = 50 \%$$

El porcentaje de ancho de banda es el de menor valor entre los calculados. Los parámetros de transmisión $S(1,3)$, $S(2,7)$, $S(5,4)$ y $S(6,8)$ a la frecuencia de operación de 6 GHz tienen alrededor de -6,9 dB. Los parámetros de reflexión $S(2,2)$ y $S(6,6)$ a 6 GHz, tiene una potencia de -43,6 dB, algo muy importante que cabe destacarse es que dicho puerto no está acoplado. Por tanto la potencia de estos tiende a cero.

Continuando con el análisis, las fases de los puertos de salida son los detallados en la figura 59.

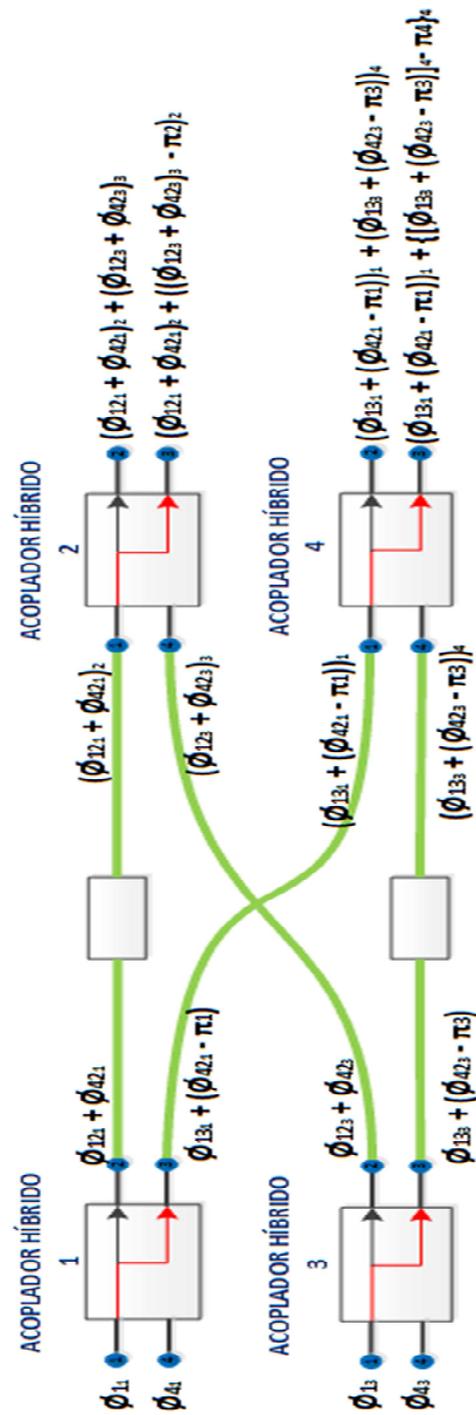


Figura 59 Análisis de ángulos Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180°

Fuente: Propia

Las fases del acoplador 1 se muestran en la figura 60 y cuando es alimentado por el puerto 4 se puede ver en la Figura 61, adicional cuando es alimentado por el puerto 1 del acoplador 3 (Ver Figura 62) y por el puerto 4 del acoplador 3 (Ver Figura 63).

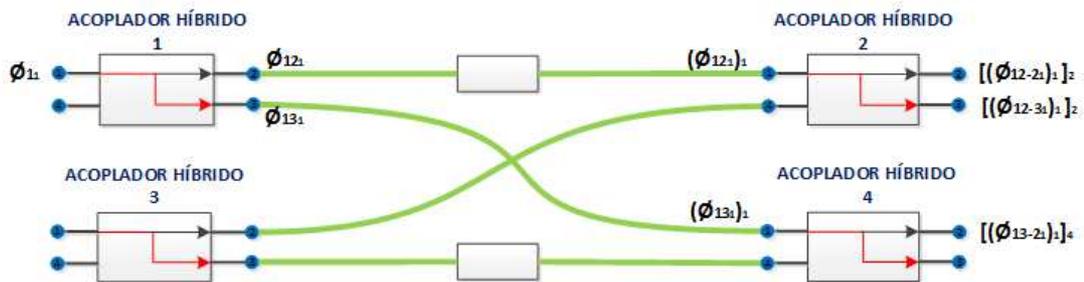


Figura 60 Análisis de Ángulos Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180° desde el Puerto 1- Acoplador 1

Fuente: Propia

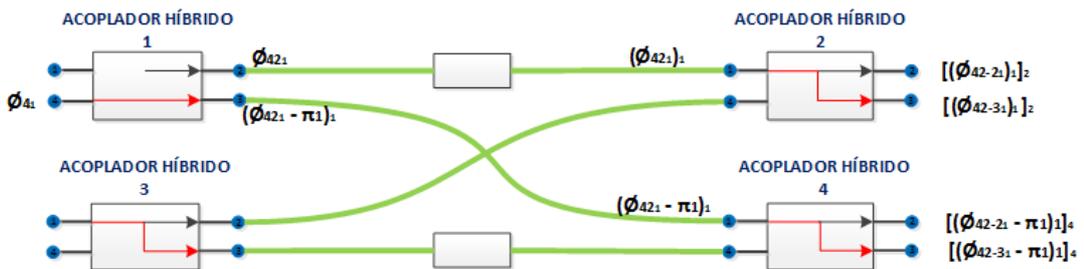


Figura 61 Análisis de Ángulos Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180° desde el Puerto 4 - Acoplador 1

Fuente: Propia

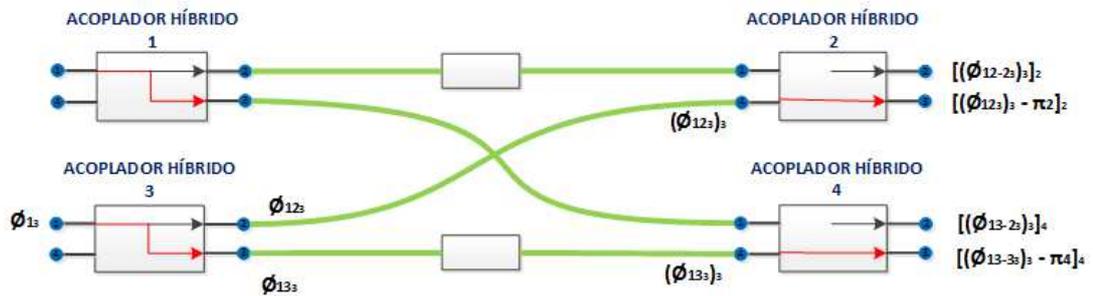


Figura 62 Análisis de Ángulos Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180^0 desde el Puerto 1- Acoplador 3

Fuente: Propia

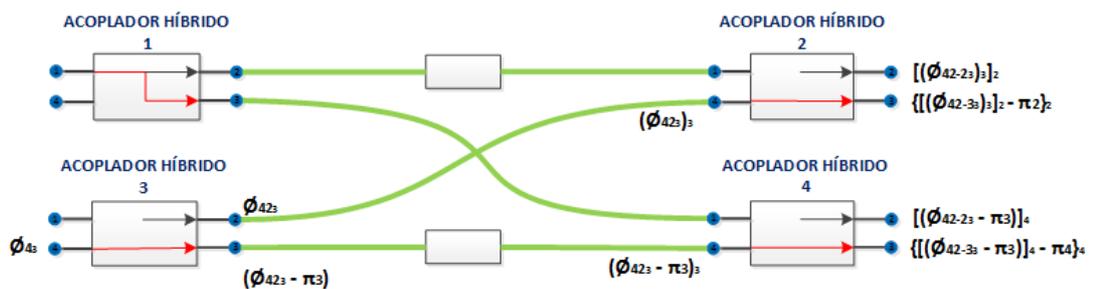


Figura 63 Análisis de Ángulos Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180^0 desde el Puerto 4 - Acoplador 3

Fuente: Propia

A continuación en las figura 64 a la figura 67 se mostrará el resultado de la simulación en fase del acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180^0 desde cada puerto de entrada, es decir, desde los puertos 1-4-5 y 6 ese parámetro es importante ya que lo que se desea obtener es un desfase de 180^0 teórico entre las señales.

