



**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 ELECTRÓNICO EN TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO DE DIVISORES DE POTENCIA TIPO T TRUNCADA PARA BANDA X, y, Ku  
EN TECNOLOGÍA DE GUÍA DE ONDA INTEGRADA EN SUSTRATO (SIW)”**

**AUTOR: BURBANO GUERRERO, JUAN PABLO**

**DIRECTOR: ING. HARO BÁEZ, RAÚL VINICIO MSc.**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “**DISEÑO DE DIVISORES DE POTENCIA TIPO T TRUNCADA PARA BANDA X, y, Ku EN TECNOLOGÍA DE GUÍA DE ONDA INTEGRADA EN SUSTRATO (SIW)**” realizado por el señor JUAN PABLO BURBANO GUERRERO 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 establecido por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor JUAN PABLO BURBANO GUERRERO para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de noviembre del 2017



-----  
ING. RAÚL HARO BÁEZ MSc.

DIRECTOR



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, JUAN PABLO BURBANO GUERRERO, con cédula de ciudadanía N.º 0401305859, declaro que este trabajo de titulación “**DISEÑO DE DIVISORES DE POTENCIA TIPO T TRUNCADA PARA BANDA X, y, Ku EN TECNOLOGÍA DE GUÍA DE ONDA INTEGRADA EN SUSTRATO (SIW)**” 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 declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 13 de diciembre del 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece ser la del autor, Juan Pablo Burbano Guerrero.

JUAN PABLO BURBANO GUERRERO

C.C. 040130585-9



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

## AUTORIZACIÓN

Yo, JUAN PABLO BURBANO GUERRERO, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO DE DIVISORES DE POTENCIA TIPO T TRUNCADA PARA BANDA X, y, Ku EN TECNOLOGÍA DE GUÍA DE ONDA INTEGRADA EN SUSTRATO (SIW)**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 13 de diciembre del 2017

---

JUAN PABLO BURBANO GUERRERO

C.C. 040130585-9

## DEDICATORIA

Quiero de dedicar esta tesis:

A Dios porque junto a Él, pude llegar hasta ese escalón en mi vida, por darme la sabiduría y siempre estar bajo su protección y cuidado, además de su infinito amor.

A mi Padre, porque gracias al apoyo, consejos, motivación y valores inculcados desde que inicié este largo y difícil camino en mi vida estudiantil, me ha permitido llegar a conseguir esta gran meta, gracias por haber depositado en mí la confianza y darme las herramientas necesarias para poder cosechar éxitos.

A mi madre, que con su esfuerzo, sacrificio y ejemplo es siempre luz de paz y tranquilidad en el hogar, porque siempre está pendiente de mí y brindarme todo el amor que solo una madre puede entregarlo, que es para mí el detonante de mi felicidad.

A mis hermanos ya que ellos son la alegría y el motor en mi vida, gracias por estar presentes compartiendo los mejores y peores momentos en mi vida.

Y a todos aquellos que se hicieron partícipes de alguna manera en la elaboración de esta tesis y en el camino hasta aquí recorrido, mi eterna gratitud.

Juan Pablo Burbano Guerrero

## AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento especial al Ing. Raúl Haro, quien aparte de ser un excelente tutor fue un amigo en quien confiar, que con su paciencia y dedicación supo transferirme muchos conocimientos fundamentales para el desarrollo del presente trabajo.

Gracias a Componentes Electrónicos, ya que, gracias a ellos y la facilidad de utilizar sus instalaciones para las mediciones, las sugerencias en el proceso de diseño, y todo su conocimiento, infraestructura y equipo, ya que sin ellos hubiese sido muy complicado la culminación exitosa del presente trabajo.

Gracias a mis amigos, que a lo largo de la vida universitaria fueron y son un gran aporte en el desarrollo de todas mis actividades tanto académicas como personales.

Muchas gracias a todos los docentes que fueron parte de mi formación, ya que las bases de los conocimientos fueron una semilla que ahora están germinando.

Infinitas gracias a mi familia, que a pesar de la distancia siempre están pendientes de mí y me brindan palabras de aliento y motivación.

Juan Pablo Burbano Guerrero

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
TABLA DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
<b>CAPITULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1    Antecedentes.....	1
1.2    Trabajos relacionados .....	2
1.3    Objetivos.....	3
1.3.1.    Objetivo General .....	3
1.3.2.    Objetivos Específicos.....	3
1.4    Alcance del proyecto .....	4
<b>CAPITULO II</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO .....</b>	<b>6</b>
2.1    Guías de Onda .....	6
2.2    Modos de Propagación .....	7
2.3    Guía de Onda rectangular.....	8
2.4    Guía de Onda Integrada en Sustrato (SIW).....	10
2.4.1    Estructura general de la Guía de Onda Integrada en Sustrato.....	11
2.4.2    Consideraciones de Diseño .....	12
2.4.3    Ecuaciones de paso de guía de onda tradicional a SIW .....	13
2.5    Divisores de Potencia de 3 puertos.....	14
2.5.1.    Propiedades de los Divisores de tres puertos .....	15
2.5.2.    Características de los Divisores de tres puertos .....	16
2.6    Divisores de Potencia Tipo T Truncado.....	17
2.7    Transición de SIW a microstrip.....	18

<b>CAPITULO III</b>	
<b>MATERIALES</b> .....	21
3.1 Software: CST STUDIO SUITE .....	21
3.2 Software: Matlab .....	23
3.3 Conectores RF tipo SMA ( <i>SubMiniature version A</i> ).....	24
3.4 Sustrato FR-4.....	24
3.5 Sustrato Roger RT/Duroid 5880.....	26
3.6 Analizador Vectorial.....	27
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>DISEÑO, ELABORACIÓN Y RESULTADOS</b> .....	29
4.1 Diagrama de Bloques.....	29
4.2 Consideraciones de Diseño.....	30
4.3 Codos Del Divisor Tipo T .....	31
4.4 Truncamiento Del Divisor Tipo T .....	32
4.5 Consideraciones de Diseño Para Banda X .....	33
4.5.1. Escalamiento para un Divisor de 4 Puertos.....	50
4.5.2. Transición tipo Taper .....	55
4.5.3. Construcción en Sustrato.....	61
4.5.4. Resultados .....	65
4.6 Consideraciones de Diseño Para Banda Ku .....	66
4.6.1. Escalamiento para un Divisor de 8 Puertos.....	73
4.6.2. Transición tipo Taper en 15GHz.....	78
4.6.3. Construcción en Sustrato.....	84
4.6.4. Resultados .....	87
4.7 Consideraciones de Diseño Para Banda K .....	88
4.7.1. Escalamiento para un Divisor de 8 Puertos.....	103
4.7.2. Transición tipo Taper en 18GHz.....	108
4.7.3. Construcción en Sustrato.....	113
4.7.4. Resultados .....	117
<b>CAPITULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	120
5.1 Conclusiones.....	120



5.2	Recomendaciones .....	122
5.3	Trabajos Futuros .....	123
<b>CAPITULO VI</b>		
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>124</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Dimensiones de Guía de Onda Rectangular.....	9
Tabla 2 Requisitos mínimos para instalación de CST Studio Suite .....	21
Tabla 3 Requisitos Mínimos de Instalación de MatLab 2014a .....	23
Tabla 4 Parámetros del Sustrato FR4.....	25
Tabla 5 Parámetros del Sustrato Roger 5880 .....	27
Tabla 6 Parámetros Guía de Onda Rectangular Banda X .....	33
Tabla 7 Parámetros Guía de Onda Rectangular con Sustrato Banda X .....	35
Tabla 8 Parámetros Guía SIW Rectangular Banda X .....	38
Tabla 9 Parámetros Ingresados Para Calcular la Línea Microstrip .....	55
Tabla 10 Valores de Línea Microstrip.....	56
Tabla 11 Parámetros de Guía de Onda Rectangular Tradicional Banda Ku .....	66
Tabla 12 Parámetros de Guía de Onda Rectangular con Sustrato Banda Ku .....	68
Tabla 13 Parámetros de Guía SIW Banda Ku.....	70
Tabla 14 Parámetros de Diseño en el Divisor en banda Ku.....	72
Tabla 15 Parámetros del Sustrato FR4 en transición .....	78
Tabla 16 Parámetros de Transición tipo Taper en 15GHz .....	78
Tabla 17 Parámetros de Guía de Onda Rectangular Tradicional Banda K.....	88
Tabla 18 Parámetros de Guía de Onda Rectangular con Sustrato Banda K .....	90
Tabla 19 Parámetros de Guía SIW Banda K.....	92
Tabla 20. Parámetros del Sustrato Roger 5880 en transición .....	108
Tabla 21. Parámetros de Transición tipo Taper en 18GHz .....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Tipo de Guía de Onda.....	6
Figura 2	Modos de Propagación en Guía de Onda Rectangular .....	7
Figura 3	Guía de Onda Rectangular.....	8
Figura 4	Equivalencia entre SIW y la guía de onda tradicional.....	10
Figura 5	Estructura de SIW .....	11
Figura 6	Medidas Intrínsecas de SIW .....	12
Figura 7	Proceso de Diseño de guía SIW.....	14
Figura 8	Esquema de un divisor de 3 Puertos .....	15
Figura 9	Esquema de Divisor de Potencia .....	17
Figura 10	Divisor de Potencia Tipo T.....	17
Figura 11	Divisor de Potencia Tipo T Truncado.....	18
Figura 12	Vía de Acoplamiento en el Divisor.....	18
Figura 13	Transiciones Microstrip a SIW .....	19
Figura 14	Transición por Conector Coaxial.....	20
Figura 15	Esquema de transición entre guías SIW .....	20
Figura 16	Software CST Studio Suite .....	22
Figura 17	Interfaz de Usuario CST Studio Suite.....	22
Figura 18	MatLab.....	23
Figura 19	Conectores SMA hembra.....	24
Figura 20	Sustrato FR-4.....	25
Figura 21	Sustrato Roger RT/Duroid 5880 .....	27
Figura 22	Analizador Vectorial N9918A .....	28
Figura 23	Diagrama de Bloques del Proceso de Diseño .....	29
Figura 24	Codo de 90° con biselado a 45° .....	32
Figura 25	Truncamiento en SIW .....	32
Figura 26	Guía de Onda Rectangular Banda X.....	34
Figura 27	Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular Banda X.....	34
Figura 28	Guía de Onda Rectangular en Sustrato FR4, Banda X.....	36
Figura 29	Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular con Sustrato Banda X.....	36
Figura 30	Guía SIW Rectangular Banda X.....	38
Figura 31	Parámetros Scattering de la Guía SIW Rectangular Banda X.....	39
Figura 32	Divisor Tipo T SIW Banda X.....	39
Figura 33	Divisor Tipo T SIW 2 Puertos Banda X (1) .....	40
Figura 34	Divisor Tipo T SIW 2 Puertos Banda X (2) .....	40
Figura 35	Parámetros Scattering del Divisor Tipo T Banda X .....	41
Figura 36	Codo a 90° con un biselado a 45° .....	41
Figura 37	Codo de 90° en SIW .....	42
Figura 38	Simulaciones Paramétricas de Codo a 90° .....	42
Figura 39	Parámetro S11 de Codo Optimizado Para Banda X .....	43
Figura 40	Propagación del Campo Eléctrico en el Interior del Codo .....	43

Figura 41	Divisor de Potencia Tipo T con Codos (1) .....	44
Figura 42	Divisor de Potencia Tipo T con Codos (2) .....	44
Figura 43	Parámetros Scattering del Divisor Tipo T Con Codos .....	45
Figura 44	Divisor Tipo T Truncado .....	45
Figura 45	Parámetro Optimizados del Truncamiento en el Divisor Tipo T.....	46
Figura 46	Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 2 Puertos.....	47
Figura 47	Simulaciones Paramétricas de Distancia de Acoplamiento .....	47
Figura 48	Parámetros S11 Optimizados de Distancia de Acoplamiento .....	48
Figura 49	Divisor de Potencia Tipo T Truncado Optimizado.....	48
Figura 50	Propagación de Campo Eléctrico en el Divisor de Potencia Tipo T Truncado Optimizado.....	49
Figura 51	Parámetros Scattering del Divisor de Potencia Tipo T Truncado .....	49
Figura 52	Divisor de Potencia Tipo T Truncado de longitud Lambda medios.....	50
Figura 53	Divisor de Potencia Tipo T Truncado de longitud Lambda (1).....	51
Figura 54	Divisor de Potencia Tipo T Truncado de longitud Lambda (2).....	51
Figura 55	Parámetros Scattering del Divisor de Potencia Tipo T Truncado de Longitud Lambda .....	52
Figura 56	Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas (1).....	52
Figura 57	Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas (2).....	53
Figura 58	Propagación del Campo Eléctrico en el Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas.....	53
Figura 59	Parámetros Scattering en el Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas .....	54
Figura 60	Línea Microstrip .....	55
Figura 61	Transición Tipo Taper .....	56
Figura 62	Transición Tipo Taper Aplicada a una Guía SIW .....	57
Figura 63	Parámetros Scattering en Transición Tipo Taper en una Guía SIW .....	57
Figura 64	Impedancia en los Puertos de Entrada y Salida .....	58
Figura 65	Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas con Transiciones (1) .....	58
Figura 66	Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas con Transiciones (2) .....	59
Figura 67	Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas con Transiciones .....	59
Figura 68	Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas con Transiciones.....	60
Figura 69	Comparación de Resultados Con Transición y Sin Transición .....	61
Figura 70	Divisor de Potencia Tipo T Truncado Vista Posterior.....	62
Figura 71	Divisor de Potencia Tipo T Truncado Vista Anterior.....	62
Figura 72	Comparación de Resultados en Parámetro S11 Simulados vs Medido .....	63
Figura 73	Comparación de Resultados en los Puertos de Salida Simulados vs Medido a la Salida .....	64
Figura 74	Fases de Los Puertos de Salida Medidos .....	64
Figura 75	Fases de Los Puertos de Salida Simulados .....	65

Figura 76	Guía de Onda Rectangular Banda Ku.....	67
Figura 77	Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular en Banda Ku .....	67
Figura 78	Guía SIW Rectangular con Sustrato en Banda Ku .....	68
Figura 79	Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular con Sustrato en Banda Ku .....	69
Figura 80	Guía de Onda en SIW para Banda Ku .....	71
Figura 81	Parámetros Scattering de Guía SIW Banda Ku .....	71
Figura 82	Divisor de Potencia Tipo T Truncado en banda Ku .....	72
Figura 83	Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncado .....	72
Figura 84	Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncado.....	73
Figura 85	Divisor de Potencia de longitud Lambda Medios.....	74
Figura 86	Divisor de Potencia de longitud Lambda.....	74
Figura 87	Parámetros Scattering de Divisor de Potencia de Longitud 3 Lambda Medios .....	75
Figura 88	Divisor de Potencia de longitud 5 Lambda Medios.....	75
Figura 89	Parámetros Scattering de Divisor de Potencia de longitud 5 Lambda Medios.....	76
Figura 90	Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas .....	76
Figura 91	Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en 3D.....	77
Figura 92	Parámetros Scattering de Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas .....	77
Figura 93	Transición tipo Taper en banda Ku.....	79
Figura 94	Transición en SIW Banda Ku .....	79
Figura 95	Parámetros Scattering de guía SIW con transición.....	80
Figura 96	Impedancia de Guía SIW con Transición Banda Ku .....	80
Figura 97	Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda Ku.....	81
Figura 98	Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda Ku en 3D.....	81
Figura 99	Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda Ku.....	82
Figura 100	Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K .....	82
Figura 101	Comparación de Resultados Con Transición y Sin Transición Banda K .....	83
Figura 102	Divisor Tipo T Truncado de 8 Salidas Implementado Vista Posterior.....	84
Figura 103	Divisor Tipo T Truncado de 8 Salidas Implementado Vista Anterior.....	84
Figura 104	Comparación de Resultados en Parámetros S11 Simulado vs Medido en Banda Ku .....	85
Figura 105	Comparación de Resultados en los Puertos de Salida Simulado vs Medido en Banda Ku .....	86
Figura 106	Fases en Los Puertos de Salida Medidos .....	86
Figura 107	Guía SIW Rectangular Banda K.....	88
Figura 108	Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular en Banda K .....	89
Figura 109	Guía SIW Rectangular con Sustrato en Banda K .....	90
Figura 110	Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular con Sustrato en Banda K.....	90
Figura 111	Guía de Onda en SIW para Banda K .....	92

Figura 112	Parámetros Scattering de Guía SIW Banda K .....	93
Figura 113	Divisor de Potencia Tipo T Banda K (1) .....	93
Figura 114	Divisor de Potencia Tipo T Banda K (2) .....	94
Figura 115	Parámetros Scattering de Divisor de Potencia Tipo T Banda K.....	94
Figura 116	Diseño de Codo a 90° .....	95
Figura 117	Codo a 90° en 3D.....	95
Figura 118	Simulaciones Paramétricas de Codo en Banda K.....	95
Figura 119	Optimización de Medida de Codo en Banda K .....	96
Figura 120	Propagación de Campo Eléctrico en Codo a 90° .....	96
Figura 121	Divisor de Potencia Tipo T con codos y Biselados .....	97
Figura 122	Divisor de Potencia Tipo T con codos y Biselados en 3D.....	97
Figura 123	Parámetros Scattering de Divisor de Potencia Tipo T con codos y Biselados .....	98
Figura 124	Truncamiento en Divisor de Potencia Tipo T.....	98
Figura 125	Parámetros Scattering del Truncamiento del Divisor de Potencia tipo T en banda K.....	99
Figura 126	Distancia de Acoplamiento en Divisor de Potencia Tipo T.....	100
Figura 127	Simulaciones Paramétricas de Distancia de Acoplamiento .....	100
Figura 128	Optimización de la Distancia de Acoplamiento .....	101
Figura 129	Divisor de Potencia Tipo T Truncado en banda K .....	101
Figura 130	Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncado .....	102
Figura 131	Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncado.....	102
Figura 132	Divisor de Potencia de longitud Lambda Medios.....	103
Figura 133	Divisor de Potencia de longitud Lambda.....	103
Figura 134	Parámetros Scattering de Divisor de Potencia de longitud Lambda.....	104
Figura 135	Divisor de Potencia de longitud 5 Lambda Medios.....	104
Figura 136	Parámetros Scattering de Divisor de Potencia de longitud 5 Lambda Medios.....	105
Figura 137	Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas .....	106
Figura 138	Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en 3D.....	106
Figura 139	Parámetros Scattering de Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas .....	107
Figura 140	Transición tipo Taper en banda K.....	108
Figura 141	Transición en SIW Banda K .....	109
Figura 142	Parámetros Scattering de guía SIW con transición.....	109
Figura 143	Impedancia de Guía SIW con Transición .....	110
Figura 144	Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K.....	110
Figura 145	Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K en 3D.....	111
Figura 146	Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K.....	111
Figura 147	Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K .....	112
Figura 148	Comparación de Resultados Con Transición y Sin Transición Banda K .....	113
Figura 149	Divisor Tipo T Truncado de 8 Salidas Implementado Vista Posterior.....	114

Figura 150	Divisor Tipo T Truncado de 8 Salidas Implementado Vista Frontal.....	114
Figura 151	Comparación de Resultados en Parámetros S11 Simulado vs Medido en Banda K115	
Figura 152	Comparación de Resultados en los Puertos de Salida Simulado vs Medido en Banda K.....	116
Figura 153	Fases en Los Puertos de Salida Medidos .....	116

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad emplear la tecnología SIW (*Substrate Integrated Waveguide*) para realizar diseños de divisores de potencia tipo T truncada para las bandas *X* y *Ku*, teniendo en cuenta que, con la tecnología SIW se dispone de herramientas para lograr diseños pequeños, baratos y fáciles de construir, remplazando en gran parte a la guía de onda tradicional, que en las comunicaciones satelitales representa un problema por el peso y las grandes dimensiones que se utiliza, de igual manera en las comunicaciones de microonda. La parte fundamental para realizar el diseño en la tecnología SIW es el software electromagnético *CST STUDIO SUITE*, el cual servirá para la simulación, comprobación y posterior implementación, permitiendo una optimización en materiales, incrementando sus prestaciones y disminuyendo su costo. Un factor importante para realizar el diseño en SIW son las transiciones, las cuales logran un acoplamiento de impedancias correcto entre el divisor de potencia tipo T truncada en SIW y la estructura a conectar (Microstrip, conectores SMA, generadores, analizadores vectoriales, etc.), siendo esta impedancia de 50 ohms. Al finalizar el proyecto se espera obtener la implementación de 2 redes de divisores de potencia tipo T truncada, trabajando en las bandas *X* y *Ku*, con cuatro y ocho salidas respectivamente, las cuales serán implementadas, probadas y verificadas, haciendo un análisis teórico y práctico, el cual comparará los resultados obtenidos analíticamente, y experimentalmente con las simulaciones realizadas.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **SIW (*Substrate Integrated Waveguide*)**
- **MICROSTRIP**
- **GUÍA DE ONDA**
- **DIVISOR DE TRES PUERTOS**
- **PARÁMETROS S**
- **TRANSICIONES Y ACOPLAMIENTOS**



## ABSTRACT

The purpose of this project is to use the SIW (Substrate Integrated Waveguide) technology to design truncated T-type power dividers for the  $X$  and  $Ku$  bands, bearing in mind that, with SIW technology, tools are available to achieve small designs, cheap and easy to build, replacing to a large extent the traditional waveguide, which in satellite communications represents a problem due to the weight and the large dimensions used, likewise in microwave communications. The fundamental part for designing the SIW technology is the CST STUDIO SUITE electromagnetic software, which will be used for simulation, verification and subsequent implementation, allowing optimization of materials, increasing their performance and reducing their cost. An important factor to perform the design in SIW are the transitions, which achieve a correct impedance coupling between the T-type power divider truncated in SIW and the structure to be connected (Microstrip, SMA connectors, generators, vector analyzers, etc.), this impedance being 50 ohms. At the end of the project it is expected to obtain the implementation of 2 networks of truncated T-type power dividers, working in the  $X$  and  $Ku$  bands, with four and eight outputs respectively, which will be implemented, tested and verified, making a theoretical and practical analysis, which will compare the results obtained analytically, and experimentally with the simulations performed.

### KEYWORDS:

- **SIW (Substrate Integrated Waveguide)**
- **MICROSTRIP**
- **WAVEGUIDE**
- **THREE PORTS DIVIDER**
- **PARAMETERS S**
- **TRANSITIONS AND COUPLINGS**

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Antecedentes

En un mundo cada vez más intercomunicado y buscando la interacción entre el hombre y la sociedad, las microondas juegan un rol muy importante, gracias a ellas es posible la localización de objetos, las comunicaciones móviles, comunicaciones satelitales, uso militar, médico, medioambiental, etc. Para estas señales cuya longitud de onda oscila entre 1m y 1mm, la teoría clásica de los circuitos no es viable para la resolución de problemas en redes de microonda, es por esta razón que se utiliza las ecuaciones de Maxwell para caracterizar su comportamiento, complicando la parte del cálculo matemático, pero aportando muchas ventajas entre las que podemos destacar, el mayor ancho de banda en altas frecuencias, mayor ganancias en las antenas, diferentes resonancias en frecuencias de microonda, por lo que este tipo de ondas es ampliamente utilizado en diagnóstico y tratamiento médico (Pascual Garcia, 2012).

La tecnología SIW, utilizada por primera vez en 1994, consiste en la geometría de dos filas de cilindros metalizados integrados en un sustrato, creando así una especie de guía de onda metálica la cual en su interior está llena de material dieléctrico y construida con tecnología planar, muy similar a tecnologías antiguas como microstrip y coplanar, razón por la cual facilita la integración de otros circuitos con líneas de transmisión. (Pascual Garcia, 2012)

Actualmente los divisores de potencia son utilizados en radiofrecuencia (RF), microondas (MW), comunicaciones ópticas, etc. para enviar potencia a varios dispositivos de manera simultánea, manteniendo así las impedancias acopladas a fin de tener un bajo nivel de potencia reflejada en los dispositivos a conectar.

El utilizar tecnología SIW para la implementación de los divisores de potencia tipo T truncada, es asegurar las ondas dentro de las paredes conductoras y que viajan en el sustrato dieléctrico sean

reflejadas en su totalidad, teniendo así escasas pérdidas por conductor y una muy buena transmisión, la tecnología SIW fue desarrollada para trabajar en altas frecuencias por lo que los tamaños de los diseños a implementar son reducidos, fáciles de modelar e integrar.

El divisor de potencia tipo T truncada es muy común en equipos de comunicaciones, ya que éste divisor es recíproco, con bajas pérdidas y por lo tanto con uno de sus tres puertos desadaptados. La fabricación de este tipo de divisor se lo realiza en tecnología coaxial, guía de onda y la más común microstrip. El diseño del divisor de potencia se lo optimizará con dos objetivos en los Parámetros *Scattering*, el minimizar el coeficiente de reflexión de la tensión del puerto de entrada ( $S_{11}$ ) y mantener la ganancia de tensión directa ( $S_{12}$  y  $S_{13}$ ) cerca de -3dB, esto se lo realizará calculando el ancho efectivo en la salida del sustrato SIW, la que depende de la permitividad relativa del sustrato y la frecuencia a trabajar. (Xinyu Xu, 2005)

Una de las formas más prácticas de realizar una transición de SIW a microstrip es la forma *taper* la cual dependiendo de las medidas y frecuencia de trabajo, tendrá un adecuado acoplamiento de impedancia (D. Navarro, 2001).

## 1.2 Trabajos relacionados

Algunos investigadores han utilizado en los últimos años la tecnología SIW para la construcción de diferentes dispositivos, entre los más utilizados están los divisores de potencia.

De acuerdo con (Xinyu Xu, 2005), demostró en su trabajo la conversión de una guía de onda tradicional, a su equivalente en SIW, en primera instancia haciendo una guía de onda con Sustrato en su medio de propagación, y posterior, el paso a su equivalente en SIW, concluyendo en su investigación que esta tecnología es atractiva debido a las bajas pérdidas y su bajo costo económico. Tiene una fácil integración con las ondas milimétricas usadas en la transmisión microonda. Termina su investigación creando un divisor de 6 puertos, creando 3 divisores de 2 puertos para luego hacer un escalamiento al divisor final.

En la investigación de (Rahali Boucha, 2014) se diseñó divisores de potencia tipo *T* y tipo *Y*, obteniendo en sus respectivas salidas valores próximos a los -3.17dB y -3.34dB, que son valores

muy ideales para la media potencia. Para mejorar la propagación dentro del divisor, insertaron una vía metálica en un punto intermedio de los puertos de salida del divisor, haciendo que los valores lleguen a resultados óptimos a los iniciales, esta es una consideración que se toma en cuenta en este trabajo con el objetivo de mejorar los resultados.

Una parte primordial en SIW, son las transiciones, las cuales permiten acoplar la impedancia del diseño en SIW a otros dispositivos o instrumentos de medición, es por eso que (D. Navarro, 2001) se enfoca en diversas formas de realizar las transiciones, haciendo estas, mediante línea microstrip, la cual es adecuada para excitar la guía de onda, ya que en las dos estructuras los campos eléctricos están orientados en la misma dirección, y comparten el mismo perfil. Otra forma de realizar la transición es mediante coaxial, encontrando la desventaja de que existe más pérdidas. Y por último realiza un acoplo por ranura, el cual consiste en conectar dos guías de SIW mediante una ranura situada entre dos caras adyacentes de las guías. Concluyendo en su trabajo que la tecnología SIW presenta grandes ventajas en la construcción y facilidades en el diseño de varios prototipos de dispositivos, a la vez encuentra que la transición por microstrip es ideal para dispositivos en altas frecuencias, reduciendo las pérdidas y aprovechando mejor el espacio en el diseño.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Diseñar e Implementar una Red de Divisores de Potencia Tipo T truncada de 4, y 8 salidas para banda  $X$  y  $Ku$  respectivamente, en la tecnología *Substrate Integrated Waveguide (SIW)*.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Estudiar los divisores de potencia tipo T, sus parámetros *Scattering* y características especiales.
- Realizar el diseño de los divisores de potencia tipo T truncada, a frecuencias en banda  $X$  y  $Ku$  en el programa de simulación electromagnética *CST STUDIO SUITE*.

- Implementar los divisores de potencia tipo T truncada, diseñado en tecnología de sustrato de guía de onda (SIW).
- Realizar pruebas de los divisores de potencia tipo T truncada para determinar el ancho de banda del prototipo, analizar los valores que se obtienen en la simulación y compararlos con las mediciones.

#### **1.4 Alcance del proyecto**

Para el desarrollo del proyecto se realizará el diseño de una red de divisores de potencia tipo T truncada, con su potencia de salida distribuida uniformemente. Para lo cual, se calculará las dimensiones de los parámetros intrínsecos de los diseños en SIW de acuerdo a la frecuencia en las bandas  $X$  y  $Ku$ , se realizará la optimización del diseño y construcción en tecnología SIW con un costo de fabricación reducido, así como un tamaño y peso simplificado. Se iniciará diseñando una guía de onda rectangular, de la que obtendremos parámetros iniciales indispensables para la transición de guía de onda rectangular a SIW.

Para el diseño en SIW es necesario tener en consideración medidas intrínsecas a dicha tecnología como son: El grosor del sustrato, la distancia entre los orificios metalizados, el diámetro de los orificios y el ancho efectivo de la guía de onda.

Teniendo de base la guía de onda rectangular se procede a realizar el diseño de un divisor de potencia tipo T truncada de una entrada y dos salidas, con la ayuda del software de análisis electromagnético, verificando que el diseño cumpla los parámetros impuestos de impedancias, distribución de potencias, parámetros *Scattering*, etc. una vez comprobado y verificado en simulación se procederá a escalar el diseño, realizando el estudio, diseño y posterior simulación de divisores para cuatro, y ocho salidas.

A partir de los resultados obtenidos en los diseños simulados e implementados se redactará las conclusiones, comparación de resultados y recomendaciones que se hayan presentado en el presente proyecto de investigación. Adicionalmente, se expondrán posibles trabajos futuros que

sirvan de aporte para complementar el proyecto y manejo de la tecnología de guía de onda integrada en sustrato SIW.

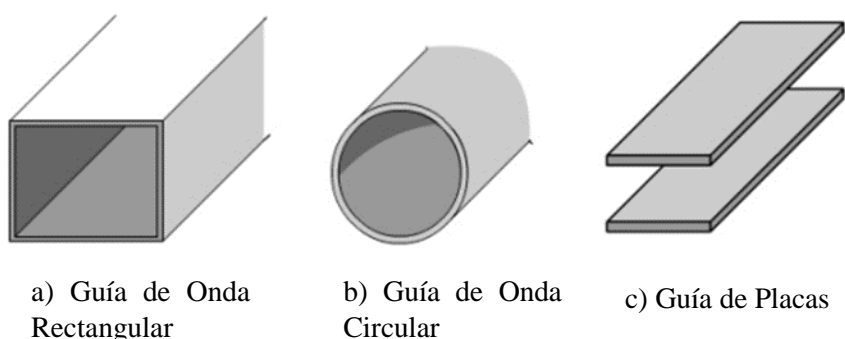
## CAPITULO II

### DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

En el presente capítulo se estudia las características de guía de onda, modos de propagación, tecnología SIW, divisores de potencia, y transiciones de SIW a microstrip las cuales se utilizarán en la implementación de los dispositivos.

#### 2.1 Guías de Onda

Las guías de onda son parte de la familia de las líneas de transmisión, son compuestas por un conductor que cubre a un material dieléctrico, generalmente de sección transversal rectangular, circular o guía de placas como se muestra en la Figura 1. En su interior se propagan las ondas electromagnéticas, la conducción de energía no ocurre en las paredes de la guía de onda, sino en el dieléctrico que está en el interior de la guía. Son ampliamente utilizadas en aplicaciones de alta y media frecuencia, alta potencia y bajas pérdidas ya que las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse. Los campos eléctricos y magnéticos están separados en la guía de onda, produciendo perdidas nulas por radiación, las perdidas por dieléctrico son bajas ya que el dieléctrico generalmente es aire. (Rodríguez, 2013)



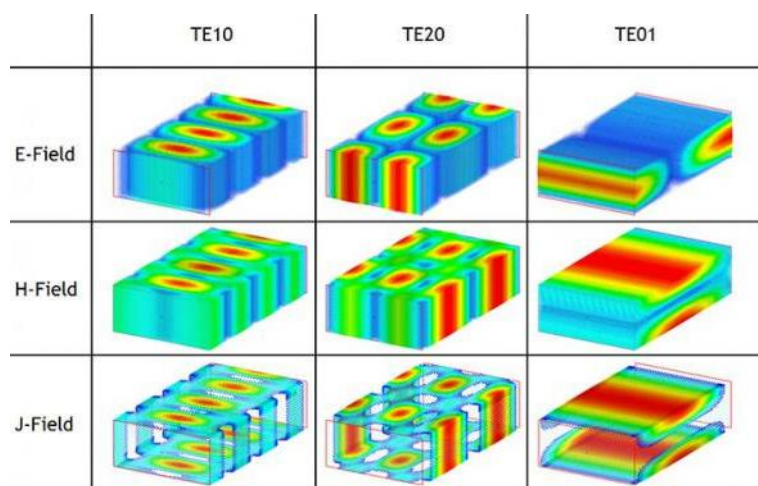
**Figura 1 Tipo de Guía de Onda**

Fuente: (García, 2008)

## 2.2 Modos de Propagación

Por medio de la resolución de las ecuaciones de Maxwell, en la guía de onda da lugar a varias soluciones las cuales se clasifican en función de los componentes vectoriales de campo eléctrico y magnético. Así, se clasifican en:

- Modo Transversal Eléctrico (TE). El campo eléctrico es perpendicular a la dirección de propagación Z. Estas soluciones no tienen ninguna componente longitudinal eléctrica,  $E_z = 0$ .
- Modo Transversal Magnético (TM). El campo magnético es perpendicular a la dirección de propagación Z.
- Modo Transversal Electromagnético (TEM). Las componentes del campo eléctrico como del magnético en la dirección de propagación son nulos. Este modo no existe en la guía de onda, ya que se genera cuando hay dos conductores.



**Figura 2 Modos de Propagación en Guía de Onda Rectangular**

Fuente: (electro111306, 2016)

Dichos modos de propagación se producen en función de las características geométricas, frecuencia de trabajo y frecuencia de corte de los distintos modos los cuales podemos observar en la Figura 2. Estos modos de propagación se presentan uno o varios a la vez, dependiendo de la

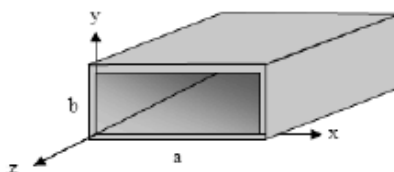


frecuencia de corte en cada modo, esta debe estar por debajo de la frecuencia de trabajo del dispositivo, también, depende de la geometría que presenta la guía de onda. Los modos evanescentes o en corte, son aquellos que tienen la frecuencia de corte por encima de la frecuencia de trabajo, por lo que se atenúan rápidamente. (Pascual Garcia, 2012).

Dada la geometría de la guía SIW, solo acepta modos de propagación TE ya que, por la geometría, el alto del sustrato no se lo puede modificar. El modo transversal magnético no puede ser guiado, debido a que cuando el modo de propagación se establece, se generan corrientes superficiales, y debido a los orificios metalizados, cortan estas líneas de corrientes, generando así gran cantidad de radiación. Para el modo TE, este flujo de corrientes tiene la misma dirección a los orificios, por lo que no cortan ningún flujo y por lo tanto no afecta al modo de transmisión.

### 2.3 Guía de Onda rectangular

Generalmente las guías de onda son fabricadas de cobre o aluminio, en su interior se encuentra aire, o un dieléctrico por el cual la onda se propagará.



**Figura 3 Guía de Onda Rectangular**

Fuente: (Pasternack, 2017)

En la Figura 3 se aprecia las medidas típicas de una onda rectangular:

- El ancho de la guía de onda, representada por “a”; la cual depende de la frecuencia de trabajo en la que está diseñada la guía de onda en su modo de propagación dominante.
- La altura de la guía de onda, representada por “b”; esta depende de los modos de propagación que serán incluidos y aceptados en el diseño.

Estas dimensiones ya están preestablecidas en formatos estándar como se observa en la Tabla 1, desde WR-430 hasta WR-28, cubriendo las frecuencias desde 1.7GHz a 40GHz. Al trabajar con un rango amplio en frecuencias, la dimensión de la guía de onda rectangular también es amplio, el término “WR-xxx”, significa “guía de onda rectangular” y su número indica la dimensión del ancho interior de la guía de onda en céntimas de pulgada. (Pasternack, 2017). En la Tabla 1 se observa el estándar característico de la guía de onda rectangular, con respecto a su banda de frecuencia.

**Tabla 1**  
**Dimensiones de Guía de Onda Rectangular**

Banda de Frecuencia	Estandar de Guia de Onda Rectangular	Límites de Frecuencia (GHz)	Dimensiones (mm)
Banda R	WR-430	1.7 a 2.6	109.22 x 54.61
Banda D	WR-340	2.20 a 3.30	86.36 x 43.18
Banda S	WR-284	2.60 a 3.95	72.136 x 34.036
Banda E	WR-229	3.30 a 4.90	58.166 x 29.21
Banda G	WR-187	3.95 a 5.85	47.5488 x 22.1488
Banda F	WR-159	4.90 a 7.05	40.386 x 20.193
Banda C	WR-137	5.85 a 8.20	34.8488 x 15.7988
Banda H	WR-112	7.05 a 10.00	28.4988 x 12.6238
Banda X	WR-90	8.2 a 12.4	22.86 x 10.16
Banda X-Ku	WR-75	10.0 a 15.0	19.05 x 9.525
Banda Ku	WR-62	12.4 a 18.0	15.7988 x 7.8994
Banda K	WR-51	15.0 a 22.0	12.954 x 6.477
Banda K	WR-42	18.0 a 26.5	10.668 x 4.318
Banda Ka	WR-28	26.5 a 40.0	7.112 x 3.556
Banda Q	WR-22	33 a 50	5.6896 x 2.8448
Banda U	WR-19	40 a 60	4.7752 x 2.3876
Banda V	WR-15	50 a 75	3.7592 x 1.8796
Banda E	WR-12	60 a 90	3.0988 x 1.5494
Banda W	WR-10	75 a 100	2.54 x 1.27

Fuente: (Anónimo, 2017)

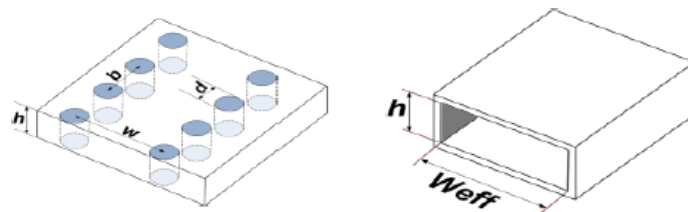
En la presente investigación se ocupa el estandar WR-90 para el diseño en banda X, y el WR-62 para la banda Ku.

## 2.4 Guía de Onda Integrada en Sustrato (SIW)

En la guía de onda rectangular tradicional, las ondas se propagan dentro de ella, y al contener un dieléctrico, generalmente aire, las pérdidas son mínimas, pero con la desventaja de la integración con otro medio, por tamaño y peso. Ya que requieren de procesos mecánicos y de mucha precisión, lo cual es un obstáculo difícil de superar para una producción en masa para microonda. (D. Navarro, 2001)

La tecnología *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) consiste en agrupar una guía de onda, dentro de un sustrato dieléctrico; generalmente se lo logra creando paredes eléctricas artificiales utilizando vías metalizadas. Dicha estructura da como resultado una guía de onda planar, en la que las ondas se concentran dentro de dichas paredes y viajan por el material dieléctrico. Permitiendo así el diseño e implementación de guías para microonda y ondas milimétricas. Obteniendo, una amplia gama de diseños a realizar, como son: resonadores, diplexores, filtros, divisores, osciladores, acopladores direccionales, antenas y varios circuitos usando una técnica de bajo costo, escalable y adaptable hacia otras técnicas de construcción mediante técnicas de transiciones eficientes de banda ancha entre la nueva guía y los circuitos integrados planares.

Para la construcción de la guía SIW, se colocan dos filas de agujeros metalizados en el sustrato, como se muestra en la Figura 4. Los parámetros a considerar en la guía SIW son: el diámetro de los agujeros “ $d$ ”, el espacio entre ellos “ $b$ ” y la separación entre las filas “ $w$ ”.