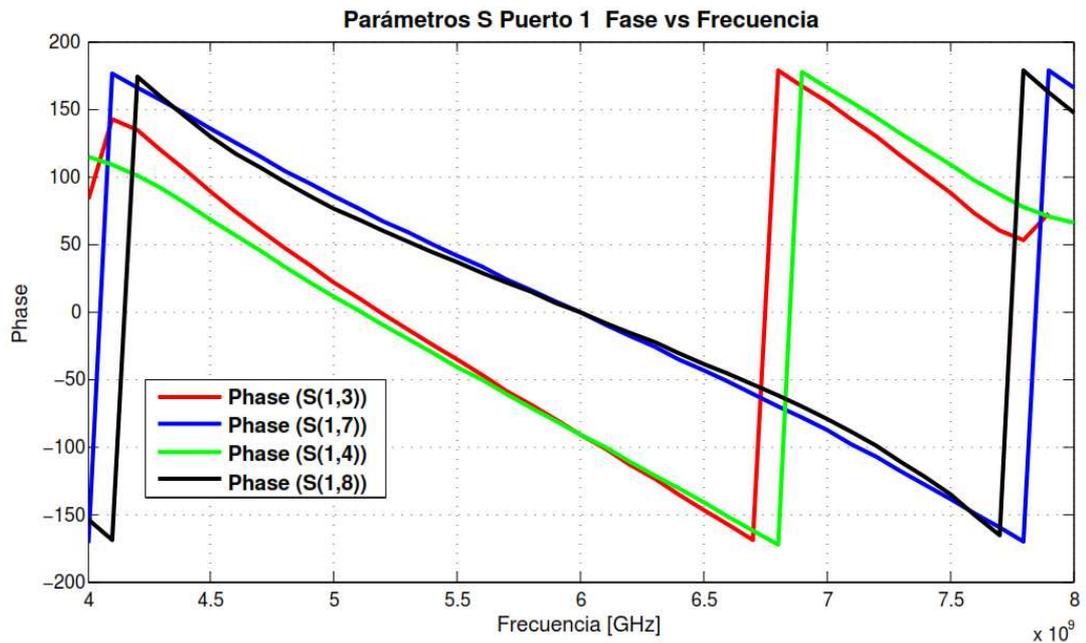


Figura 64 Parámetros S expresados en Fase – Simulación (Puerto 1)

Fuente: Propia

En la tabla 13 se muestra los parámetros en fase cuando el acoplador es inducido por el puerto de entrada 1.

Tabla 13

Parámetros S Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180⁰

PARÁMETROS "S"	FASE [°]
S (1,3)	-91,211
S (1,7)	-1,012
S (1,4)	-91,025
S (1,8)	-0,834

Fuente: Propia

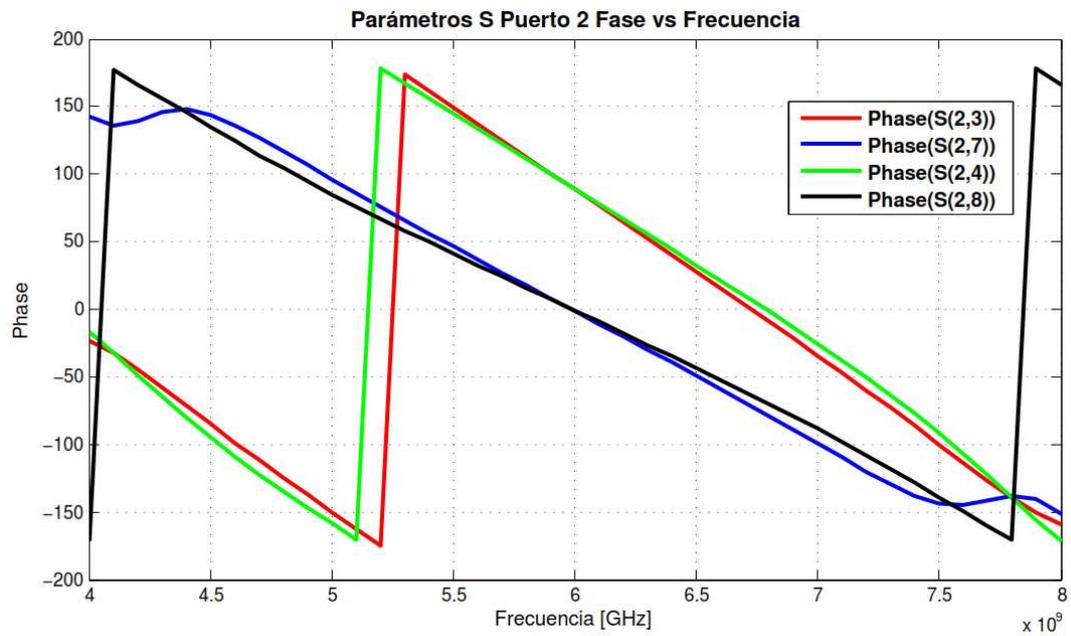


Figura 65 Parámetros S expresados en Fase – Simulación (Puerto 2)

Fuente: Propia

En la tabla 14 se muestra los parámetros en fase cuando el acoplador es inducido por el puerto de entrada 2.

Tabla 14

Parámetros S Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180°

PARÁMETROS "S"	FASE [°]
S (2,3)	88,584
S (2,7)	-1,194
S (2,4)	88,765
S (2,8)	-1,012

Fuente: Propia

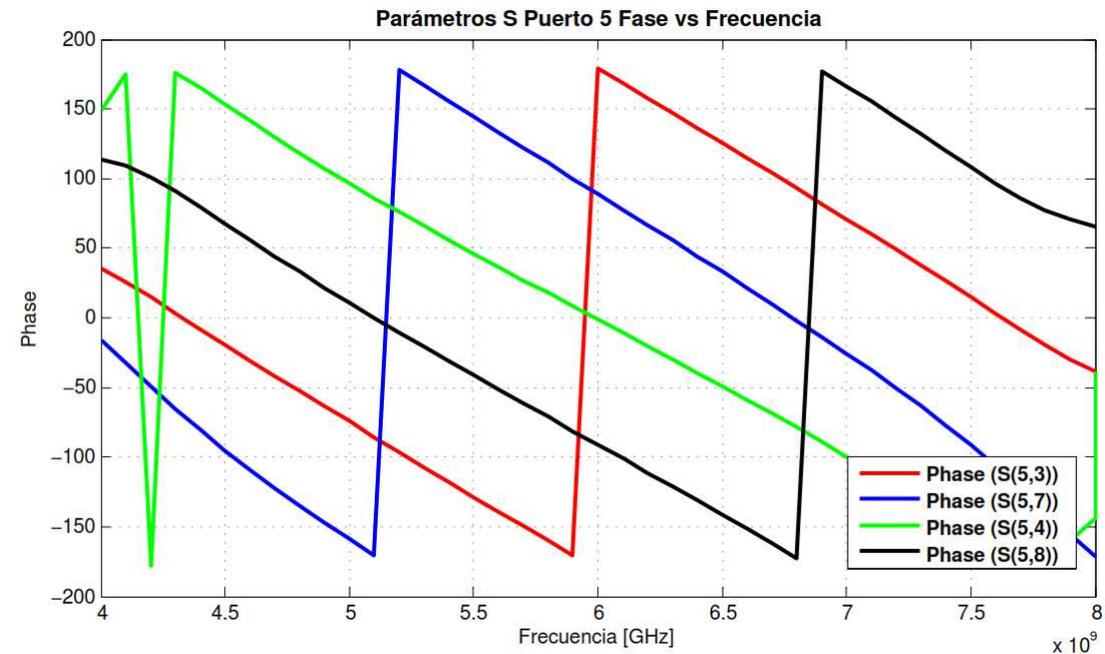


Figura 66 Parámetros S expresados en Fase – Simulación (Puerto 5)

Fuente: Propia

En la tabla 15 se muestra los parámetros en fase cuando el acoplador es inducido por el puerto de entrada 5.