**Figura 4 Equivalencia entre SIW y la guía de onda tradicional**

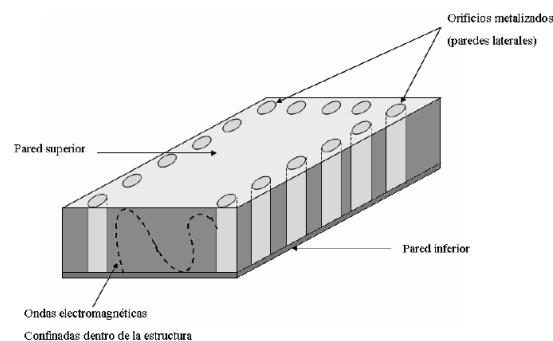
Fuente: (D. Navarro, 2001)

### 2.4.1 Estructura general de la Guía de Onda Integrada en Sustrato

La tecnología SIW y la microstrip tienen muchas características en común, por lo que los componentes son muy parecidos a ellos, entre las cuales tenemos:

- Un Sustrato dieléctrico.
- Un plano de tierra.
- Línea Conductor.
- Orificios Metalizados.

El plano de tierra es la pared inferior de la guía de onda, la pared superior, es la placa conductora, y los orificios metalizados cumplen el papel de las paredes laterales de la guía de onda. En la Figura 5, se identifica los componentes de la Guía SIW, y la onda electromagnética viajando dentro de la estructura SIW.



**Figura 5 Estructura de SIW**

Fuente: (García, 2008)

Las medidas intrínsecas para el diseño de SIW son (ver Figura 5):

- El grosor del sustrato ( $h$ ).

Para el óptimo desempeño del diseño en SIW se busca un sustrato delgado y con permitividad eléctrica alta, para que las ondas sean guiadas. A la vez que soporte la banda de frecuencias a diseñar.

- La distancia entre orificios metalizados ( $s$ ).

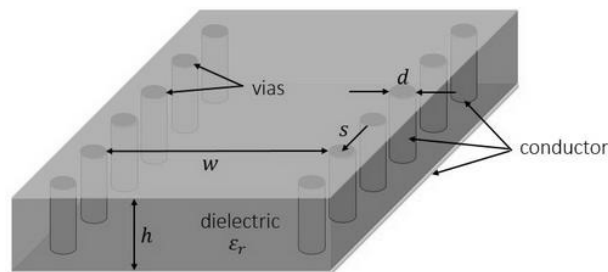
Es una medida muy importante, ya que las vías actúan como paredes laterales en una guía de onda tradicional, si esta distancia es muy grande, causaría pérdidas, las cuales no permiten el correcto trabajo de la guía SIW.

- El diámetro de los orificios ( $d$ )

Se debe mantener un diámetro reducido, lo cual permite el adecuado funcionamiento, a la vez que es más fácil y práctico trabajar con orificios de diámetro reducido.

- El ancho de la guía de onda ( $w$ )

Es la distancia entre los centros de las dos vías de orificios metalizados, esta varía de acuerdo a la frecuencia de corte en la guía de onda.



**Figura 6 Medidas Intrínsecas de SIW**

Fuente: (Pascual Garcia, 2012)

#### 2.4.2 Consideraciones de Diseño

La tecnología SIW idealmente tiene el mismo funcionamiento que una guía de onda rectangular tradicional, por lo que se puede aplicar los mismos procedimientos de diseño, adicionalmente, considerando los parámetros intrínsecos de la tecnología SIW, se inicia el diseño tomando en cuenta las siguientes recomendaciones en dichos parámetros:

- La distancia entre los orificios metalizados  $b$ , debe ser escogida bajo la siguiente regla de diseño:

$$b \leq 2d \quad (1)$$

Esta consideración está en función del diámetro de los orificios metalizados  $d$ , que también debe ser una medida controlada, esta medida depende de la longitud de onda en la guía  $\lambda_g$  para lograr un diámetro lo suficientemente pequeño.

$$d < \frac{\lambda_g}{5} \quad (2)$$

Las consideraciones de diseño no son aplicables en todos los diseños de SIW y no son siempre necesarias, ya que se puede diseñar guías SIW que no cumplan estas especificaciones, las consideraciones funcionan como parámetros para asegurar que disminuyan las pérdidas de potencia.

### 2.4.3 Ecuaciones de paso de guía de onda tradicional a SIW

El proceso de diseño en una guía de onda rectangular tradicional ya está simplificado por medio de los estándares WR, indicados en la Tabla 1. Los parámetros que indica dicho estándar son el ancho y el alto de la guía de onda rectangular, el cual depende de la banda de frecuencia, modos de propagación y la frecuencia de corte asignada.

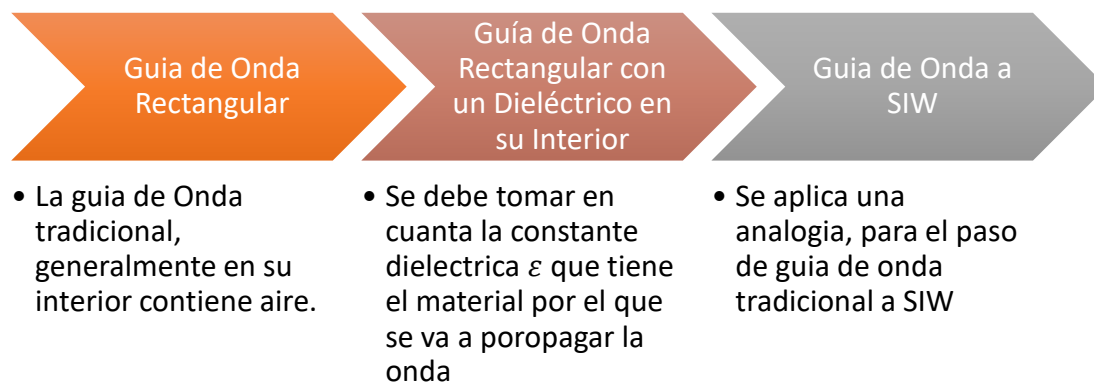
Estos valores son muy útiles para el proceso de paso a la tecnología SIW, ya que son el punto de partida para realizar el diseño, es por eso que se utiliza una analogía, donde el ancho equivalente  $W_{eff}$  de la guía de onda rectangular viene dado por la expresión 3: (D. Navarro, 2001)

$$W_{eff} = W_{siw} - \frac{d^2}{0.95 * b} \quad (3)$$

La aplicación de la fórmula 1, 2, y 3, permiten modelar el diseño de una guía SIW, partiendo de una guía de onda tradicional, cabe tomar en cuenta que:

- $W_{\text{eff}}$  Ancho de la guía de onda tradicional
- $W_{\text{siw}}$  Ancho de la guía SIW
- $d$  Diámetro de los orificios metalizados
- $b$  Distancia de entre orificios metalizados

A continuación, el diagrama de la Figura 7 muestra en resumen el procedimiento para realizar la guía de onda SIW.

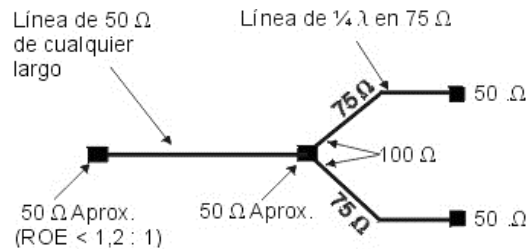


**Figura 7 Proceso de Diseño de guía SIW**

Fuente: Autor

## 2.5 Divisores de Potencia de 3 puertos

En el mercado actual, se encuentran divisores de potencia de tres puertos en tipo T y tipo Y, que son ampliamente utilizados en aplicaciones en las que se necesita de potencias homogéneas para un sistema, ver Figura 8. (Smith, 2010).



**Figura 8 Esquema de un divisor de 3 Puertos**

Fuente: (Smith, 2010)

Como parte inicial de la investigación, se procederá a diseñar y simular un divisor tipo T de 2 salidas, el cual se comprobará y optimizará para que en sus puertos de salida se logre la media potencia (-3dB), sin pérdidas y en fases iguales. Los diseños finales de 4 y 8 salidas, se basarán en el divisor de 2 salidas, conectando y agrupando en cascada varios de estos divisores iniciales.

### 2.5.1. Propiedades de los Divisores de tres puertos

Para la representación de los elementos existentes en un divisor, se utiliza la matriz de *Scattering*, los valores característicos de esta matriz dependen directamente de las propiedades del divisor, en el caso de un divisor de tres puertos, tiene una entrada y dos salidas, la matriz *Scattering* tiene la siguiente representación

$$|S| = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

En el texto publicado por (Pozar, 2012) menciona que “Un dispositivo se considera pasivo siempre y cuando no contenga materiales anisotrópicos, entonces se lo llama recíproco y su matriz *Scattering* es simétrica por lo cual  $S_{ij} = S_{ji}$ ”. Además, se considera  $S_{ii} = 0$  si todos sus puertos están adaptados.

Tomando en cuenta la consideración indicada previamente y siendo un sistema recíproco, la matriz *Scattering* correspondiente al divisor de tres puertos sería la siguiente:



$$|S| = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & 0 & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Al utilizar esta matriz, el cálculo para el diseño de un divisor de potencia se vuelve más sencillo ya que en la diagonal de la matriz todos sus elementos son 0, a su vez que el divisor no presenta pérdidas y dos de sus puertos deben ser acoplados.

Con esta matriz se facilitan los cálculos en el diseño de divisores de potencia, además si el divisor de potencia no presenta pérdidas y se toma en cuenta que dos de los tres elementos deben ser iguales para lo cual (Pojar, 2012) recomiendan los siguientes postulados.

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1 \quad (6a)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 \quad (6b)$$

$$|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 \quad (6c)$$

$$S_{13}^* S_{23} = 0 \quad (6d)$$

$$S_{23}^* S_{12} = 0 \quad (6e)$$

$$S_{12}^* S_{13} = 0 \quad (6f)$$

Al analizar estas consideraciones, se observa que un divisor de potencia de tres puertos no puede ser simultáneamente recíproco, sin pérdidas y tener los puertos adaptados entre sí. Lo cual es una consideración muy importante al momento del diseño.

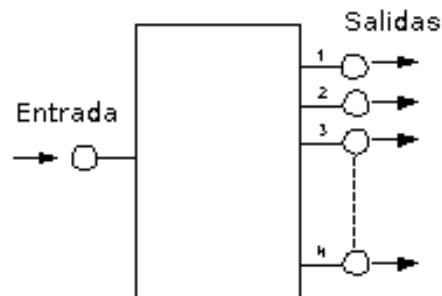
### 2.5.2. Características de los Divisores de tres puertos

Un divisor de potencia tipo T básicamente está formado por 3 guías de onda idénticas, orientadas horizontal y verticalmente para así formar una T. Para contrarrestar las pérdidas por reflexión (Coenen, 2010), en el puerto de entrada se añade una vía de cilindro metálico a una distancia de acoplamiento considerable del puerto, para una posterior optimización de dicha distancia, hasta lograr el mínimo de pérdidas de reflexión, obteniendo así en el parámetro S11 un

valor por bajo los -20 dB, y los parámetros S12 y S13 el valor correspondiente al número de puertos de salidas que tenga dicho divisor, el que se lo calcula con la siguiente formula. (Boucha, 2013)

$$\text{dB} = -10 * \log N \quad (7)$$

N: Numero de Puertos de Salida



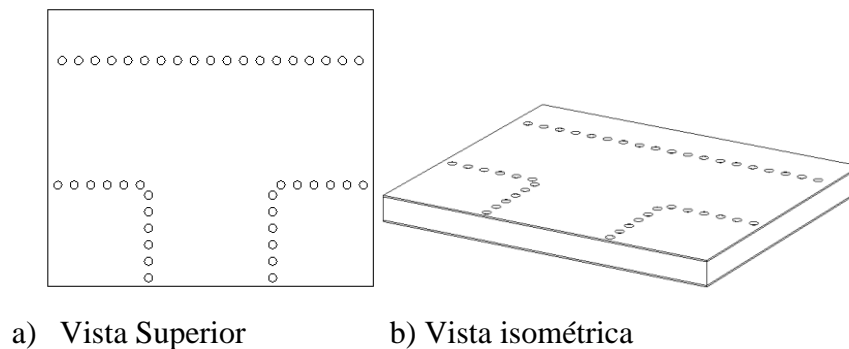
**Figura 9 Esquema de Divisor de Potencia**

Fuente: (Wikipedia, s.f.)

Con estas consideraciones básicas, se logra un divisor de potencia tipo T, consiguiendo dividir de igual forma la onda de entrada, a los puertos de salida.

## 2.6 Divisores de Potencia Tipo T Truncado

El divisor de Potencia tipo T se compone de dos ramas de igual longitud, las cuales conectan un puerto de entrada con dos puertos de salida, como se indica en la Figura 10.



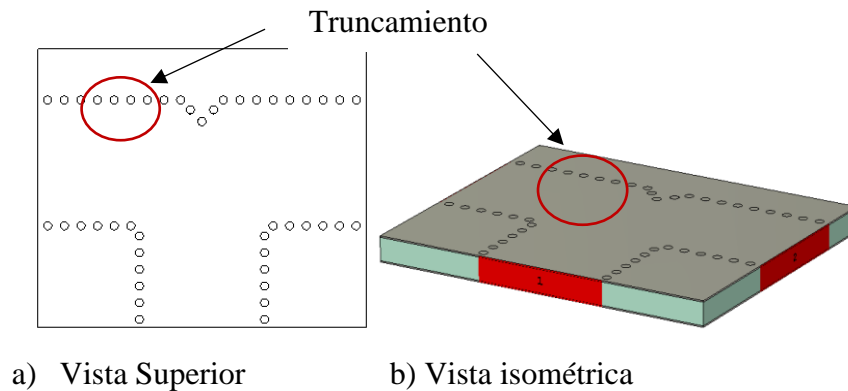
a) Vista Superior

b) Vista isométrica

**Figura 10 Divisor de Potencia Tipo T**

Fuente: Autor

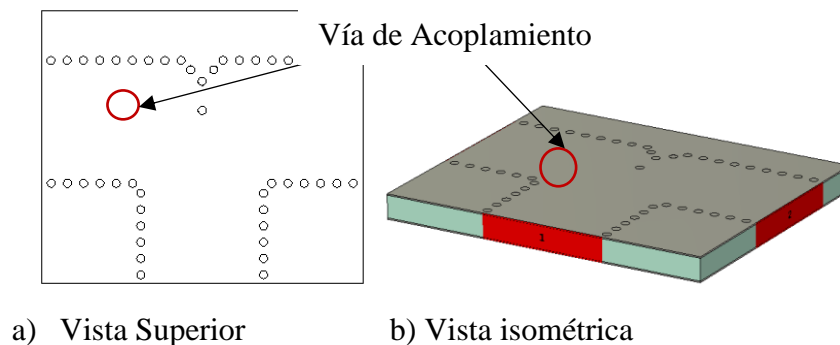
Un truncamiento, como indica la Figura 11, en el divisor de potencia tipo T permite una distribución homogénea en la onda de entrada.



**Figura 11 Divisor de Potencia Tipo T Truncado**

Fuente: Autor

Adicional al truncamiento, se aumenta una vía a una distancia de acoplamiento del puerto de entrada como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12 Vía de Acoplamiento en el Divisor**

Fuente: Autor

## 2.7 Transición de SIW a microstrip

Una transición de SIW a microstrip básicamente se utiliza para dos cosas: la primera es en la alimentación a la guía de onda SIW; por medio de la cual debe suministrar toda la potencia transferida a la guía de onda, teniendo un margen de pérdidas aceptable. Y su otra función es la de

acoplar la guía de onda SIW a una impedancia de  $50\Omega$ , impedancia a la que trabajan los generadores de potencia y los demás dispositivos que se conectarían a la guía de onda SIW.

Actualmente existen varios métodos para realizar dicha transición, entre los más relevantes podemos citar los siguientes:

- **Línea microstrip**

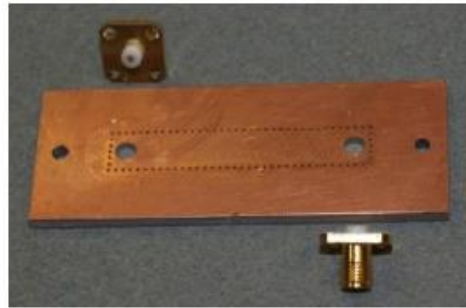
Es muy útil para alimentar una guía de onda SIW, debido a que su campo eléctrico está en la misma dirección que el campo eléctrico presentado en la guía de onda SIW, mostrando así escasas pérdidas al momento del acople de impedancias.



**Figura 13 Transiciones Microstrip a SIW**  
Fuente: (Boria, 2017)

- **Conector Coaxial**

El utilizar un conector coaxial, disminuiría las pérdidas que se presentan por fugas o corrientes parasitas al momento de la excitación. Permitiendo así un mejor acople entre la guía de onda SIW y los dispositivos a conectar, la transición coaxial la podemos ver en la Figura 14.

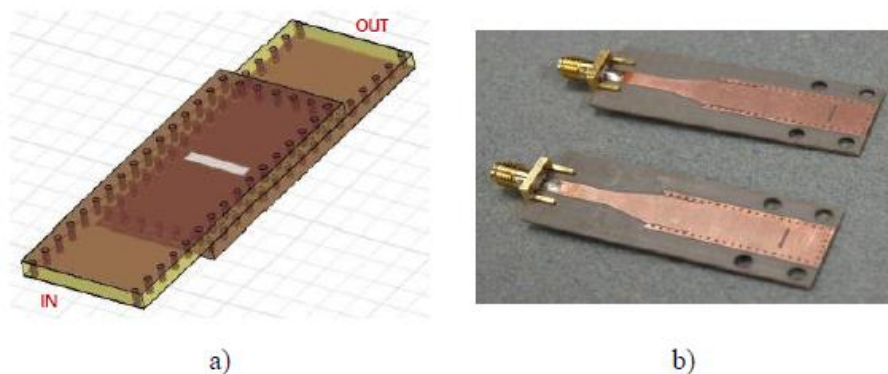


**Figura 14 Transición por Conector Coaxial**

Fuente: (D. Navarro, 2001)

- **Acople por ranura**

Es un tipo de transición más complicada, debido a que conecta a dos guías SIW mediante una ranura entre las dos guías de onda, como se indica en la Figura 15.



**Figura 15 Esquema de transición entre guías SIW**

Fuente: (D. Navarro, 2001)

Se concluye el capítulo, indicando que, para el diseño e implementación de los dispositivos, se inicia realizando el diseño completo de un divisor de potencia de 2 puertos para un posterior escalamiento a los divisores de 4 y 8 salidas. Se ocupó la transición tipo microstrip, debido a que por las investigaciones antes realizadas por (D. Navarro, 2001) muestran excelentes resultados.

## CAPITULO III

### MATERIALES

En el presente capítulo se describe el software que se utilizó para realizar las simulaciones y optimizaciones de los dispositivos finales, así como también la utilidad del software MatLab en este proyecto, se menciona el tipo de conectores que se utiliza en el dispositivo implementado, los sustratos utilizados y por último se describe el analizador vectorial, fundamental para las mediciones en las bandas de frecuencias utilizadas.

#### 3.1 Software: CST STUDIO SUITE

El software de simulación electromagnética CST STUDIO SUITE (*Computer Simulation Technology*) permite desarrollar y solucionar prototipos de diseños electromagnéticos. Dispone de herramientas para el diseño y optimización de dispositivos que trabajan en un amplio rango de frecuencias, en el campo estático como óptico. En el análisis puede comprender efectos de fenómenos térmicos, eléctricos y mecánicos.

CST STUDIO SUITE tiene un entorno de diseño completo, que permite el acceso a toda la tecnología a utilizar. La simulación y modelados de sistemas resulta amigable y permite la gestión de varios sistemas electromagnéticos enteros, ofreciendo ciclos más cortos de simulación, prototipos virtuales y optimización previa a la implementación de los mismos. (Bartsch, 2007)

**Tabla 2**

#### Requisitos mínimos para instalación de CST Studio Suite

Procesador	Mínimo Intel Xeon de doble Socket
Memoria Ram	8Gb recomendados
Tarjeta Grafica	Compatible con OpenGL
Disco Duro	60Gb mínimo
Sistema Operativo	Mínimo Windows 7

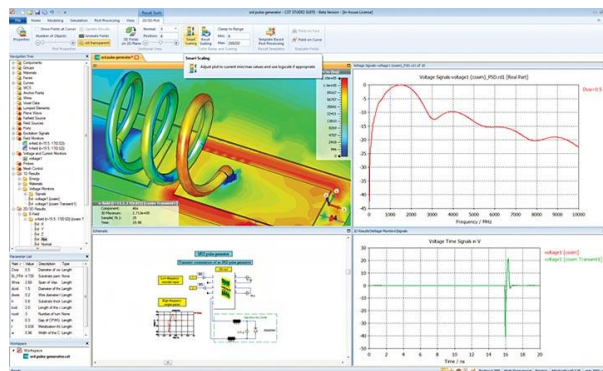
- **Interfaz de Usuario de CST**

El entorno de diseño de CST dispone de una herramienta de modelado 3D y una herramienta de diseño esquemático, el entorno es muy intuitivo para el usuario, abarcando una cantidad de módulos que permiten simplificar el flujo de trabajo en la simulación.