Tabla 15

Parámetros S Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180°

PARÁMETROS "S"	FASE [°]
S (5,3)	178,613
S (5,7)	88,765
S (5,4)	-1,184
S (5,8)	-91,025

Fuente: Propia

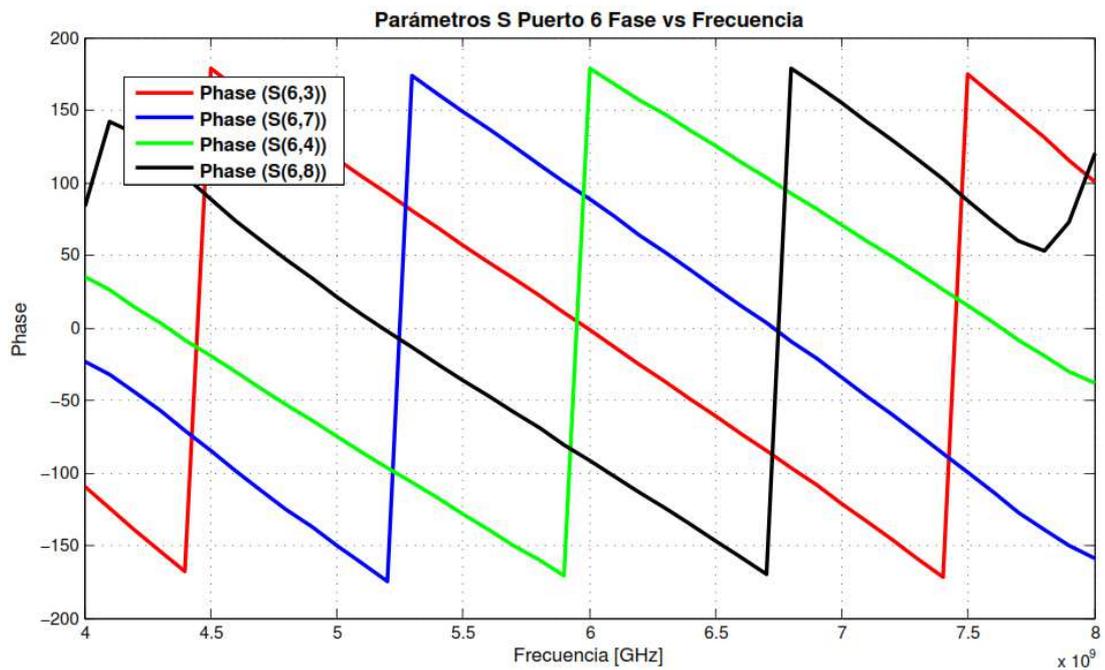


Figura 67 Parámetros S expresados en Fase – Simulación (Puerto 6)

Fuente: Propia

En la tabla 16 se muestra los parámetros en fase cuando el acoplador es inducido por el puerto de entrada 5.

Tabla 16

Parámetros S Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180°

PARÁMETROS "S"	FASE [°]
S (6,3)	-1,594
S (6,7)	88,584
S (6,4)	178,613
S (6,8)	-91,211

Fuente: Propia

4.4.5. Comparación de resultados simulados y medidos del Acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180° a 6 GHz.

Se realizará la comparación y análisis de resultados entre la simulación y la medición real del acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180° en el equipo detallado en el capítulo 3.

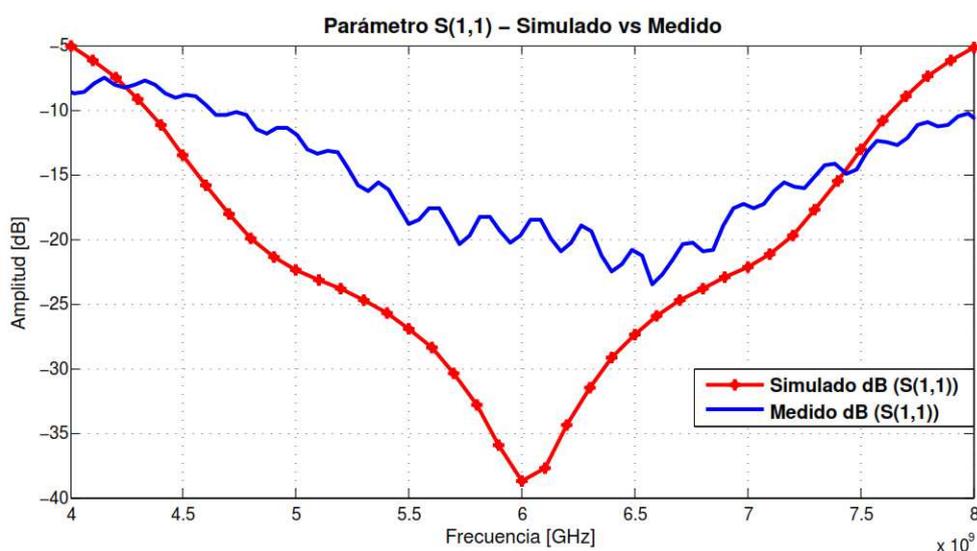


Figura 68 Parámetro S (1,1) Simulado vs Medido

Fuente: Propia

En la figura 68 se observa el parámetro S (1,1) el cual representa la adaptación del puerto uno, cuanto de la señal que ingresa y cuanto se regresa del acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180° , esta señal es reflexión del puerto 1, como se verifica en la figura los valores simulados y reales siguen una misma tendencia, pero el pico más bajo en la señal medida es a 6,6 GHz, es decir existe un desplazamiento de fase de alrededor de 0,6 GHz con respecto a la frecuencia de operación planteada. Además entre las dos señales debido a factores de implementación física, la potencia del puerto está acoplada a -23.5 dB.

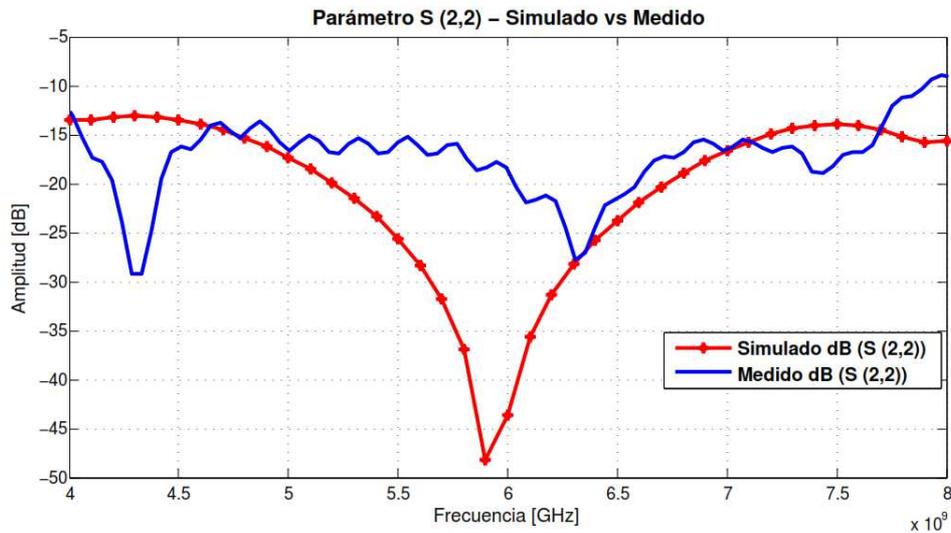


Figura 69 Parámetro S (2,2) Simulado vs Medido

Fuente: Propia

En la figura 69 se muestra el parámetro S (2,2) simulado de color rojo y el medido en color azul, se verifica que existe una variación en la frecuencia de 0,6 GHz, es decir el acoplador real construido está trabajando a una frecuencia de 6,4 GHz, esto se comprueba al observar el pico más bajo en -28 dB, similar a los datos proporcionados en el análisis del S (1,1).