**Figura 16 Software CST Studio Suite**  
Fuente: (Bartsch, 2007)

Como parte complementaria al modelador 3D, CST STUDIO SUITE dispone de la herramienta esquemática, basada en bloques, mediante esta se puede simular circuitos y sistemas complejos a partir de elementos simples.



**Figura 17 Interfaz de Usuario CST Studio Suite**  
Fuente: (Bartsch, 2007)

CST es compatible con la automatización OLE (*Object Linking and Embedding*), la cual permite que la simulación y una gran cantidad de funciones sean controlados a través de

aplicaciones externas entre las que resaltamos serían Excel y Matlab, extrayendo datos automáticamente los cuales se analizarían posteriormente. (Bartsch, 2007)

### 3.2 Software: Matlab

El software Matlab es ampliamente utilizado en el campo de la ingeniería, tiene un entorno diseñado para el análisis iterativo y los algoritmos de diseño con un lenguaje de programación por medio de matrices y arreglos directamente. (MathWorks, 2017)



**Figura 18 MatLab**  
Fuente: (MathWorks, 2017)

**Tabla 3**

**Requisitos Mínimos de Instalación de MatLab 2014a**

Procesador	Cualquier Intel o AMD que soporte SSE2
Memoria RAM	2Gb recomendados
Tarjeta Grafica	No necesario
Disco Duro	16Gb
Sistema Operativo	Mínimo Windows XP Service Pack 2

El software Matlab tiene innumerables funciones y utilidades, en la presente investigación nos centramos en el uso de matrices y arreglos para expresar gráficamente los resultados de los diseños realizados, permitiendo así una comparación y análisis detallado de las gráficas obtenidas. Entre las funciones más utilizadas de Matlab podemos mencionar la representación de datos,



creación de interfaces de usuario (GUI), comunicación entre otros programas y creación de funciones y algoritmos.

Por medio de Matlab, se puede importar ficheros con formato .txt, .s2p y .s1p, los que típicamente genera CST y el analizador vectorial, para ser graficados e interpretados.

### 3.3 Conectores RF tipo SMA (*SubMiniature versión A*)

Los conectores SMA, se los conoce como conectores coaxiales para RF, son de semi precisión para alta frecuencia, proveen resultados fiables en los sistemas de Radio Frecuencia. La impedancia característica de los conectores SMA es de  $50 \Omega$ , y a la vez que tienen un bajo coeficiente de reflexión. Usualmente los conectores transmiten la señal hasta los 18GHz, existiendo conectores en el mercado de mayor costo y con un rango de frecuencias hasta los 46GHz.

En el presente proyecto, para la construcción de los divisores de potencia tipo T truncados, se utilizaron conectores SMA tipo hembra como se indica en la Figura 19, los cuales fueron soldados en la placa de sustrato dieléctrico (PCB), estos conectores SMA son de cinco patas.

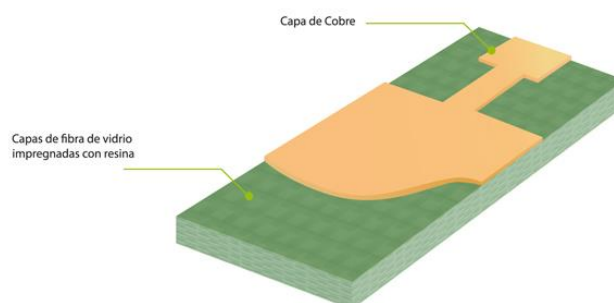


**Figura 19 Conectores SMA hembra**  
Fuente: (Hwagm, s.f.)

### 3.4 Sustrato FR-4

El sustrato FR-4, está compuesto por varias hojas de varios grupos de capas tejidas de fibra de vidrio impregnadas con resina epoxi denominado *Prepeg* como se indica en la Figura 20. Es un material que consta de 8 capas de Prepeg y una de cobre de 335 micrones. Estas capas de Prepeg y

el metalizado de cobre están prensados bajo presión y temperatura controlada, consiguiendo un compuesto homogéneo y listo para los procesos de fabricación. (ElePrint, 2013)



**Figura 20 Sustrato FR-4**  
Fuente: (Microensamble, 2016)

**Tabla 4**

**Parámetros del Sustrato FR4**

Parámetro	Valor
Ruptura Dieléctrica	>50 kV
Índice de Temperatura	140°C (284°F)
Constante Dieléctrica ( $\epsilon$ )	4.8
Tangente de Perdidas ( $\delta$ )	0.017
Espesor estándar	1.6 mm

Entre las características que cabe recalcar en el sustrato FR-4, se destaca las características químicas, físicas y mecánicas, las cuales se tomarán en cuenta para el diseño del divisor de potencia tipo T Truncado.

- **Constante Dieléctrica ( $\epsilon$ )**

También conocida como Permitividad, es una constante física adimensional, describe como un campo eléctrico influye en un material, dicha constante dieléctrica determina la tendencia de un

material a polarizarse ante la excitación de un campo eléctrico y de esta manera anular el campo en el interior del material

- **Tangente de Perdidas ( $\delta$ )**

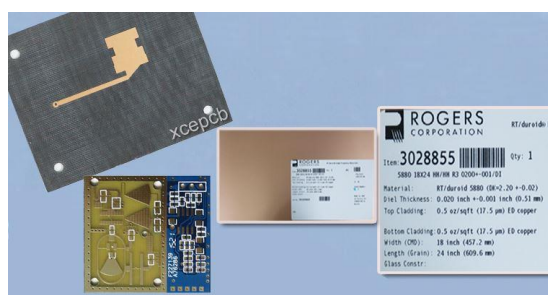
Esta característica también es conocida como factor de disipación, y expresa las pérdidas dieléctricas de un aislante en estado sólido o líquido. Su magnitud depende de las condiciones del tipo de aislante y es totalmente independiente de su volumen, es por eso que este valor puede presentar variaciones por la humedad, suciedad en la superficie la cual impide la circulación de corrientes a tierra, y por el calor. (Quelex, s.f.)

### **3.5 Sustrato Roger RT/Duroid 5880**

El sustrato Roger Duroid 5889, Figura 21, es un compuesto de PTFE, o más conocido como politetrafluoroetileno, es un polímero similar al polietileno reforzado con microfibras de vidrio, generalmente usado para trabajar en frecuencias superiores a los 10GHz. Las microfibras del compuesto están orientadas al azar, con lo que se logra una constante dieléctrica ideal para el trabajo en altas frecuencias. (Rogerscorp, 2017)

La constante dieléctrica es la más baja de los sustratos en el mercado actual, y a su vez la baja pérdida dieléctrica hace de esta placa la adecuada para trabajar con alta frecuencia y anchos de banda grandes, donde la dispersión y las pérdidas son mínimas.

Las láminas de sustratos Roger RT/Duroid 5880 son utilizadas ampliamente en la realización de antenas comerciales de banda ancha, circuitos microstrip y stripline, aplicaciones de onda milimétrica, sistemas de radares militares, sistemas de misiles guiados y antenas de radio digital punto a punto.



**Figura 21 Sustrato Roger RT/Duroid 5880**  
Fuente: (Rogerscorp, 2017)

**Tabla 5**

**Parámetros del Sustrato Roger 5880**

Parámetro	Valor
Ruptura Dieléctrica	>50 kV
Índice de Temperatura	150°C
Constante Dieléctrica ( $\epsilon$ )	$2.2 \pm 0.02$
Tangente de Perdidas ( $\delta$ )	0.0004 - 0.0009
Espesor estándar	1.575 mm
Rango de Frecuencias	8GHz-40GHz

### 3.6 Analizador Vectorial

Para la medición de los resultados y pruebas de los prototipos de Divisores de Potencia Tipo T Truncados, se utilizó un analizador de redes de dos puertos N9918A de la marca Keysight Technologies, es un equipo que está enfocado en medir los parámetros *Scattering* y la impedancia.

Las características más sobresalientes del equipo de medición son:

- El rango de frecuencias de trabajo es de 5KHz hasta los 26.5GHz
- La precisión en la amplitud es de  $\pm 0,6$  dB
- Los límites de Temperatura ambiente soportados son desde los  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta los  $55^{\circ}\text{C}$
- Un rango libre de espolones  $\geq 105\text{dB}$

- Puede trabajar como analizador de espectros, medidor de potencia, voltímetro vectorial, y otras funciones.
- Su peso es de 6.6libras



**Figura 22 Analizador Vectorial N9918A**  
Fuente: (KeysightTechnologies, 2016)

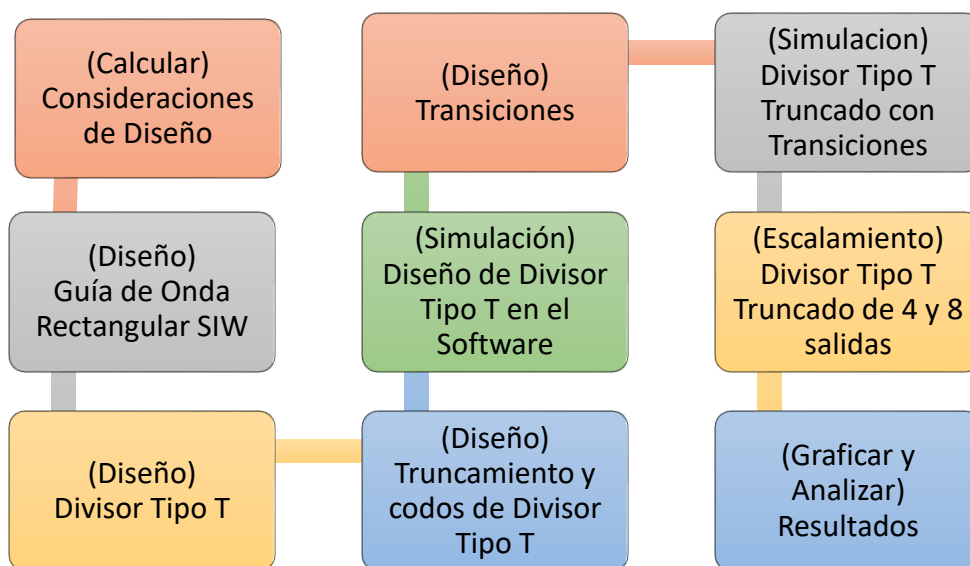
## CAPITULO IV

### DISEÑO, ELABORACIÓN Y RESULTADOS

En el capítulo se expone paso a paso el diseño, simulación e implementación de los dispositivos finales. También se analiza los resultados obtenidos haciendo una analogía de lo simulado con lo implementado.

#### 4.1 Diagrama de Bloques

En la Figura 23 se representa el diagrama de bloques en el que se indica el procedimiento para la realización de los divisores de potencia tipo T truncada para las bandas  $X$  y  $Ku$ .



**Figura 23 Diagrama de Bloques del Proceso de Diseño**

Fuente: Autor

A continuación, se muestra el proceso de diseño de los divisores de potencia tipo T truncada, la que se realizará paso a paso conforme la Figura 23, empezando con una guía de onda tradicional

en su respectiva banda de frecuencia, hasta llegar al diseño final que es el divisor de 4 y 8 puertos en banda  $X$  y  $Ku$  respectivamente, todas los diseños y simulaciones se van a realizar en el software CST.

Se realizará una comparativa de resultados individuales de las partes que conforman el divisor como son: el truncamiento, los codos y biselados, ya que a partir de los cálculos y diseños iniciales se procede a realizar una optimización de variables paramétricas, para un mejor desempeño de los prototipos finales. Una vez terminado el diseño del divisor en guía de onda SIW, se realizar la parte de adaptación de impedancias, o más conocida como transición a microstrip, diseños que se compararan entre sí para verificar su funcionamiento y realizar un posterior análisis de los resultados.

#### 4.2 Consideraciones de Diseño

El divisor de potencia tipo T truncado de cuatro y ocho salidas para la banda  $X$  y  $Ku$  respectivamente, fueron diseñados para trabajar en una frecuencia central y en banda angosta. Los parámetros intrínsecos de la guía de onda SIW, son los mismos en las dos bandas, siendo estos: Separación entre las vías ( $b$ ), diámetro de los cilindros ( $d$ ), alto del Sustrato ( $h$ ), la longitud de onda ( $\lambda$ ), y el ancho SIW ( $W_{SIW}$ ), siendo los dos últimos los parámetros que varían de acuerdo a la banda de trabajo.

El diámetro de los orificios debe tener un diámetro mínimo, para simular una pared de conductor y así obtener, el mejor funcionamiento del dispositivo, además de ser sencillo el proceso de implementación, para lograr el diámetro ideal, aplicamos la regla de diseño resumida en la fórmula (2). (D. Navarro, 2001)

$$d < \frac{\lambda_g}{5}$$

$$d < \frac{3 * 10^8}{18 * 10^9}$$

$$d < 3.33 \text{ mm}$$

$$d = 0.6 \text{ mm}$$

Debido a los materiales disponibles en el mercado nacional, se escogió un valor de 0.6mm, el cual es una distancia acorde al parámetro de diseño y disponible en el mercado nacional.

Para la distancia entre los orificios ( $b$ ), debe repetirse periódicamente, es decir, debe existir la misma distancia entre un orificio metalizado y otro. Esta medida es de gran importancia debido a que la agrupación de los orificios se comporta y simula como las paredes laterales de una guía de onda tradicional. Al considerar una medida grande, existe fugas de campo y flujo eléctrico. Es por eso que se recomienda utilizar una distancia igual o menor a dos veces el diámetro de los orificios, regla de diseño explicada en la fórmula (1).

$$b \leq 2d$$

$$b = 2 * 0.6$$

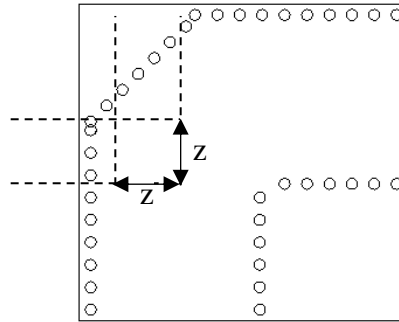
$$b = 1.2 \text{ mm}$$

El ancho efectivo en la guía de onda SIW ( $W_{siw}$ ) se relaciona directamente con la frecuencia central de trabajo, y el tipo de propagación de la onda. Con los datos del ancho de una guía de onda tradicional indicados en la Tabla 1, mediante cálculos y empleo de fórmulas que se describen más adelante, en la formula (8) se logra encontrar el ancho efectivo en SIW mediante las frecuencias de corte y la longitud de onda dentro de la guía de onda SIW.

### 4.3 Codos Del Divisor Tipo T

En el divisor de Potencia Tipo T truncado, existen codos y biselados que influyen directamente en el funcionamiento, disminuyendo las pérdidas de retorno, perdidas de inserción y logrando adecuados acoplamientos, por lo que (Monzón, 2009) recomienda el uso de codos y biselados de  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , gracias a esto se disminuyen las pérdidas por reflexión en cada uno de los puertos. El biselado aplicado en la presente investigación es un codo de  $90^\circ$  con un biselado a  $45^\circ$  como se indica en la Figura 24, manteniendo los brazos en lambda medios y con una porción adicional  $z$ , que está ubicada a 25% de la distancia  $W_{SIW}$ .



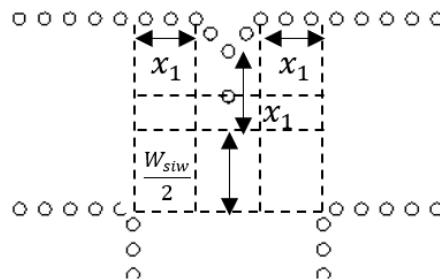


**Figura 24 Codo de 90° con biselado a 45°**  
Fuente: Autor

#### 4.4 Truncamiento Del Divisor Tipo T

El Truncamiento en el Divisor de Potencia Tipo T, es una parte muy importante del diseño, con el que se mejorará el flujo de campo eléctrico que ingresa por el puerto de entrada, logrando la distribución de la señal de -3dB a cada puerto. La adaptación del puerto 1 o de entrada(S11) del divisor, por la forma truncada, se mejora notablemente llegando a valores menores a -30dB en la frecuencia de diseño, a su vez la división de la onda permite una propagación sin pérdidas por inserción y reflexión.

El truncamiento diseñado tiene la forma de una “V” con su biselado de 45°, el proceso de diseño se lo realizó uniendo 3 guías de onda de lambda medios, con segmentos extras los cuales tienen una distancia “ $x_1$ ” como se indica en la Figura 25, esta será definida mediante simulaciones paramétricas e iterativas del divisor de potencia tipo T optimizada.



**Figura 25 Truncamiento en SIW**  
Fuente: Autor

Haciendo uso de la teoría (Coenen, 2010), la cual indica que, si añadimos una o más vías metalizada a una distancia de acoplamiento del truncamiento se lograría mejores resultados en el parámetro  $S_{11}$ .

#### 4.5 Consideraciones de Diseño Para Banda X

Una vez realizados los cálculos de los parámetros intrínsecos de la guía de onda SIW queda por determinar los parámetros correspondientes a cada una de las bandas de frecuencia, los valores para la banda X que son de vital importancia en el diseño, como son: longitud de onda SIW ( $\lambda_{SIW}$ ) y el ancho efectivo de la guía de onda SIW ( $W_{SIW}$ ).

Como primer paso en el diseño se procede a diseñar y simular una guía de onda tradicional, utilizando los valores proporcionados por la Tabla 1, estos son el ancho de la guía de onda ( $W_{guia}$ ) y el alto de la guía de onda ( $B_{guia}$ ). La longitud de la guía de onda será de lambda medios, ya que con esta longitud no se tendrá desfase con la onda original, así se validará que el diseño trabaja en la banda X con una frecuencia central ( $f_c$ ) de 10GHZ. Siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío  $c = 2.9998 * 10^8 \frac{m}{s}$

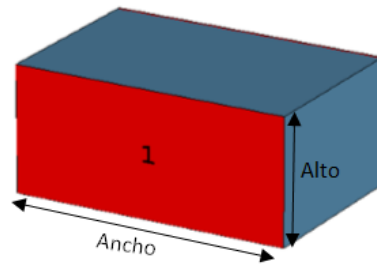
$$\lambda = \frac{c}{f_c} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{m}{s}}{10 \text{ GHz}}$$

$$\lambda = 29.979 \text{ mm}$$

**Tabla 6**  
**Parámetros Guía de Onda Rectangular Banda X**

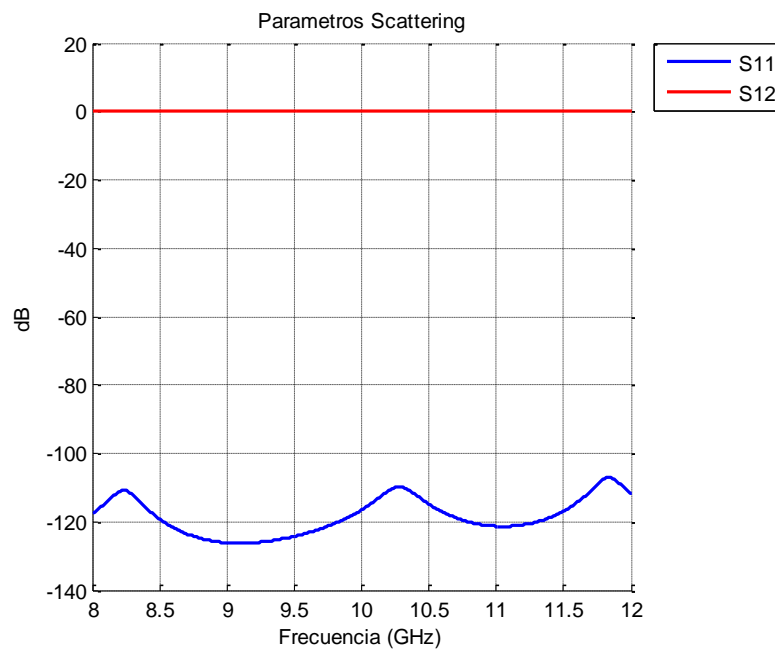
Parámetro	Valor [mm]
Lambda	29.979
Ancho	22.86
Alto	10.16



**Figura 26** Guía de Onda Rectangular Banda X

Fuente: Autor

En la Figura 27, se observan los parámetros *Scattering* de la guía de onda rectangular tradicional en banda X.



**Figura 27** Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular Banda X

Fuente: Autor

Posterior al proceso de diseño y simulación de la guía de onda tradicional, se procede a realizar la adaptación del sustrato dieléctrico en la que se implementará la guía de onda SIW; dicho sustrato es el FR4, ya que es un sustrato barato, fácil de conseguir y soporta frecuencias de hasta los 10GHz, para el proceso de diseño y simulación de la guía de onda en sustrato se calcula el nuevo ancho de

la guía de onda, ya que esta medida se relaciona con la constante dieléctrica del Sustrato empleado, para lo cual se aplica la siguiente formula:

$$W_{\text{eff}} = \frac{W_{\text{guia}}}{\sqrt{\epsilon}} \quad (8)$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{22.86 \text{ mm}}{\sqrt{4.3}}$$

$$W_{\text{eff}} = 11.024 \text{ mm}$$

Y se calcula el valor de la longitud de onda dentro del sustrato ( $\lambda_s$ )

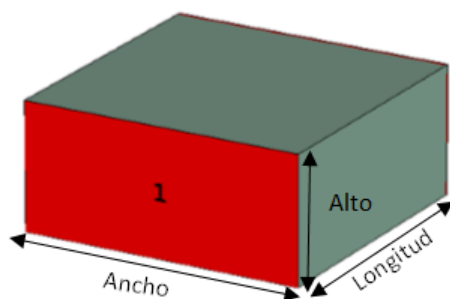
$$\lambda_s = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon}}$$

$$\lambda_s = \frac{29.979 \text{ mm}}{\sqrt{4.3}}$$

$$\lambda_s = 14.4571 \text{ mm}$$

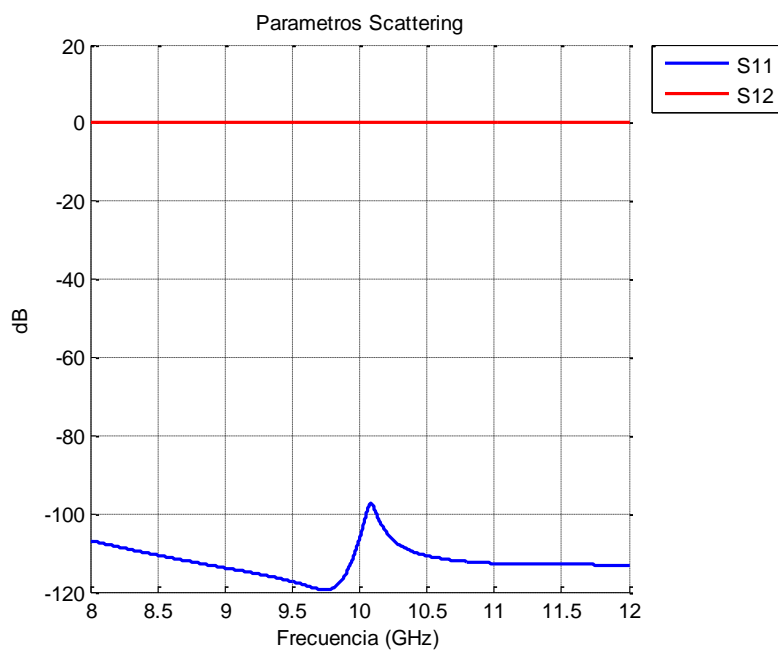
**Tabla 7**  
**Parámetros Guía de Onda Rectangular con Sustrato Banda X**

Parámetro	Valor [mm]
Lambda	14.4571
Alto	1.6
Ancho	11.024
Longitud	$\lambda_s/2$



**Figura 28** Guía de Onda Rectangular en Sustrato FR4, Banda X  
Fuente: Autor

En la Figura 29, se aprecia los parámetros *Scattering* de la guía de onda rectangular en sustrato FR4, los cuales observamos un trabajo del parámetro S11, en toda la banda de frecuencia con una transmisión total en sus puertos



**Figura 29** Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular con Sustrato Banda X  
Fuente: Autor

Con la guía de onda tradicional en Sustrato, se procede a realizar el paso a SIW, tomando en cuenta los parámetros revisados anteriormente, y mediante cálculos encontramos la nueva dimensión del ancho de la guía SIW.

$$W_{SIW} = W_{eff} + \frac{d^2}{0.95 * b} \quad (9)$$

$$W_{SIW} = 11.024(\text{mm}) + \frac{(0.6\text{mm})^2}{0.95 * 1.2(\text{mm})}$$

$$W_{SIW} = 11.34 \text{ mm}$$

La tecnología SIW por naturaleza y estructura, solo trabaja en el modo de propagación transversal eléctrico fundamental ( $TE_{10}$ ), esto hace que la longitud de onda efectiva sea diferente a la longitud de onda que se propaga en el vacío. Es por eso que se aplica la fórmula de la frecuencia de corte ( $f_{c_{TE}}$ ) en dicho modo de propagación, viene definida por las siguientes ecuaciones (10) y (11), mediante ellas se podrá calcular la longitud de onda dentro de la guía de onda SIW.

$$f_{c_{TE10}} = \frac{c}{2 * W_{guia}} \quad (10)$$

$$f_{c_{TE10}} = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * 22.86 \text{ mm}}$$

$$f_{c_{TE10}} = 6.5577 \text{ GHz}$$

$$f_{c_{TE20}} = \frac{c}{W_{guia}} \quad (11)$$

$$f_{c_{TE20}} = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{22.86 \text{ mm}}$$

$$f_{c_{TE20}} = 13.114 \text{ GHz}$$

La frecuencia de corte, al ser 10GHz, está entre las frecuencias de corte máximas y mínimas de los modos de propagación admitidos por la guía de onda SIW; por lo que procedemos a calcular la nueva longitud de onda que se encuentra en la guía de onda SIW.

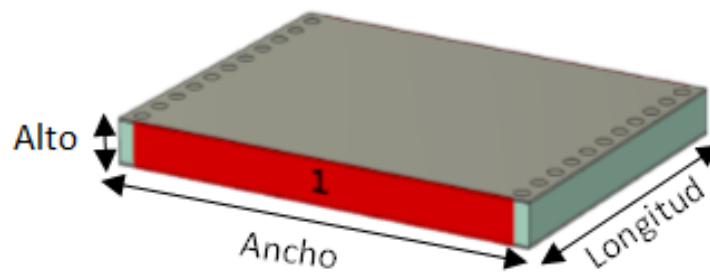
$$\lambda_{\text{TE}_{10}} = \frac{\frac{\lambda_c}{\sqrt{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{fc_{\text{TE}_{10}}}{fc}\right)^2}} \quad (12)$$

$$\lambda_{\text{TE}_{10}} = \frac{\frac{29.979 \text{ mm}}{\sqrt{4.3}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{6.557 \text{ GHz}}{10 \text{ GHz}}\right)^2}}$$

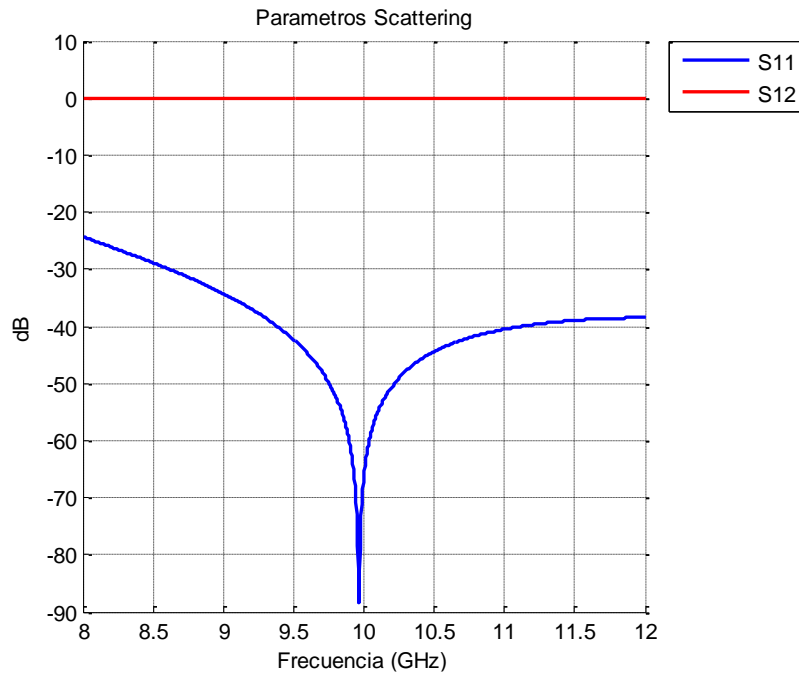
$$\lambda_{\text{TE}_{10}} = 19.148473 \text{ mm}$$

**Tabla 8**  
**Parámetros Guía SIW Rectangular Banda X**

Parámetro	Valor [mm]
Lambda	19.148473
Alto	1.6
Ancho	11.34
Longitud	$\lambda_{\text{TE}_{10}}/2$



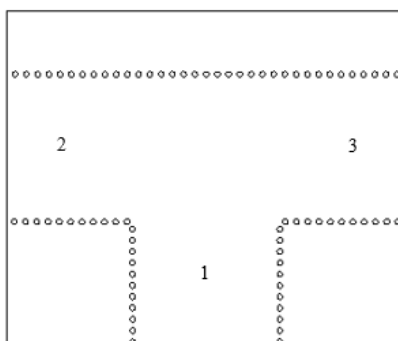
**Figura 30** Guía SIW Rectangular Banda X  
Fuente: Autor



**Figura 31** Parámetros Scattering de la Guía SIW Rectangular Banda X  
Fuente: Autor

En la Figura 31, podemos apreciar los parámetros *Scattering* de la guía de onda SIW, diseñada para 10GHz en banda X, la cual trabaja de manera adecuada, sin presencia de pérdidas.

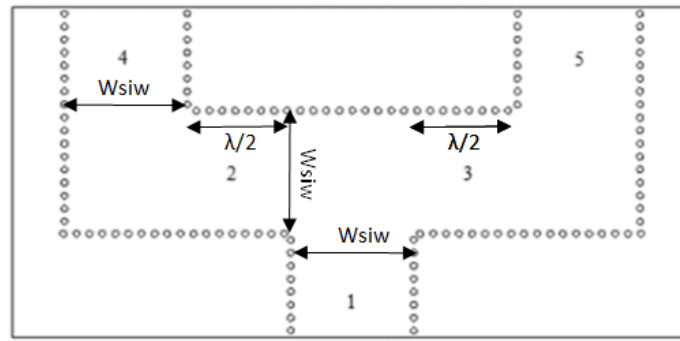
Con la guía de onda en SIW diseñada y simulada, procedemos a unir 3 guía de onda idénticas, para así formar un T, de la siguiente manera.



**Figura 32** Divisor Tipo T SIW Banda X  
Fuente: Autor



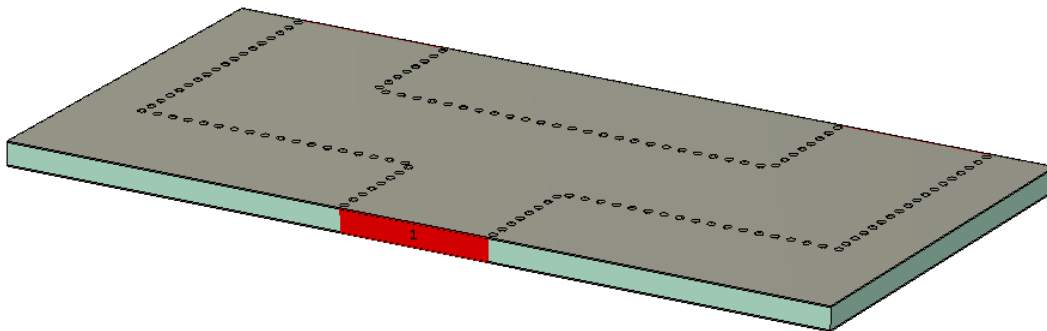
Se añade 2 ramas como se muestra en la figura 33. Estas servirán para la conexión de dispositivos o instrumentos de medición y un posterior escalamiento a puertos de salida mediante la conexión en cascada.



**Figura 33 Divisor Tipo T SIW 2 Puertos Banda X (1)**

Fuente: Autor

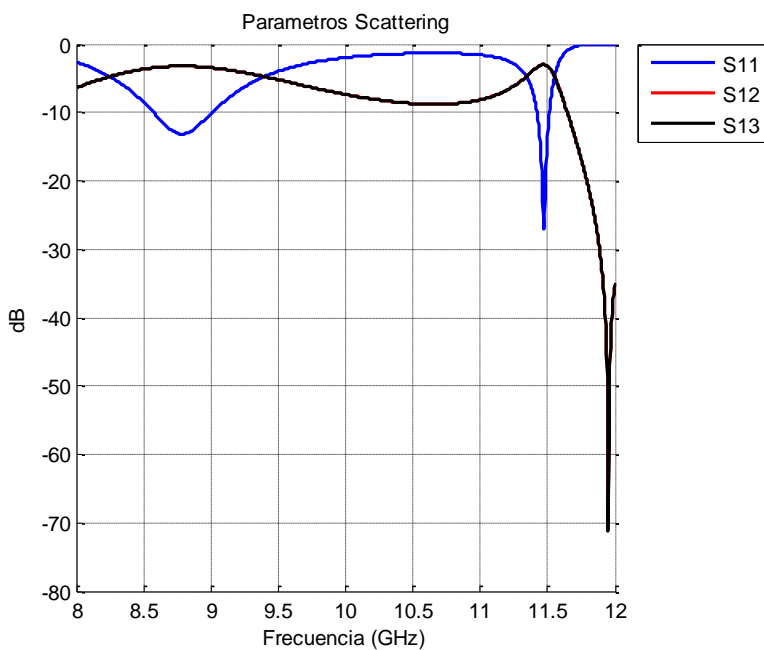
El diseño que presenta la Figura 33 y 34, muestra un divisor tipo T de dos puertos adecuado para un posterior escalamiento y conexión de dispositivos.



**Figura 34 Divisor Tipo T SIW 2 Puertos Banda X (2)**

Fuente: Autor

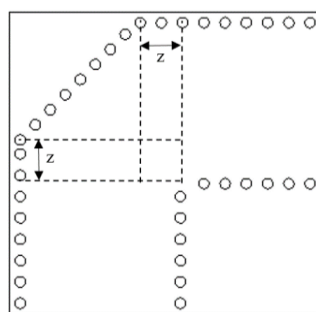
Se realizó la simulación del diseño de la Figura 33, 34. Los cuales son mostrados en la Figura 35, los cuales presentan variaciones en la resonancia de la frecuencia diseñada, razón por la que se incluye en los codos de la T, un biselado a  $45^\circ$ .



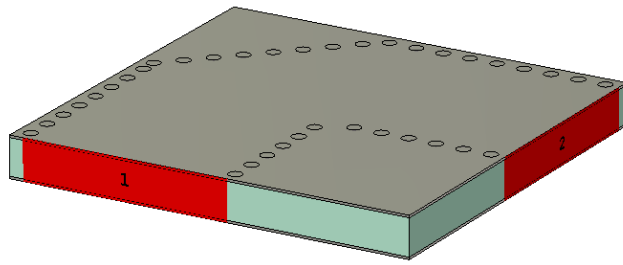
**Figura 35 Parámetros Scattering del Divisor Tipo T Banda X**  
Fuente: Autor

Dichos biselados, se los realizó mediante simulaciones paramétricas, variando la distancia “z” en 1 mm por simulación, así se logró encontrar un valor ideal para la propagación de la onda dentro del dispositivo, esta distancia “z” está cerca del 30% del valor del ancho efectivo de la guía de onda ( $W_{siw}$ ).

A continuación, se muestra el proceso de diseño del codo, Figura 36 y 37, con su respectivo resultado de la simulación.

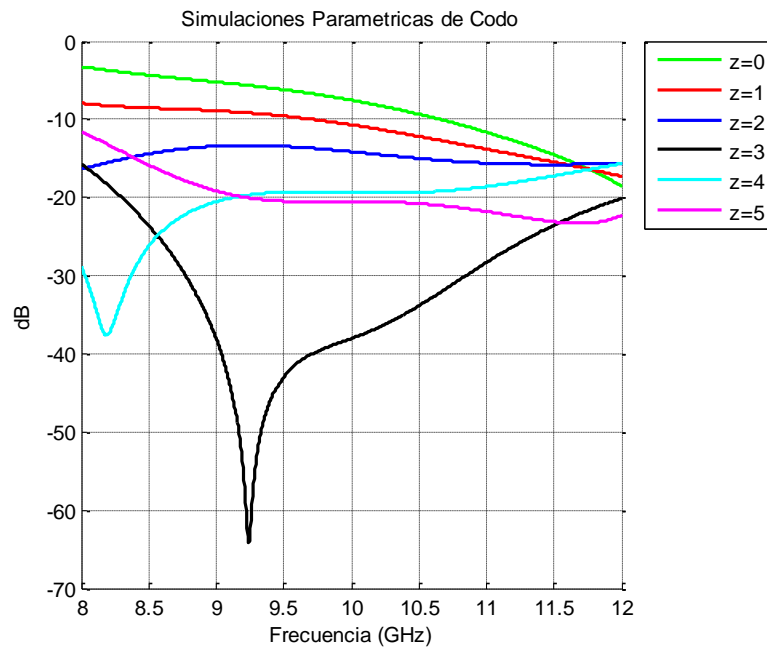


**Figura 36 Codo a 90° con un biselado a 45°**  
Fuente: Autor



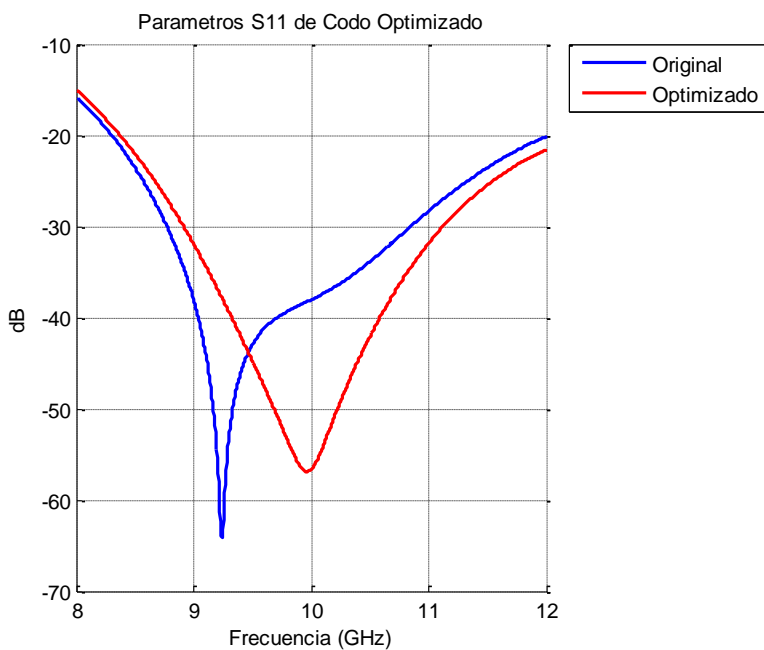
**Figura 37 Codo de 90° en SIW**  
Fuente: Autor

Los resultados de las simulaciones paramétricas se muestran en la Figura 38



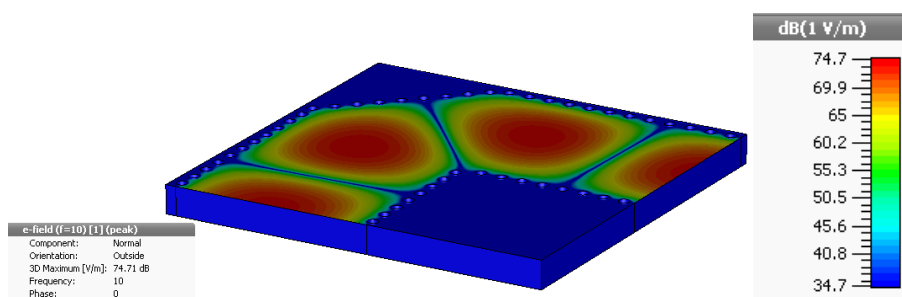
**Figura 38 Simulaciones Paramétricas de Codo a 90°**  
Fuente: Autor

Una vez encontrado el valor de  $z=3\text{mm}$ , el codo logra en trabajar en toda la banda, siendo el  $S_{11}$  menor a  $-20\text{dB}$  una buena propagación de la onda, se procede a realizar una optimización de este valor, mediante el módulo de optimización del programa CST STUDIO SUITE, el que nos arroja el valor de  $z=2.9822270681507\text{mm}$ , con el cual se logra el mejor desempeño de esta parte del divisor.