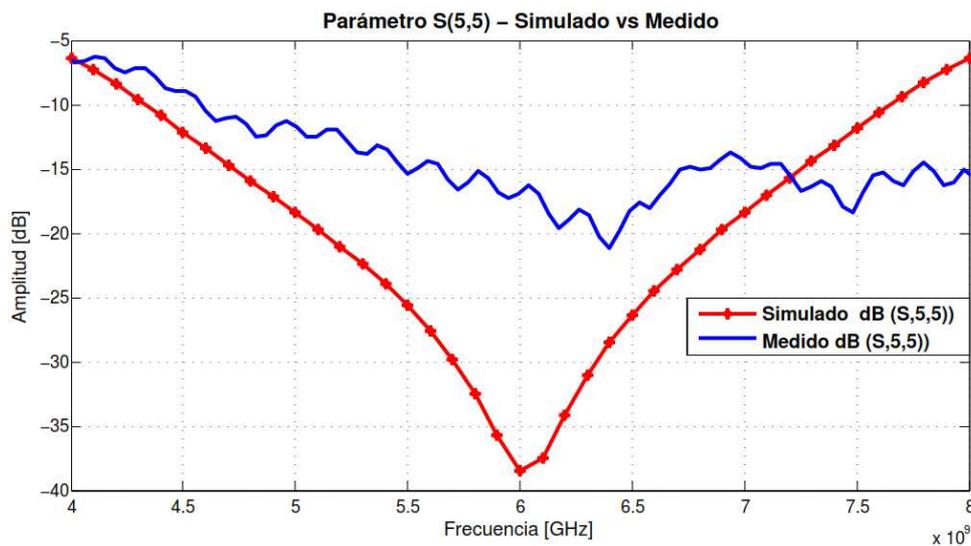


Figura 70 Parámetro S (5,5) Simulado vs Medido

Fuente: Propia

En la figura 70 se muestra el parámetro S (5,5) simulado de color rojo y el medido en color azul, se verifica que existe una variación en la frecuencia de 0,4 GHz, es decir el acoplador real construido está trabajando a una frecuencia de 6,4 GHz, esto se comprueba al observar el pico más bajo. En cuanto a la amplitud en dB el acoplador está en -22 dB aproximadamente. Existe esta variación de potencia grande debido a pérdidas de inserción del material.

Las pérdidas de inserción son producto de la entrada de la señal, cuanto se disipa en el dispositivo y cuanto sale en los puertos de salida, o sea si por ejemplo la salida debe ser 3 dB y en realidad es 4 dB existe una pérdida de inserción de 1 dB.

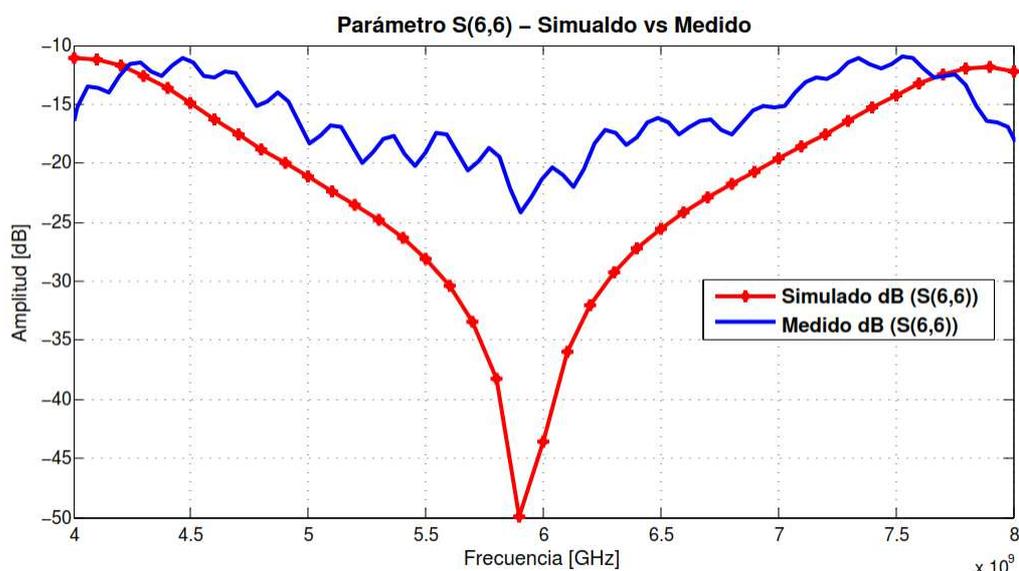


Figura 71 Parámetro S (6,6) Simulado vs Medido

Fuente: Propia

En la figura 71 se observa el parámetro S (6,6) el cual representa la señal de salida del puerto 6 del acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180⁰ como base, como se verifica en la figura los valores simulados y reales siguen una misma tendencia, este puerto está trabajando a la misma frecuencia de operación que en la simulación, pero entre las dos señales existe una diferencia en la potencia del puerto de -25 dB con relación a los casi -50 dB obtenidos idealmente.