**Figura 39** Parámetro S11 de Codo Optimizado Para Banda X  
Fuente: Autor

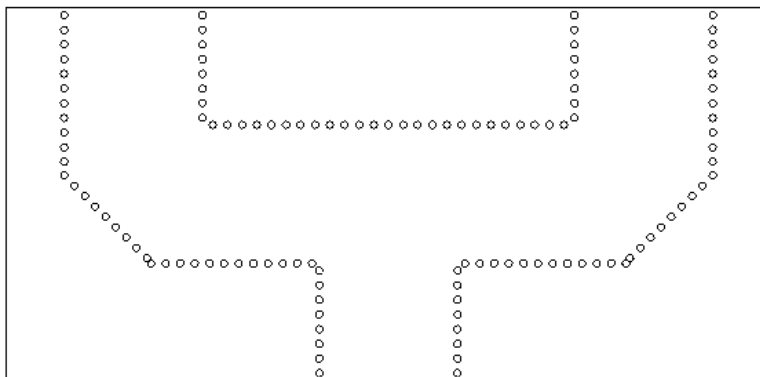
En la Figura 39, podemos observar el parámetro S11 del codo, con sus resultados con la medida calculada de 3mm, y la medida optimizada mediante el programa de simulación



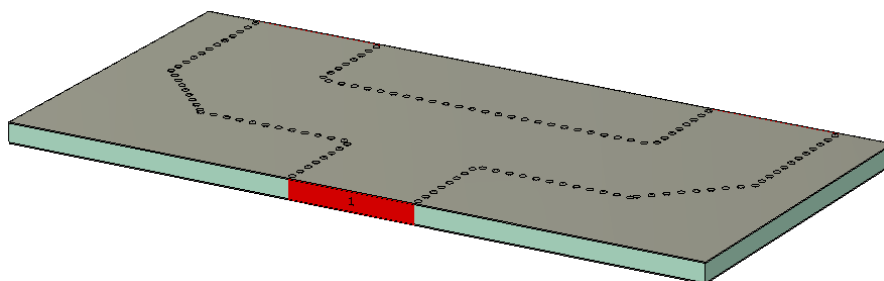
**Figura 40** Propagación del Campo Eléctrico en el Interior del Codo  
Fuente: Autor

En la Figura 40, se observa la propagación del campo eléctrico dentro del codo con un biselado de 45°, comprobando su adecuada propagación.

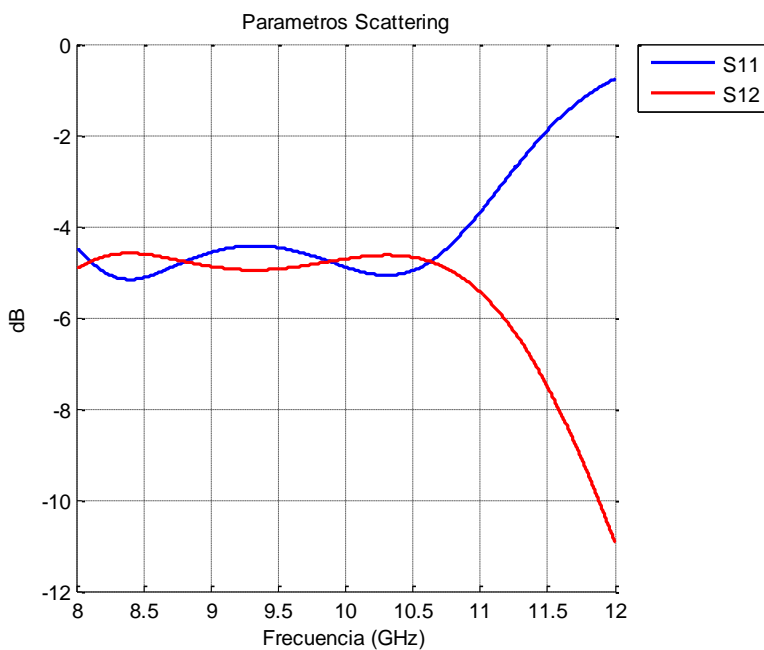
Ahora, se incluye los codos y biselados en el divisor de potencia tipo T para verificar los resultados como se aprecia en las figuras 41 y 42.



**Figura 41 Divisor de Potencia Tipo T con Codos (1)**  
Fuente: Autor



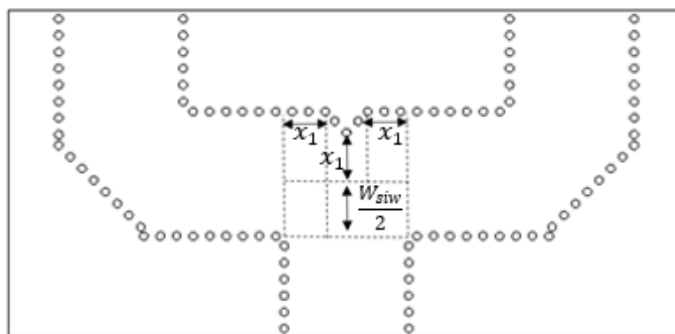
**Figura 42 Divisor de Potencia Tipo T con Codos (2)**  
Fuente: Autor



**Figura 43** Parámetros Scattering del Divisor Tipo T Con Codos  
Fuente: Autor

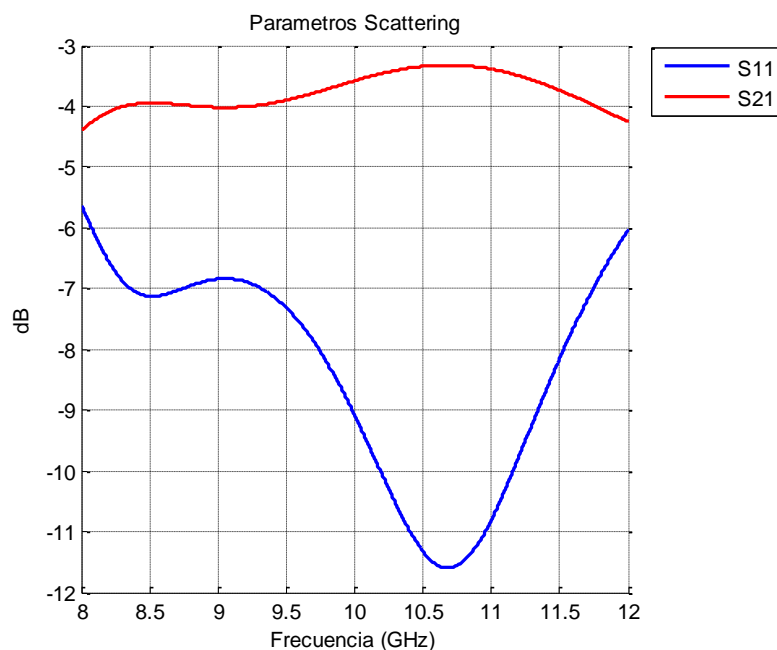
Se procede a la simulación de los diseños del divisor de potencia tipo T con codos, y se obtiene los resultados mostrados en la Figura 43.

Con el objetivo de mejorar las pérdidas de retorno (S11), al diseño del divisor de Potencia tipo T, se le añade un truncamiento como se observa en la figura 44, sirviendo de ayuda a disminuir las pérdidas de retorno y una mejor propagación de la onda.



**Figura 44** Divisor Tipo T Truncado  
Fuente: Autor

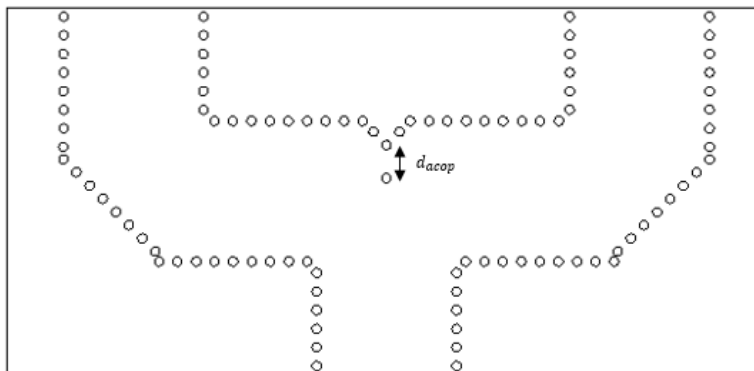
Para este truncamiento se utiliza las simulaciones paramétricas, haciendo variar 0.5 mm la distancia “ $x_1$ ” en cada simulación para así encontrar su mejor desempeño. Obteniendo así un valor de  $x_1$ , aproximado en los 3mm, para realizar la respectiva optimización en la cual el resultado para  $x_1$  fue de 3.265629 mm, resultado que podemos observar en la Figura 45.



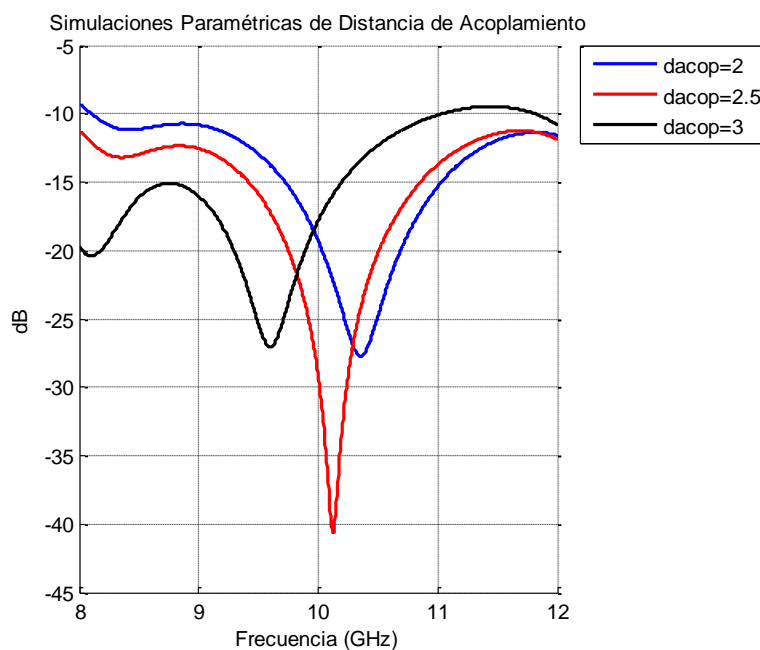
**Figura 45 Parámetro Optimizados del Truncamiento en el Divisor Tipo T**

Fuente: Autor

Como parte final del diseño, incluimos en el diseño vías de cilindro metalizado a la distancia de acoplamiento ( $d_{acop}$ ), dicha medida se la encuentra mediante una optimización de una variable en el diseño, considerando que, en la frecuencia central el coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ), este por debajo de -30dB, y los parámetros  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  estén por encima de los -3.1 dB, que se considera la media potencia a la salida del divisor.



**Figura 46** Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 2 Puertos  
Fuente: Autor

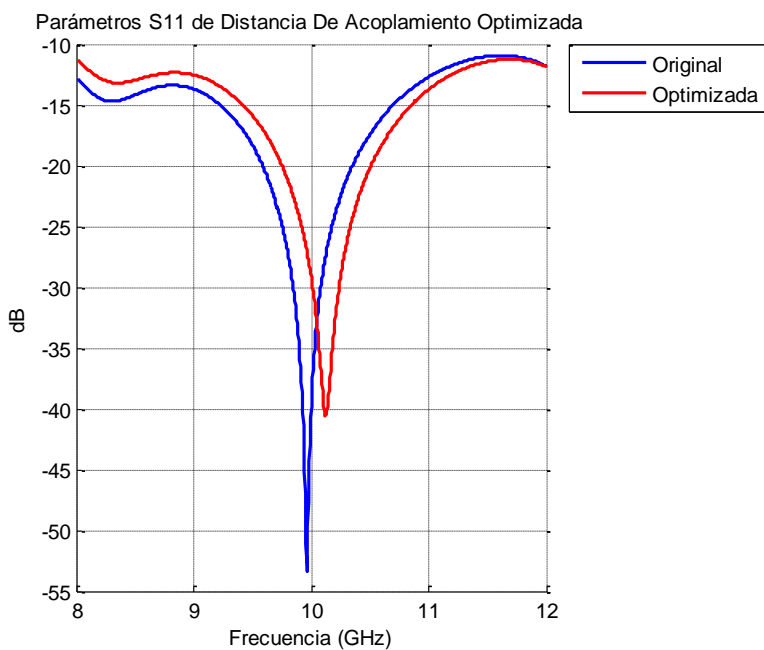


**Figura 47** Simulaciones Paramétricas de Distancia de Acoplamiento  
Fuente: Autor

Observando en la Figura 47 que el divisor de potencia tiene un mejor desempeño con una distancia de acoplamiento de 2.5 mm, distancia que es optimizada para encontrar un mejor desempeño en el dispositivo.

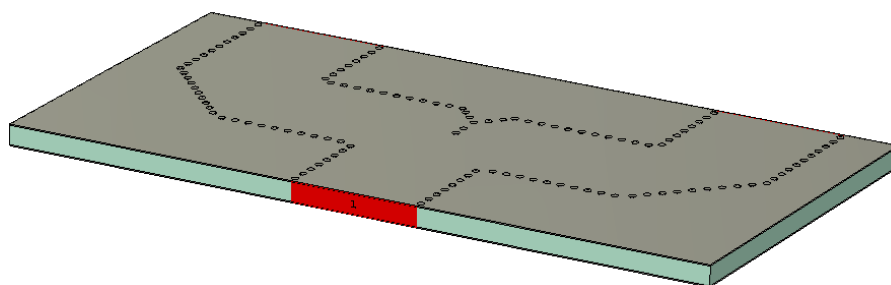
Dicha distancia de acoplamiento optimizada tiene un valor de 2.784 mm, la cual sus parámetros *Scattering* S11 se observa en la Figura 48.





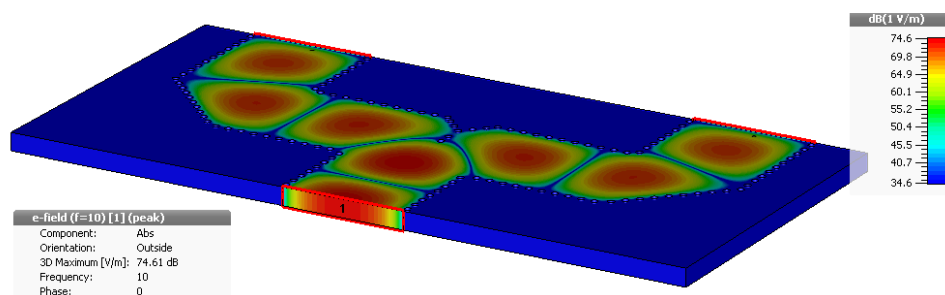
**Figura 48 Parámetros S11 Optimizados de Distancia de Acoplamiento**  
Fuente: Autor

El diseño final del divisor de potencia tipo T truncado para banda X, se lo observa en la figura 49, el que fue simulado y encontrando la propagación del campo eléctrico como indica la Figura 50.

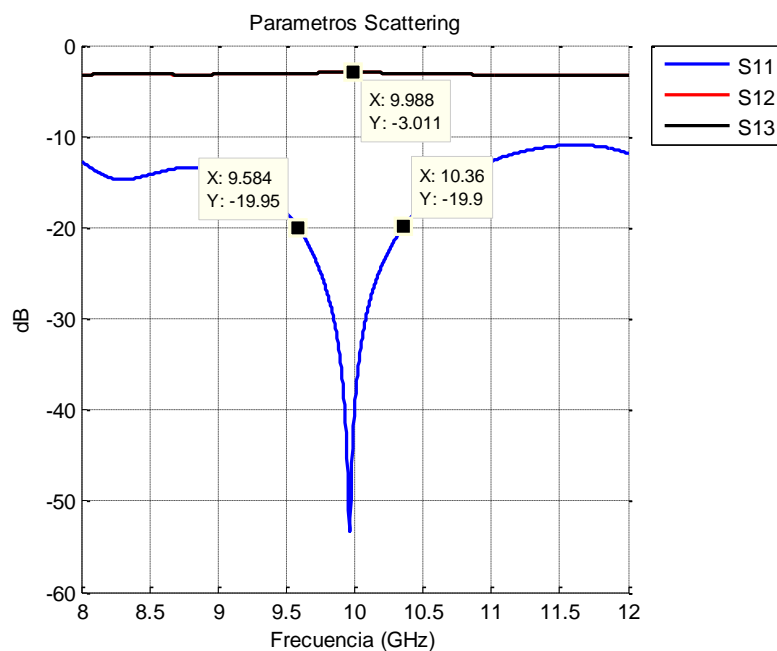


**Figura 49 Divisor de Potencia Tipo T Truncado Optimizado**  
Fuente: Autor

Los parámetros *Scattering* se muestran en la Figura 51, en los que el parámetro  $S_{11}$  tiene su pico mínimo en la frecuencia diseñada de 10GHz, y los parámetros  $S_{12}$  y  $S_{13}$  están en el valor de -3.01 dB. Valores para los que el divisor fue diseñado.



**Figura 50 Propagación de Campo Eléctrico en el Divisor de Potencia Tipo T Truncado Optimizado**  
Fuente: Autor



**Figura 51 Parámetros Scattering del Divisor de Potencia Tipo T Truncado**  
Fuente: Autor

En la Figura 51 se observa que el divisor de potencia Tipo T Truncado, funciona en la frecuencia central de 10GHz, y las potencias en sus puertos de salida están alrededor de los -3dB,

en la que fue diseñado y a su vez se observa que el ancho de banda es de aproximadamente 1 GHz o el 10% de toda la banda.

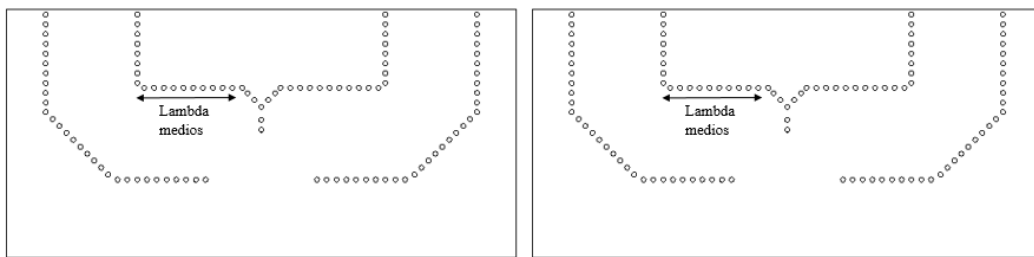
$$AB\% = \left( \frac{10.5 - 9.5}{10} \right) * 100$$

$$AB\% = 10\%$$

#### 4.5.1. Escalamiento para un Divisor de 4 Puertos

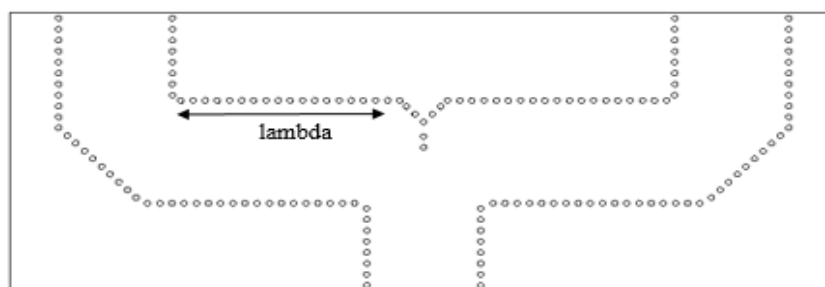
Para realizar el escalamiento del diseño a un divisor de potencia tipo T truncado con 4 puertos de salida, se utiliza como base principal el divisor de 2 salidas ya diseñado, de esta manera se importará los diseños para realizar el escalamiento y unión de los divisores necesario para este prototipo.

Los divisores de potencia de longitud lambda medios, serán los ramales de salida del nuevo prototipo, es por esta razón que se necesitan 2 divisores de longitud lambda medios como se observa en la Figura 52, para así obtener las 4 salidas del divisor. Para los ramales de la entrada se podría utilizar divisores de n lambda medios, siendo n,  $\left( n * \frac{\lambda}{2} \right)$ , cualquier número entero positivo. Para disminuir el tamaño del prototipo final, se utilizó un divisor de longitud lambda presentado en la Figura 53.

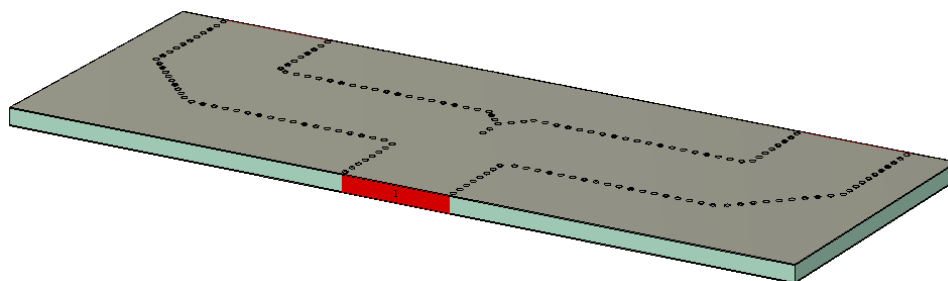


**Figura 52** Divisor de Potencia Tipo T Truncado de longitud Lambda medios

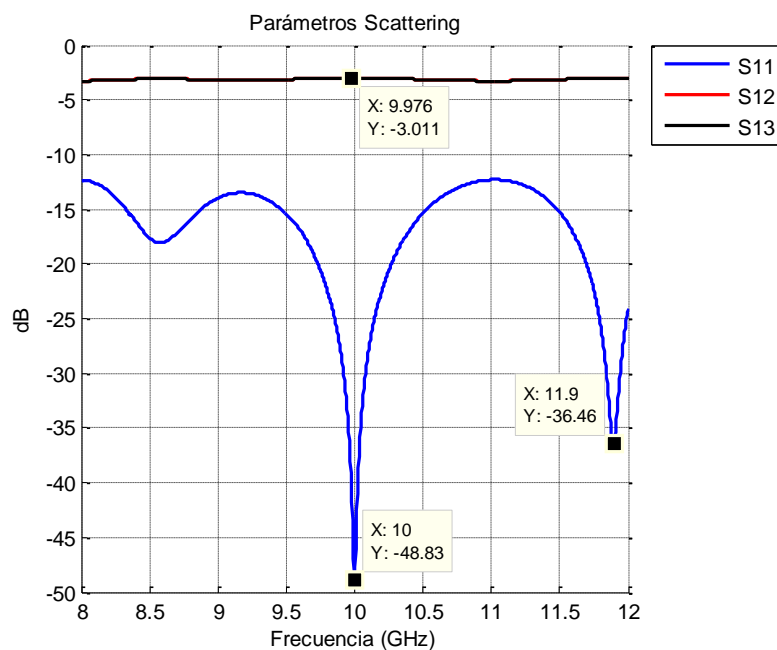
Fuente: Autor



**Figura 53** Divisor de Potencia Tipo T Truncado de longitud Lambda (1)  
Fuente: Autor



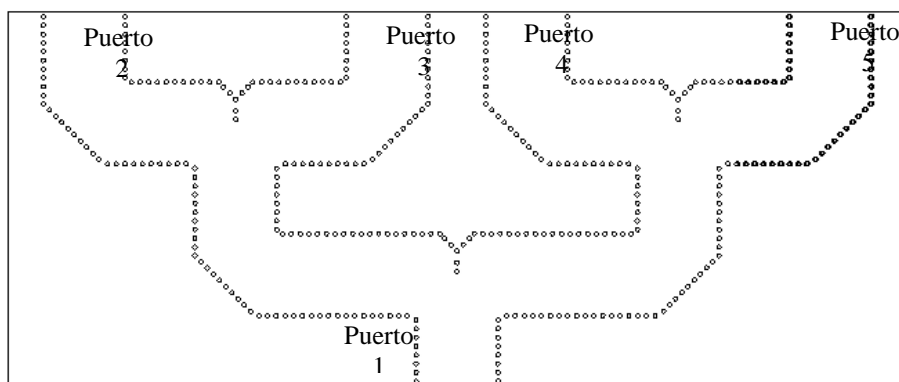
**Figura 54** Divisor de Potencia Tipo T Truncado de longitud Lambda (2)  
Fuente: Autor



**Figura 55 Parámetros Scattering del Divisor de Potencia Tipo T Truncado de Longitud Lambda**

Fuente: Autor

Analizando el resultado mostrado en la Figura 55, de los parámetros *Scattering* del divisor de potencia de longitud lambda, se observa que aparte de trabajar en la frecuencia central de 10GHz, tiene una frecuencia de resonancia cerca de los 12GHz, lo cual es muy favorable porque este dispositivo se transformaría en un divisor de potencia en doble banda’.



**Figura 56 Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas (1)**

Fuente: Autor

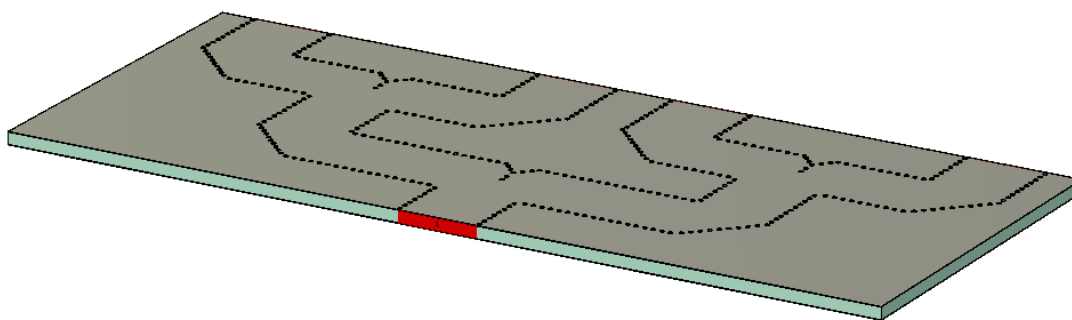
Los valores de los parámetros en los puertos de salida cambiarían, al ser un divisor de 4 salidas, por lo que su valor ideal sería de:

Siendo N, el número total de puertos de salida del divisor

$$\text{Compling} = -10 * \log N$$

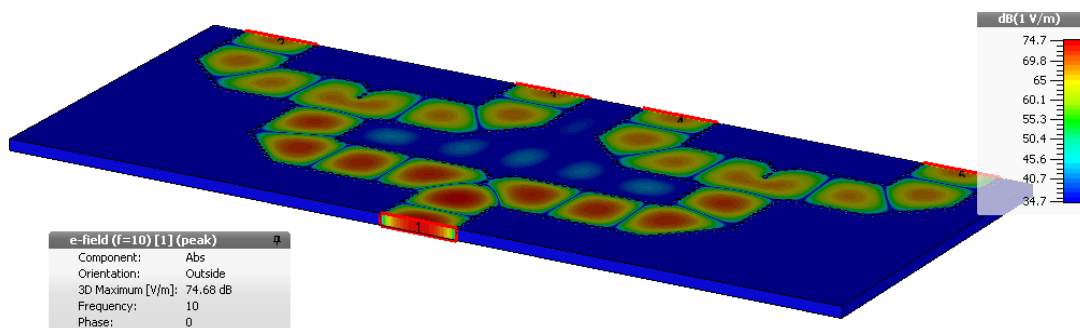
$$\text{Compling} = -10 * \log 4$$

$$\text{Compling} = -6.02$$



**Figura 57** Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas (2)

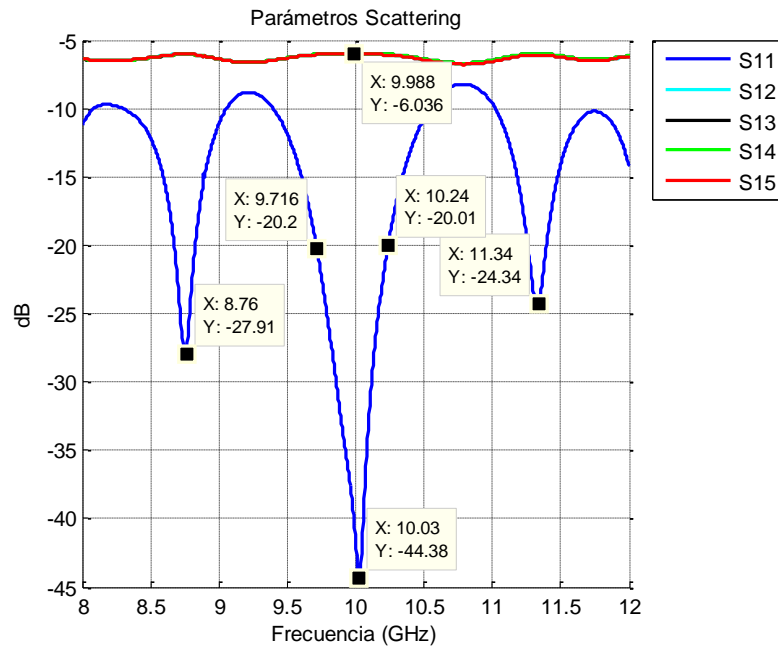
Fuente: Autor



**Figura 58** Propagación del Campo Eléctrico en el Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas

Fuente: Autor

En la Figura 58, se observa la propagación del Campo Eléctrico dentro del SIW, observando un adecuado flujo de Campo desde el Puerto 1, hacia los puertos de salida del Divisor de Potencia Tipo T Truncado.



**Figura 59 Parámetros Scattering en el Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas**  
Fuente: Autor

Una vez escalado el diseño a un divisor de 4 puertos, se observa en la Figura 59 que los parámetros *Scattering* presentan un excelente desempeño, logrando en sus puertos de salida un valor cercano a los -6dB lo que representa un cuarto de la potencia de entrada, y en el parámetro S11, se observa una respuesta en tres frecuencias, estas son 10GHz, que es la frecuencia central, y en 8.75 y 11.32 GHz, las que son consideradas frecuencias de trabajo secundarias, haciendo de este dispositivo, un Divisor de Potencia Tipo T truncado ideal para 3 bandas.

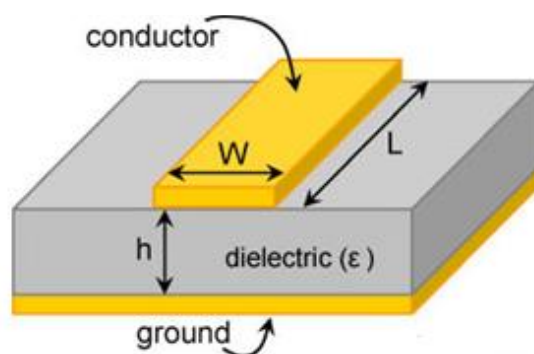
Su ancho de banda central es de 511.29 MHz, representando el 5.12% de toda la banda.

$$AB\% = \left( \frac{10.23 - 9.7191}{10} \right) * 100$$

$$AB\% = 5.12\%$$

### 4.5.2. Transición tipo Taper

El diseño de la transición Taper se basó en la teoría expuesta por (Muhammada Imrad Nawaz, 2014), la cual se compone por la parte del Taper y la línea Microstrip que se detalla a continuación. Con la ayuda de la calculadora de líneas microstrip, herramienta online, ingresando los parámetros del Sustrato y la frecuencia de trabajo, se obtiene los resultados del Ancho (W) y Largo (L) de una guía de onda, para que esta tenga un valor de impedancia de  $50\Omega$  y una longitud eléctrica de  $90^\circ$ , para evitar el cambio de fase en los puertos de salida.



**Figura 60 Línea Microstrip**  
Fuente: (EmTalk)

**Tabla 9**

**Parámetros Ingresados Para Calcular la Línea Microstrip**

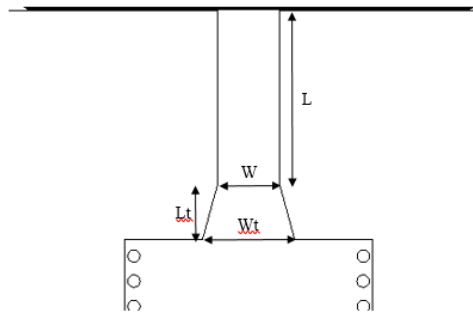
Parámetros del Sustrato	Valor
Constante Dieléctrica ( $\epsilon$ )	4.3
Alto del Sustrato (h)	1.6 mm
Frecuencia	10 GHz



**Tabla 10****Valores de Línea Microstrip**

Parámetro	Valor [mm]
Ancho (W)	3.1118431163
Largo (L)	8.29983681329

El siguiente paso para realizar la transición, es el trapecio de conductor que se añade al dispositivo SIW, por lo que se procede al cálculo del ancho ( $W_t$ ) y el alto del trapecio ( $L_t$ ). (Muhammada Imrad Nawaz, 2014)

**Figura 61 Transición Tipo Taper**

Fuente: Autor

$$\frac{W_t}{W_{siw}} \cong 0.4 \quad (13)$$

$$W_t \cong 0.4 * W_{siw}$$

$$W_t \cong 0.4 * 11.235$$

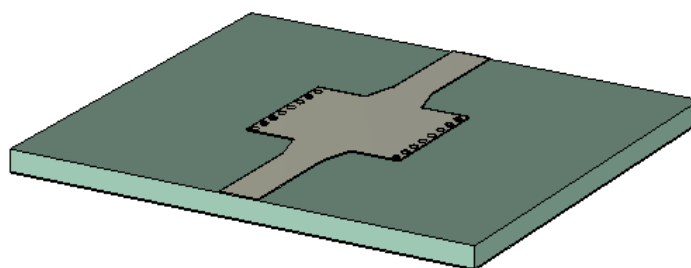
$$W_t \cong 4.494$$

$$\frac{\lambda_s}{2} < L_t < \lambda_s \quad (14)$$

$$1.34\text{mm} < L_t < 2.68\text{mm}$$

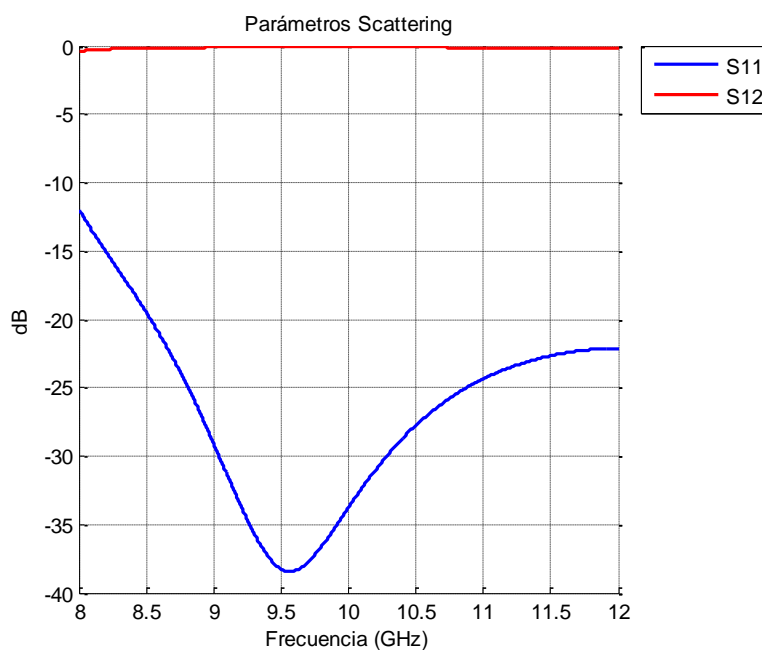
Distancias que posteriormente se les aplica un proceso de optimización de dos variables, obteniendo los valores de  $W_t = 4.403311867$  y  $L_t = 2.640230758$

En la Figura 62, se muestra la transición implementada en la guía de onda SIW.



**Figura 62** Transición Tipo Taper Aplicada a una Guía SIW

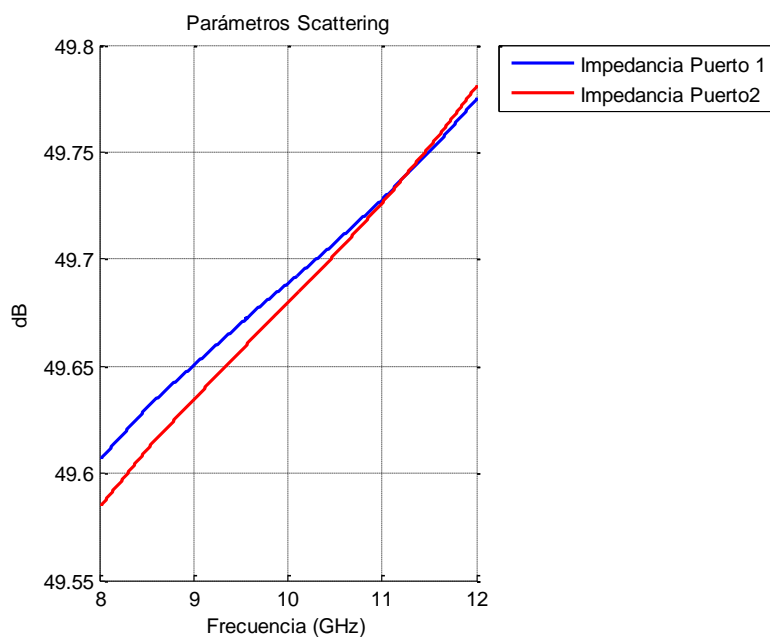
Fuente: Autor



**Figura 63** Parámetros Scattering en Transición Tipo Taper en una Guía SIW

Fuente: Autor

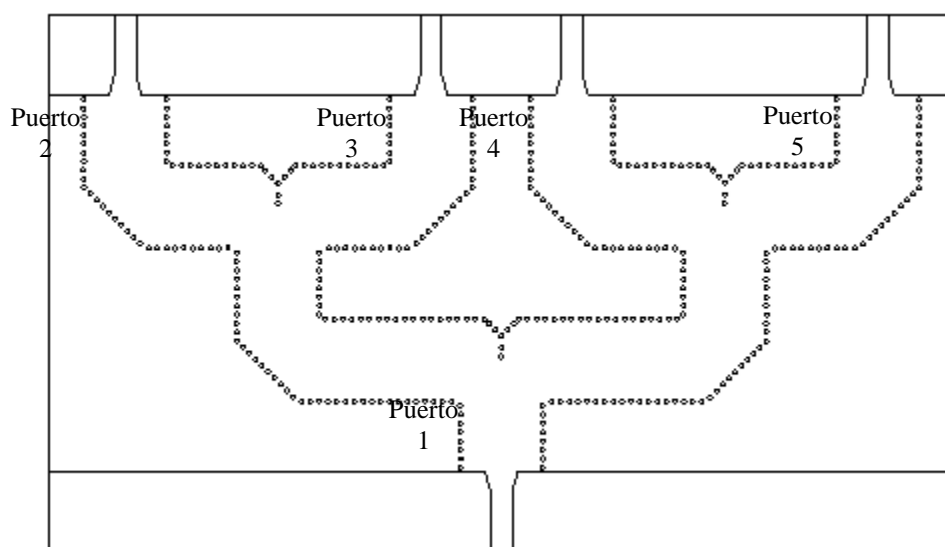
En la Figura 63, se observa que la transición trabaja en toda la banda desde los 8 a 12GHz, y con una impedancia de  $49.7\Omega$  como se observa en la Figura 64.



**Figura 64 Impedancia en los Puertos de Entrada y Salida**

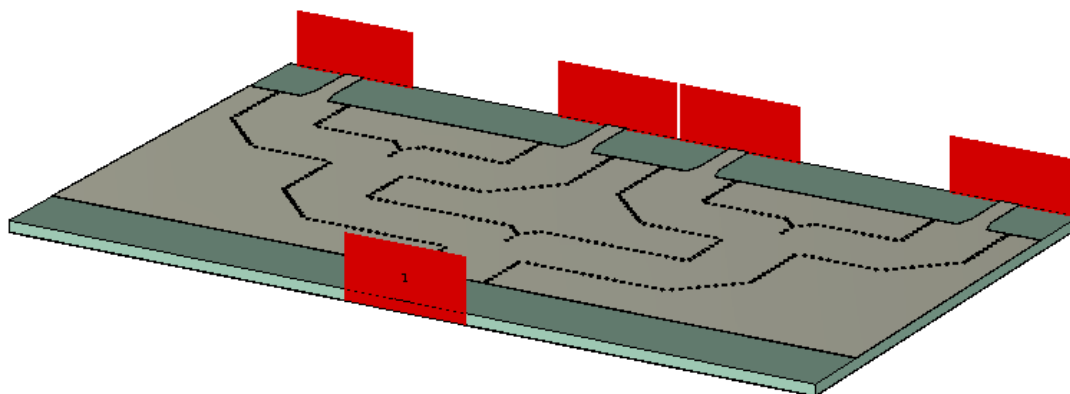
Fuente: Autor

Al estar completamente acoplado el diseño de la guía de onda SIW a una impedancia de  $50\Omega$ , se realiza la implementación de las transiciones en el diseño del divisor de potencia tipo T truncada de 4 puertos como se observa en las figuras 65 y 66.