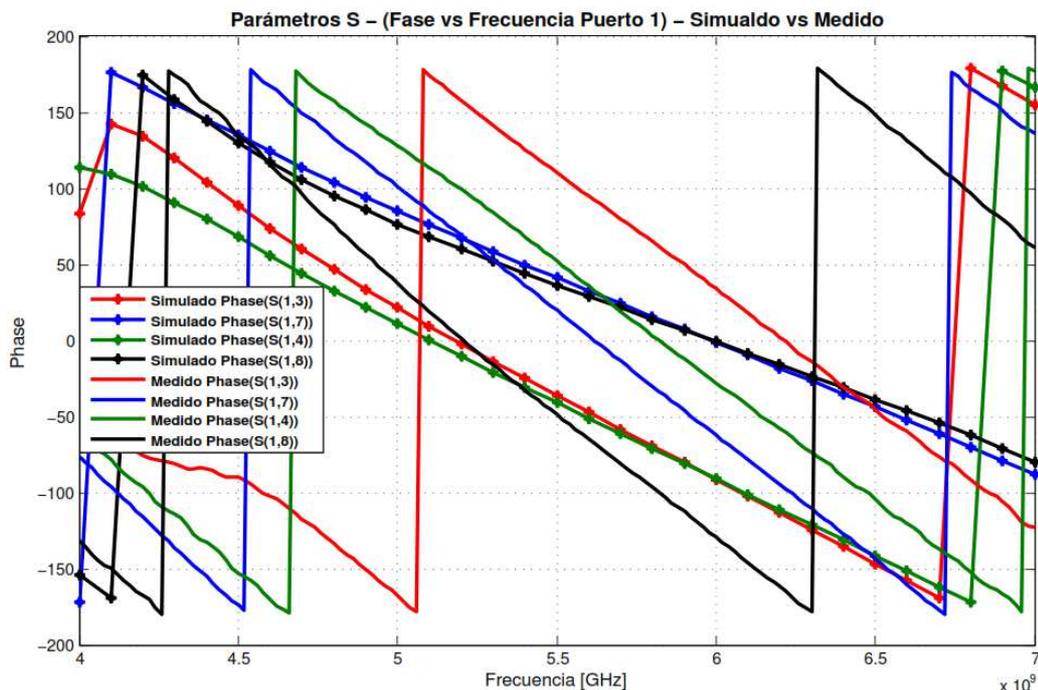


Figura 72 Parámetro S – Puerto 1 en Fase Simulado vs Medido

Fuente: Propia

La ilustración 72 representa los parámetros S en fase del acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180^0 desde el puerto de entrada 1 en simulación y de manera experimental. En S (1,3) a una frecuencia de 6 GHz el acoplador tanto de manera simulada como experimental mantiene su forma, la diferencia resalta en que se tiene una fase de -90^0 en simulación, mientras que el valor medido por el analizador muestra que este parámetro tiene una fase de 38^0 . Cabe mencionar, que existe un desplazamiento de frecuencia hacia los 6.6 GHz, donde se mantiene la fase de los -90^0 , es decir existe un desplazamiento de la señal inicial de 0.6 GHz.

En el parámetro S (1,7) se observa de igual manera el desfase de 0^0 del valor simulado a -60^0 en el valor medido en 6 GHz, al igual que en el parámetro anterior la señal medida tiene un desplazamiento hacia los 5.6 GHz conservando así su fase de 0^0 . En S (1,4) se tiene una fase de -90^0 para la simulación mientras que el

valor medido conserva esta fase con el desplazamiento a 6.4 GHz. Finalmente para el S (1,8) se tiene una fase de 0^0 , en este parámetro se observa que existe un desplazamiento de frecuencia mayor a los anteriores, para cumplir los 0^0 de fase este se desplaza hacia los 5.2 GHz.

$$\angle S_{31} - \angle S_{41} = -91,211 - (-91,025) = -0,186^0$$

$$\angle S_{31} - \angle S_{71} = -91,211 - (-1,012) = -90,199^0$$

$$\angle S_{31} - \angle S_{81} = -91,211 - (-0,834) = -90,377^0$$

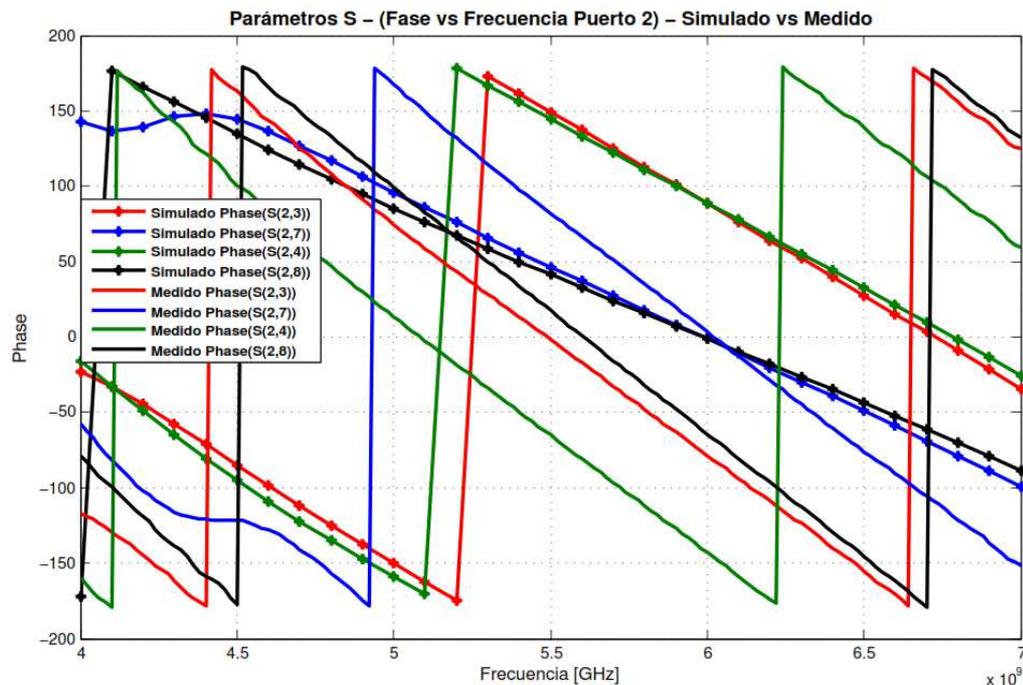


Figura 73 Parámetro – Puerto 2 en Fase Simulado vs Medido

Fuente: Propia

La ilustración 73 representa los parámetros S en fase del acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180^0 desde el puerto de entrada 2 en simulación y de manera experimental. En todos los parámetros el acoplador tanto de manera simulada como experimental mantiene su forma, la diferencia resalta en el cambio de fases a la

frecuencia de 6 GHz y la variación de frecuencia entre de ± 0.8 GHz a partir de la frecuencia de operación de 6 GHz.

En S (2,3) se tiene una fase de $88,58^0$ mientras que dada la medición con el analizador se tiene una fase negativa de $-78,69^0$, adicionalmente se observa que para mantener la fase de aproximadamente 90^0 , esta sufre un desplazamiento hacia la izquierda hacia los 4.9 GHz. En S (2,7) se tiene una fase de aproximadamente 0^0 mientras que dada la medición con el analizador se tiene una fase similar a los 0^0 , en este parámetro se mantienen los mismos valores tanto en la simulación como en el valor real medido. En S (2,4) se tiene una fase de $88,58^0$ similar a la de S (2,3), se tiene la misma fase a una frecuencia superior a los 6 GHz, aproximadamente a los 6.3 GHz.

Finalmente en S (2,8) se tiene una fase de 0^0 aproximadamente a los 6 GHz, de igual manera existe un desplazamiento corto alrededor de los 5.6 GHz. Se analizan los resultados como en el puerto 2 y se obtiene:

$$\emptyset S_{32} - \emptyset S_{42} = 88,584 - 88,765 = -0,181^0$$

$$\emptyset S_{32} - \emptyset S_{72} = 88,584 - (-1,194) = 89,778^0$$

$$\emptyset S_{32} - \emptyset S_{82} = 88,584 - (-1,012) = 89,596^0$$

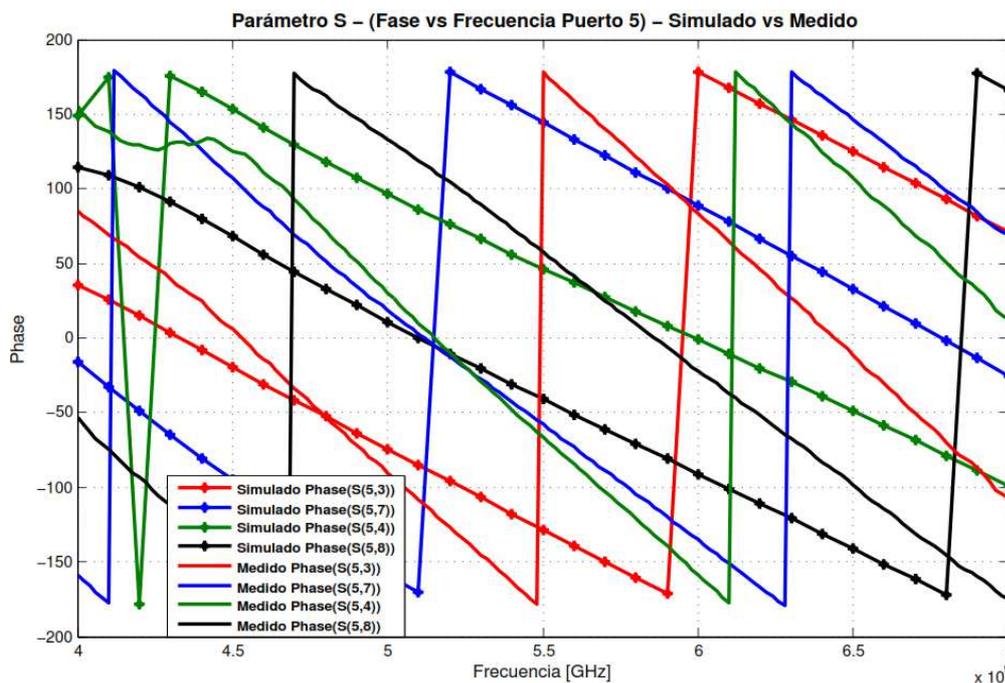


Figura 74 Parámetro S – Puerto 5 en Fase Simulado vs Medido

Fuente: Propia

La figura 74 representa el parámetro S en fase del acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180^0 desde el puerto de entrada 5 en simulación y de manera experimental.

A la frecuencia de 6 GHz, el parámetro S (5,3) se tiene una fase de 180^0 aproximadamente, mientras que dada la medición con el analizador se tiene una fase de 90^0 , por tanto se debe realizar la medición incluyendo el desplazamiento de frecuencia que se viene dando en los parámetros anteriores a 5.5 GHz se muestra que cumple el valor de fase de los 180^0 , por tanto se realiza la comparación de los parámetros a 5.5 GHz como frecuencia de operación.

En S (5,7) se tiene una fase de aproximadamente 90^0 , este parámetro se desplaza hacia los 6.3 GHz obteniendo así un valor de fase muy cercano a los 90^0 mencionados anteriormente. En S (5,4) se tiene una fase de 0^0 a los 6 GHz, al igual

que en los otros parámetros, cuando se realizan las mediciones se verifica que la fase se mantiene a 0^0 pero la señal sufre un desplazamiento hacia los 6.1 GHz. En S (5,8) se tiene una fase de -90^0 a los 6 GHz, al igual que en los otros parámetros, cuando se realizan las mediciones se verifica que la fase se mantiene a -90^0 pero la señal sufre un desplazamiento hacia los 6.3 GHz.

$$\phi_{S_{35}} - \phi_{S_{45}} = 178,613 - (-1,184) = 179,79^0$$

$$\phi_{S_{35}} - \phi_{S_{75}} = 178,613 - 88,765 = 89,848^0$$

$$\phi_{S_{35}} - \phi_{S_{85}} = 178,613 - (-91,025) = 269,64^0$$

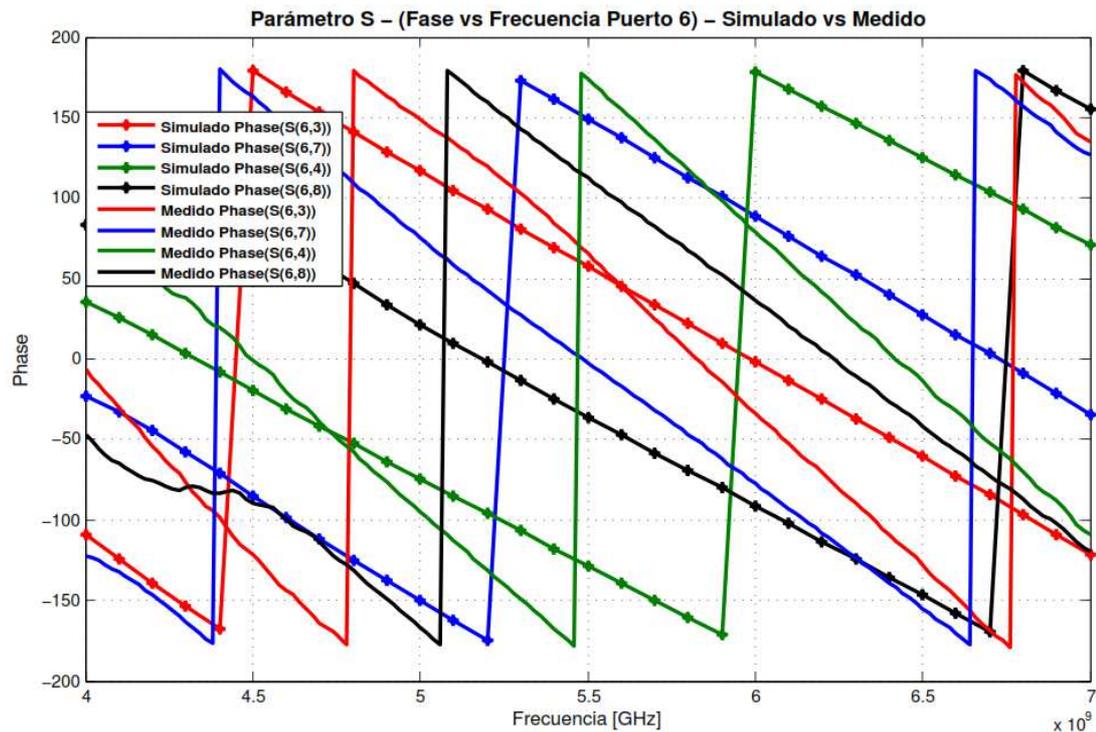


Figura 75 Parámetro S (6,8) en Fase Simulado vs Medido

Fuente: Propia

La figura 75 representa el parámetro S en fase del acoplador de 4x4 utilizando un anillo híbrido de 180⁰ desde el puerto de entrada 6 en simulación y de manera experimental.

El parámetro S (6,3) en fase del acoplador direccional híbrido de 180⁰ muestra un valor de aproximadamente 0⁰, en este parámetro se tiene un pequeño desplazamiento hacia los 5.85 GHz, este desplazamiento es mínimo. A una frecuencia de 6 GHz en el parámetro S (6,4) se muestra una fase de 180⁰ aproximadamente, al igual que en los otros parámetros se tiene un desplazamiento de frecuencia hacia la izquierda, es decir en los 5.5 GHz se presenta la misma fase de 180⁰ aproximadamente.

En S (6,8) se tiene una fase de -91⁰ a los 6 GHz, al igual que en los otros parámetros, cuando se realizan las mediciones se verifica que la fase se mantiene a -91⁰ pero la señal sufre un desplazamiento positivo desde la frecuencia de operación hacia los 6.7 GHz.

Se hace el respectivo análisis entre cada uno de los parámetros cuando es alimentado desde el puerto 6.

$$\angle S_{36} - \angle S_{46} = -1,594 - (178,613) = -180,207^{\circ}$$

$$\angle S_{36} - \angle S_{76} = -1,594 - (88,584) = -90,178^{\circ}$$

$$\angle S_{36} - \angle S_{86} = -1,594 - (-91,211) = 89,617^{\circ}$$

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se diseñó dos acopladores direccionales híbridos de 180° de sección simple y de 4 secciones, con una frecuencia de operación establecida a 6 GHz la cual pertenece a la banda C mediante el uso de tecnología *Microstrip*, estos dos diseño fueron implementados alcanzado como resultado dispositivos electrónicos de bajo costo computacional de Radio Frecuencia capaz de trabajar con frecuencias de 6 GHz, teniendo como principal característica el costo económico con respecto a otros acopladores o equipos que hay en el mercado, además cabe aludir que estos dispositivos son de fácil reproducción, en comparación a la tecnología de guía de onda u otras tecnologías.
- Se realizó el análisis matemático del nivel de potencia en dB y principalmente la fase a la que se diseña el acoplador es un parámetro fundamental relacionado con el factor de acoplamiento tanto para el diseño de sección simple como para el diseño de múltiples secciones, siendo este último diseño el más complejo dependiendo del número de secciones que se desee implementar y debido a que el acoplador construido generó un nuevo tipo de acoplador de 4 entradas x 4 salidas.
- Los parámetros S (*Scattering*) son la base para el desarrollo de las simulaciones y mediciones, estos parámetros nos permiten obtener los valores de potencia, magnitud y fase de cada uno de los puertos en los dos esquemas planteados.

- Se analizó previamente los materiales que se utilizaría en base a sus características eléctricas, por tanto, se eligió al sustrato FR-4 como uno de que cumple la mayor parte de parámetros para la elaboración de los diseños y con respecto a las cargas, conectores, se dio importancia a que sus pérdidas de acuerdo al material de elaboración sean mínimas, logrando así resultados con menor cantidad de variaciones.
- Se verificó con la construcción del acoplador direccional híbrido, que a más de tener múltiples secciones, al acoplador se lo puede transformar en una matriz Butler, la cual tiene como elemento en común el anillo híbrido de 180° (rat-race). Este nuevo elemento genera un nuevo acoplador híbrido con 4 entradas y 4 salidas, cabe recalcar que los resultados a pesar del aumento del ancho de banda presentan resultados diferentes a los simulados, esto se debe a la adaptación y el aislamiento frente al diseño circuital inicial.
- Se garantizó que los resultados sean los más reales posible, por tanto para desarrollar las pruebas reales de los acopladores se utilizaron cables PASTERNAK PE304-24 certificados en base a la norma ISO 9001:2008 y un analizador de espectros N9918A de Keysight Technologies calibrado en frecuencia en base a la norma ISO 17025, así como las cargas que se emplearon son cargas de 50Ω reales, determinando así que estos materiales son una parte esencial para comprobar el buen desempeño de los acopladores.
- En las pruebas reales con el acoplador direccional híbrido de sección simple, se puede verificar que las señales son aproximadas entre sí, tienden a ser similares y en algunos casos son idénticas, por tanto se logra obtener valores resultantes semejantes a los obtenidos en la simulación, cabe considerar que no son todas completamente iguales debido a que se presenta variaciones por pérdidas del sustrato FR-4 característico del mismo, así como también por pérdidas generadas al realizar la soldadura de los conectores SMA.

- Durante el proceso de desarrollo y simulación se determinó que si el acoplador es inducido por el puerto de entrada 1, el puerto 4 quedará completamente aislado, esto nos damos cuenta ya que tenemos un valor alto respecto a los de las demás secciones, por tanto el valor del parámetro $S(1,4)$ se aproximará aún más al cero ideal debido al aislamiento respecto al puerto 1.
- Al incrementar el número de secciones a un acoplador direccional híbrido de 180° se logró aumentar el porcentaje de ancho de banda de trabajo, consideramos el primer diseño, donde se trabajó con un anillo de sección simple, el ancho de banda fue de 27,5%, mientras que al generar un nuevo diseño a la misma frecuencia de 6 GHz se obtuvo un ancho de banda de 50%. Para un mayor ancho de banda se debe aumentar más sección recordando que el número de acopladores se debe basar en la relación 2^n , donde n es el número de secciones a realizarse desde $n=0,1,\dots,3,4$.
- El análisis de los ángulos es fundamental para cumplir las características de ser un híbrido de 180° , cabe mencionar que el anillo de sección simple estas características se cumplieron de una manera similar, cuando se obtuvo el segundo diseño, existe un desplazamiento de frecuencia propio del diseño y por características de los materiales utilizados.
- Tras el análisis de los dos diseños tanto del acoplador híbrido simple y el acoplador híbrido de 4x4 se verifica que se obtienen resultados deseados, es decir, se obtuvieron una transmisión y un acople cercanos a los -3dB, y una reflexión alrededor de los -35dB en el acoplador simple y de -23,5 dB en el acoplador 4x4, lo cual es un excelente resultado en la práctica.
- Una vez construido el acoplador híbrido 4x4 se verifican las fases de los parámetros S, llegando a la conclusión que cuando se alimenta el acoplador por el puerto 1, se tiene un desfase de 90° entre los parámetros $S(1,3)$ y sus parámetros $S(1,7)$ y $S(1,8)$. De igual manera sucede cuando se alimenta el acoplador por el puerto 2. Cuando el acoplador se alimenta por el puerto 5 se

tiene un desfase de 180^0 entre los parámetros S (5,7) y S (5,8) y de igual manera cuando el acoplador es alimentado por el puerto 6 existe desfase de 180^0 entre los parámetros S (6,7) y S (6,8).

5.2. Recomendaciones

- Se debe emplearse un sustrato que presente las menores pérdidas posibles, es evidente que el sustrato con las pérdidas más bajas tendrá un costo elevado, pero esto evitará problemas de desfasaje de la frecuencia de operación y de potencia.
- Es recomendable emplear conectores SMA debido a que presentan bajas pérdidas características en el rango de su frecuencia de trabajo.
- Una adecuada soldadura de los conectores SMA a la placa evitará tener pérdidas por capacitancias parásitas. Esto se logra limpiando las placas con alcohol o el propio líquido para soldas.
- Para la construcción de las placas, estas se las deben hacer con equipos que tengan un alto grado de precisión con la finalidad de no tener variación en las dimensiones de las secciones del acoplador, principalmente en las secciones circulares del anillo, por tanto, se recomienda utilizar una prototipadora de alta gama.
- Una vez soldado los conectores SMA se debe comprobar la conectividad entre las pistas y el núcleo, y la conectividad entre la tierra y la estructura del conector, esto evita producir cortocircuitos a la placa.
- Considerar que al adherir elementos al diseño del acoplador como medios de interconexión entre secciones su longitud debe ser proporcional con la de las

secciones, sino se ocasionaría distorsión en los resultados ya que en RF la distancia es muy importante, en el caso del acoplador de secciones múltiples están separados los anillos entre sí a longitudes equivalentes y con consideraciones de $\lambda/2$.

- Al conectar el cable Pasternak en cada puerto del acoplador para realizar las mediciones se lo debe hacer con mucho cuidado y con la herramienta adecuada empleando pinzas especiales que vienen en el kit del analizado, así se evita daños en los conectores SMA tanto macho como hembra.
- La calibración del equipo antes de realizar cualquier medición es fundamental, ya que estos equipos son muy sensibles y el no seguir paso a paso el proceso de calibración generará gráficas indeseadas o a su vez incomprensibles.
- Colocar las cargas de 50Ω en todos los puertos que no van a ser acoplados, esto ayuda a que la traza en el analizador sea real y sin armónicos.
- Actualizar el software ADS es de gran ayuda, debido a que las versiones actuales tienen mayor cantidad de librerías y más ejemplos en formato de guías para el desarrollo de distintos trabajos.

5.3. Trabajos Futuros

Como trabajos futuros en base al proyecto realizado, se propone desarrollar e implementar acopladores direccionales híbridos de 180° de múltiples puertos tanto de entrada como de salida, es decir, realizar la múltiple sección al acoplador híbrido desarrollado en este proyecto, para obtener un acoplador con 8 puertos de entrada y 8

de salida. Una vez realizada la simulación y construcción lo que se pretendería es que aumente el ancho de banda a alrededor de un 80 o más%.

Lo que se espera de manera general es replicar este trabajo con el acoplador de múltiples puertos en tecnología *Microstrip*. Incorporar este tipo de dispositivos en tecnología *Microstrip* y realizar una comparación con acopladores de sección y múltiples secciones construidos en forma de híbrido de línea acoplada cónica y finalmente como una unión híbrida de guía de ondas o conocida también como T-mágica.

Esta comparación de los 3 tipos de acopladores híbridos de 180° , permitirá obtener al mejor de todos tanto en su parte de desarrollo y respuesta de frecuencia, una vez alcanzado esto, el acoplador de una o múltiples secciones debe ser sometido a pruebas reales en situaciones de aplicación.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agilent EEsof, E. S. (2000). *Agilent EEsof EDA Software*. Obtenido de <http://www.home.agilent.com/en/pc-1297133/advanced-design-system>
- Almeida, D. (2012). Nuevas topologías de divisores de potencia Wilkinson para frecuencias duales (Tesis postgrado). Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
- BlackStick. (s.f.). *The PCB Design Professionals*. Obtenido de <http://www.blackstick.co.uk/pcb-design-fabrication-tutorial.php>
- Braunl, T. (2011). *Google Libros*.
- Cagigas, J., Villa, E., Artal, E., & Hoyland, R. J. (2010). Híbrido 180° de Banda Ancha en Tecnología Microstrip a 31 GHz. *Instituto de Astrofísica de Canarias.*, 1-4.
- Cobo, I. J. (2012). *Análisis y mediciones de los parámetros de dispersión o Scattering parameters en un cuadripolo o en una red de n puertos (multipolo)*. . Tucumán.
- Conductores. (s.f.). *Conductores*. Obtenido de Conductores: <http://personales.upv.es/jquiles/prffi/conductores/ayuda/hlpkdielectrica.htm>
- ESPE. (2010). Departamento de Eléctrica y Electrónica. *ESPE*.
- Ezequiel, S. J., & Nicolas, S. M. (27 de 11 de 2012). *GUIA DE ONDA*. Obtenido de GUIA DE ONDA: <http://guiadeondafisica.blogspot.com/>
- FIALLOS CHRISTIAN. (2016). : *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ACOPLADORES DE LÍNEAS ACOPLADAS, USANDO TECNOLOGÍA MICROSTRIP EN BANDA C DE MÚLTIPLES SECCIONES*. Sangolquí.

- Frenzel, L. (2016). *Sistemas electrónicos de comunicaciones (Tercera reimpresión edición)*. México. Obtenido de wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico#cite_ref-1
- Galeon. (s.f.). *Galeon*. Obtenido de Galeon: <http://tutorial.galeon.com/inalambrico.htm>
- Keysight Technologies. (2016). *N9918A FieldFox Handheld Microwave Analyzer, 26.5 GHz*. Obtenido de <http://www.keysight.com/en/pdx-x201927-pn-N9918A/fieldfox-handheld-microwave-analyzer-265-ghz?cc=EC&lc=eng>
- LCardaba. (2016). *LCardaba*. Obtenido de LCardaba: <http://www.lcardaba.com/projects/placas/placas.htm>
- Mauricio, H., & Gabriel Calle, M. S. (Febrero de 2013). *SlideShare*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/maoherrera1/acopladores-direccionales>
- Mini-Circuits. (s.f.). *Termination SMA*. Obtenido de <https://www.minicircuits.com/pdfs/ANNE-50+.pdf>
- Molina, C. (2014). *RADIO ENLACES TERRESTRES / MICROONDAS*. Obtenido de RADIO ENLACES TERRESTRES | MICROONDAS: http://www.redtauros.com/Clases/Medios_Transmision/04_Radioenlaces_Terrestres_Microondas_.pdf
- Monzón, V. (2009). *Diseño e implementación de circuitos pasivos de microondas en tecnología CRLH*. Universidad Carlos III De Madrid, Madrid, España.
- Pasternack Enterprises. (2016). *New Coaxial Test Cables Available from Pasternack*. Obtenido de https://www.pasternack.com/pages/Featured_Products/sma-and-type-n-rf-coaxial-test-cables.html
- Pozar, D. M. (2009). *Microwave Engineering*. EEUU: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering*. Massachusetts: John Wiley & Sons Inc.
- RadioNoticias. (s.f.). *RadioNoticias*. Obtenido de RadioNoticias: <http://www.radionoticias.com/articulos/SMA.pdf>

- RedTauros. (s.f.). *RedTauros*. Obtenido de RedTauros: http://www.redtauros.com/Clases/Medios_Transmision/04_Radioenlaces_Terrestres_Microondas_.pdf
- Rodríguez, S. V. (2009). *Diseño y caracterización de Híbrido de 180 Uniplanar Multimodal en Bandas C y X*.
- S.A.S, M. (s.f.). *macitel*. Obtenido de macitel: <http://www.macitel.com/products-and-services/enlaces-microondas/>
- Seco, Á. (2009). *Diseño de acopladores direccionales de microondas para matrices de Buttler* (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
- Seco, A. (Mayo 2009). *Diseño de Acopladores Direccionales de Microondas para Matrices de Butler*. Madrid.
- Sevilla., B. d.-U. (24 de Junio de 2016). *Biblioteca de Ingeniería - Universidad de Sevilla* (S.F.). Obtenido de [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11101/fichero/2+-+Advanced+Design+System+\(ADS\).pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11101/fichero/2+-+Advanced+Design+System+(ADS).pdf)
- Technologies, K. (2015). *Keysight Technologies*. Obtenido de Keysight Technologies: <http://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads?cc=US&lc=eng>
- Vallejo, H. B., & Cervantes, X. G. (2015). *Diseño y construcción de un Acoplador direccional microstrip de tres secciones para la banda de 2.4 GHz con HMI a la PC*. Sangolquí.
- Virtual, 3. (s.f.). *3.0 Virtual*. Obtenido de 3.0 Virtual: http://www.3punto0virtual.es/product_info.php/conector-adaptador-sma-macho-sma-hembra-electronica-p-476
- Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia*. Obtenido de <https://en.wikipedia.org/wiki/FR-4>
- Hector Bastidas, X. G. (Enero de 2014). *Repositorio Digital ESPE*. Obtenido de Repositorio Digital: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/7739>

Iván de Paúl Bernal, A. G. (2007). *Diseño, simulación y experimentación de un circuito*.

Jones, E. M. (1956). *IEEE Xplore Digital Library*. Obtenido de IEEE Xplore Digital Library:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1125022&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel6%2F22%2F24864%2F01125022>

E. G. Cristal, L. Y. (Septiembre de 1965). *IEEE Xplore Digital Library*. Obtenido de IEEE Xplore Digital Library:

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1126050&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1126050

Christopher Caloz, A. S. (3 de Marzo de 2004). *IEEE Xplore digital Library*. Obtenido de IEEE Xplore digital Library:

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1273741&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1273741

Fernández, S. (1992). *Optica integrada, primeros pasos: Fundamentos teóricos y aplicaciones*. En S. Fernández, & S. d. Oviedo (Ed.), *Optica integrada, primeros pasos: Fundamentos teóricos y aplicaciones* (1 ed., págs. 17-19). Oviedo, Asturias, España.

Stiles, J. (2009). *Coupled Line Directional Couplers package*. Kansas.

Pérez, J. A. (Diciembre de 2012). *Diseño Miniaturizado de Acopladores de Microondas en Tecnología Metamaterial*. Cartagena, Bolívar, Colombia.

Jacho, C., Valle, F., Carrillo, M., & Illapa, J. (2014). *Acopladores Direccionales*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, Riobamba. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/doc/200203749/Acopladores-direccionales-2>

Enterprises, P. (2013). *Pasternack Enterprises*. Recuperado el 20 de 07 de 2016, de Pasternack Enterprises: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE304-24.pdf>