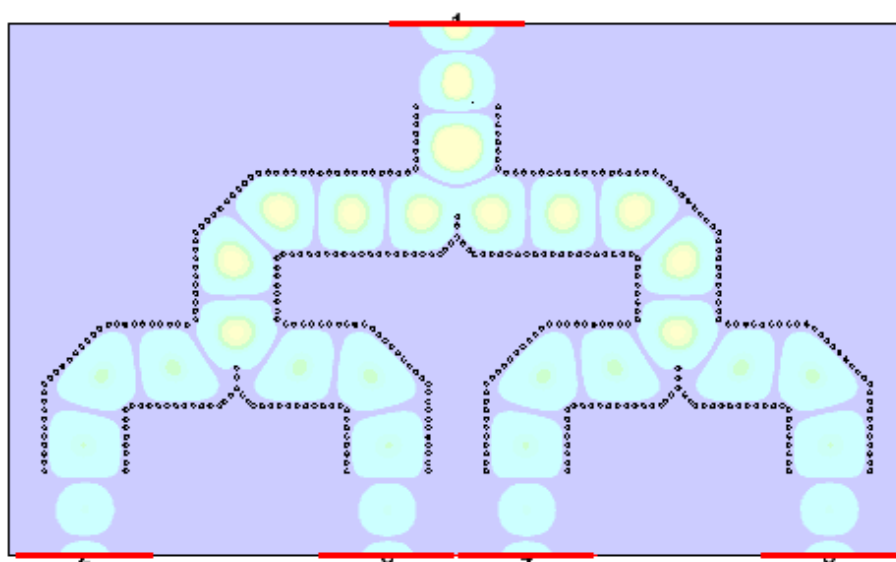


**Figura 65 Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas con Transiciones (1)**

Fuente: Autor



**Figura 66 Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas con Transiciones (2)**  
Fuente: Autor

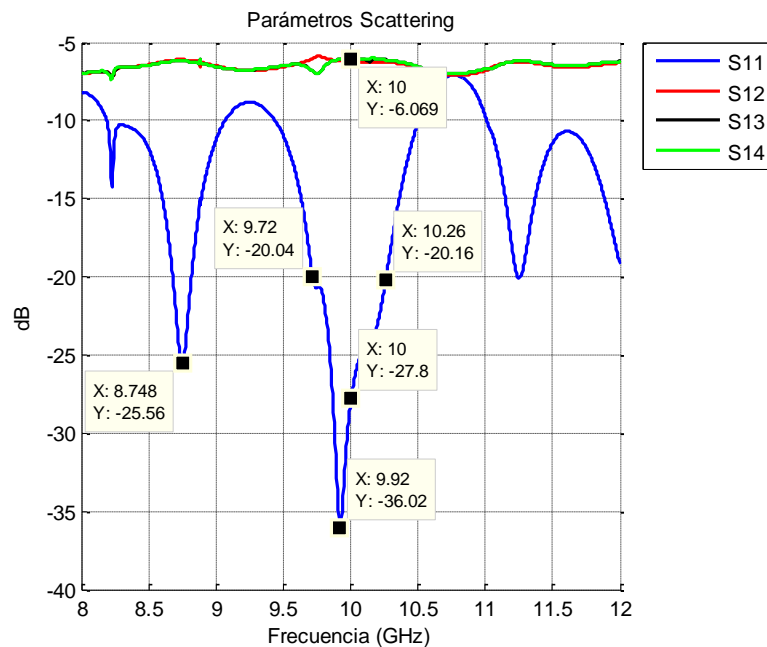


**Figura 67 Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas con Transiciones**  
Fuente: Autor

En la Figura 67, se observa la propagación del Campo Eléctrico en el Divisor de Potencia Diseñado para 4 Salidas, las que tienen una misma distribución de Flujo de Potencia tanto en magnitud como en fase.

Resaltando que para la Simulación de toda onda SIW, es necesario cambiar los parámetros de Background, a un material de tipo Normal, y en la sección de Boundaries, el tipo de condiciones deben ser Abiertas (Open). Esto se debe a que la propagación que tenemos en SIW es totalmente diferente a la propagación de los Modos de Transmisión en líneas Microstrip.

En la Figura 68 se indica los parámetros *Scattering* del divisor de potencia tipo T truncado con transiciones, observando su pico mínimo S11, en 9.92GHz, con un acoplamiento de -36,02dB, lo cual nos indica que el divisor trabaja adecuadamente, y su ancho de banda está alrededor de los 540 MHz.



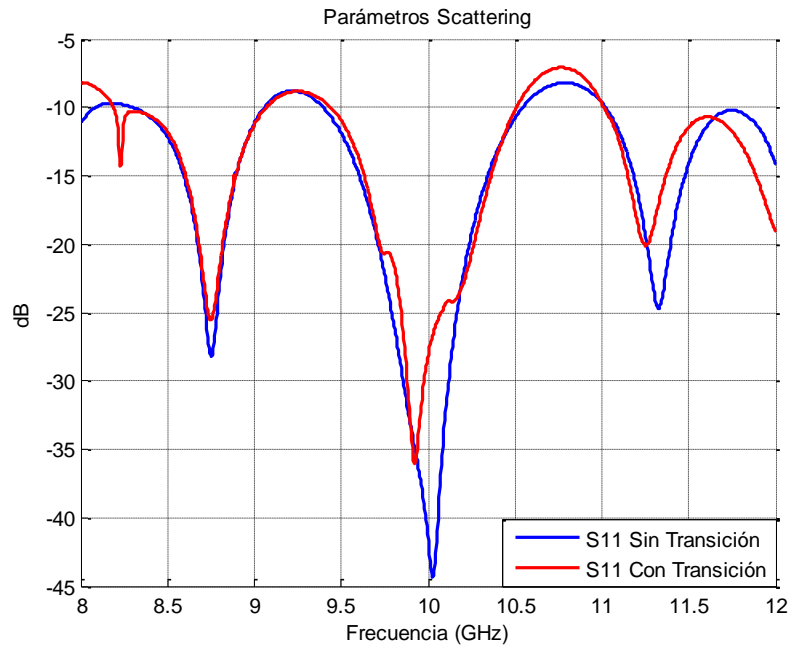
**Figura 68** Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Salidas con Transiciones

Fuente: Autor

$$AB\% = \left( \frac{10.26 - 9.72}{10} \right) * 100$$

$$AB\% = 5.4 \%$$

Se realizó una comparación de los parámetros *Scattering* de los diseños con transición, y sin transición, como se observa en la Figura 69, observado un comportamiento idéntico, con la única diferencia en los picos mínimos del parámetro S11.

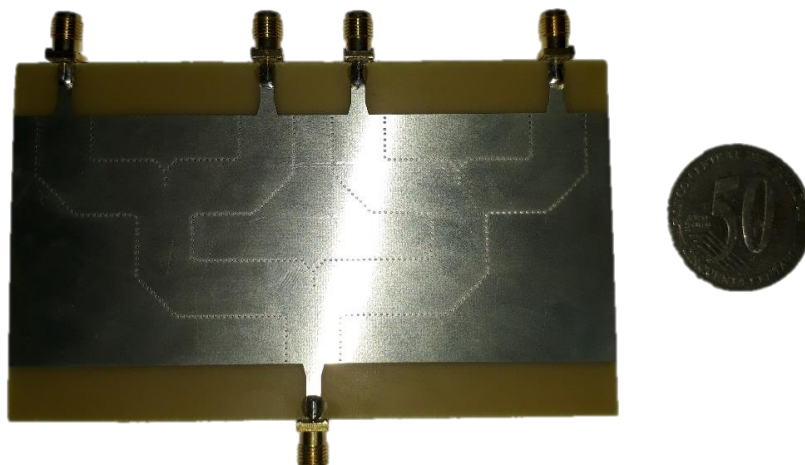


**Figura 69 Comparación de Resultados Con Transición y Sin Transición**  
Fuente: Autor

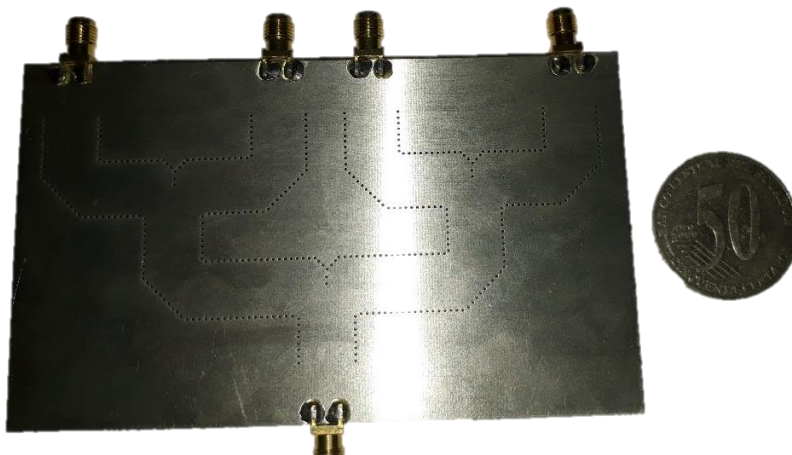
#### 4.5.3. Construcción en Sustrato

El software electromagnético *CST Studio Suite*, tiene la herramienta de exportar el proyecto por capas, estas son definidas por: sustrato, metal, y vías metalizadas, de esta forma se exporta el proyecto al programa AutoCAD el cual es un software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D y modelado 3D, en el que se establece parámetros de medidas y capas para posteriormente exportar al programa ADS es un software de automatización de diseño electrónico para RF, microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad, en el que se genera un archivo Gerber que es un formato de archivo que contiene la información necesaria para la fabricación de la placa de circuito impreso o PCB, compatible con los archivos que se cargan a la prototipadora para realizar el diseño.

Los diseños finales con los respectivos conectores SMA, se puede observar en las figuras 70 y 71.



**Figura 70** Divisor de Potencia Tipo T Truncado Vista Posterior  
Fuente: Autor

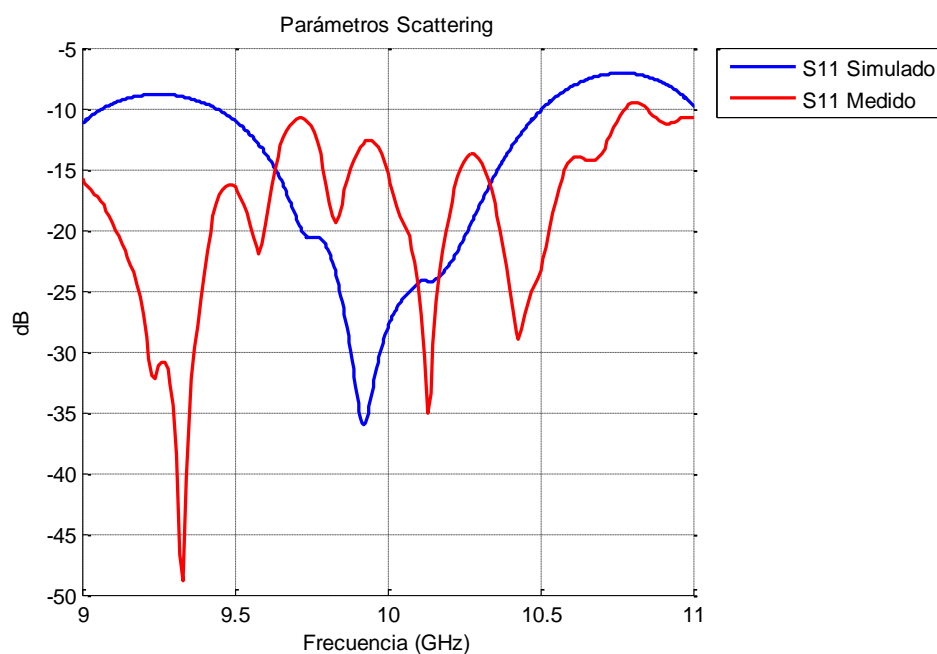


**Figura 71** Divisor de Potencia Tipo T Truncado Vista Anterior  
Fuente: Autor

Se realizó una comparación y análisis posterior de los resultados del parámetro S11 simulado contra el medido, los cuales observamos en la figura 72.

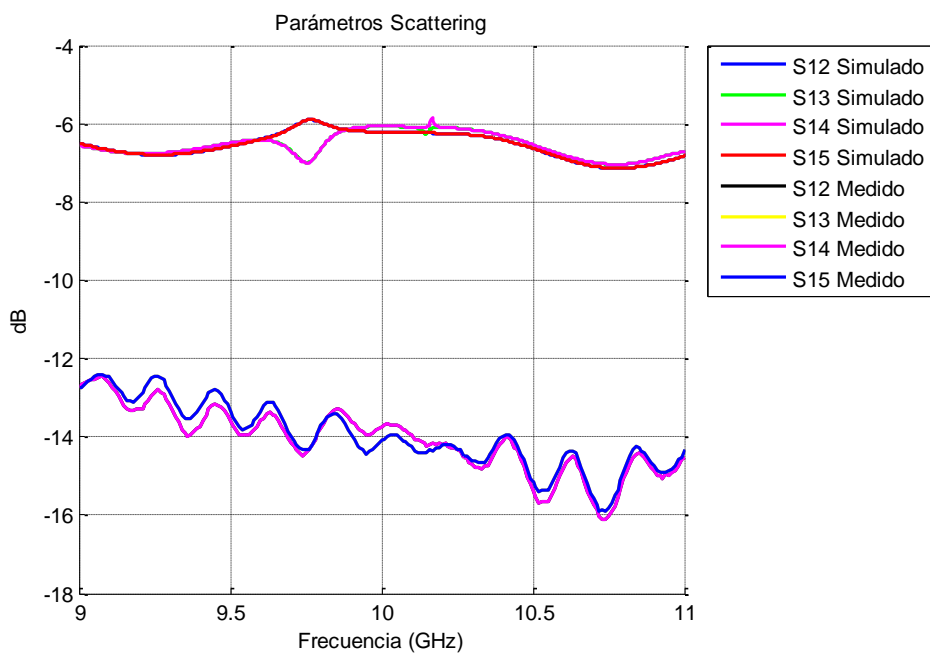
De igual manera los parámetros S12, S13, S14 y S15, los cuales representan las salidas del divisor, observamos su comparación en la figura 73.

Las fases son un factor muy importante en el sistema, de igual manera se realiza la comparación la cual podemos observar en la Figura 74 y 75.



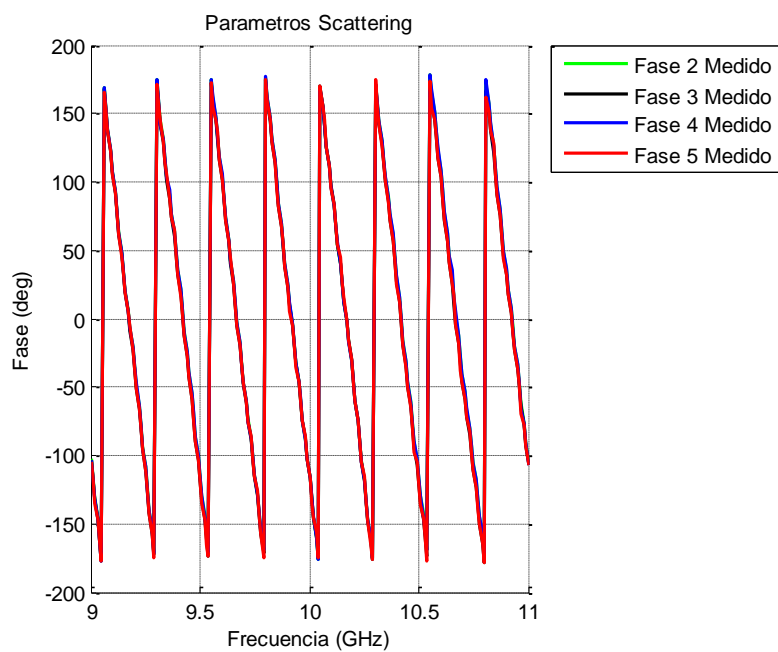
**Figura 72 Comparación de Resultados en Parámetro S11 Simulados vs Medido**  
Fuente: Autor





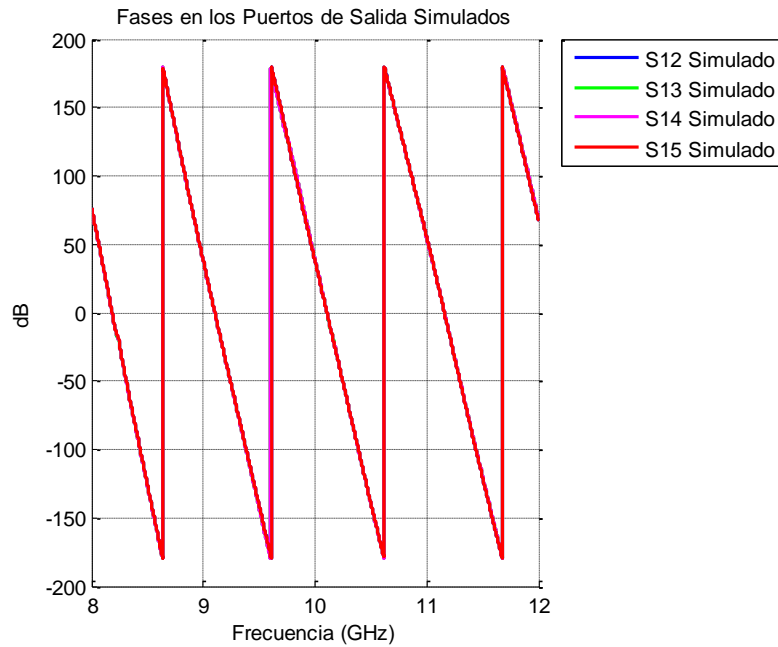
**Figura 73 Comparación de Resultados en los Puertos de Salida Simulados vs Medido a la Salida**

Fuente: Autor



**Figura 74 Fases de Los Puertos de Salida Medidos**

Fuente: Autor



**Figura 75 Fases de Los Puertos de Salida Simulados**  
Fuente: Autor

#### 4.5.4. Resultados

Una vez obtenidos los resultados de los parámetros *Scattering* para el divisor de 4 Puertos, se realizó una comparativa entre el diseño del divisor de potencia con transición y sin transición como se observa en la figura 68. Observando que: el comportamiento del parámetro S11, tiene una gran similitud en los dos dispositivos, trabajando en la frecuencia central de 10GHz y teniendo un ancho de banda similar que ronda entre los 540 MHz, a la vez que trabaja en frecuencias secundarias de 8.748 GHz y 11.32GHz, esto se debe a errores milimétricos en la construcción del dispositivo.

Analizando los resultados del divisor de 4 puertos implementado, en las figura 73, se observa el comportamiento de señal mantiene la forma y la tendencia de su respectiva simulación pero encontrado diferencias en la magnitud de los Parámetros *Scattering* de los puertos de Salida, esto se debe al tipo de sustrato utilizado, ya que el sustrato FR4 es un sustrato básico que tiene como límite de frecuencia los 10GHz que es nuestra frecuencia central, incluyendo pérdidas y disipación de la onda dentro del sustrato. En la figura 72, que muestra el parámetro S11 se observa en el diseño

implementado que la frecuencia sufre un desplazamiento con un pico máximo en 10.1 GHz, y en 9.3 GHz que están dentro de la banda X. Las pérdidas de inserción por el material se ven reflejadas en los parámetros S12, S13, S14 y S15 en las que se observa niveles de potencia de -12 dB lo cual representa una pérdida de aproximadamente 6dB en los puertos de salida del diseño.

En la figura 74 y 75 se puede observar las fases en los puertos de Salida del divisor de Potencia Tipo T Truncado de 4 Puertos, al ser un dispositivo simétrico y homogéneo, sus fases y distribución de potencia deben mantenerse iguales en todos sus puertos, hipótesis que se visualiza en las respectivas figuras.

#### 4.6 Consideraciones de Diseño Para Banda Ku

Los cálculos de los parámetros del divisor de potencia tipo T truncado para la banda Ku en 15GHz, son exactamente los mismos que se aplicaron en el diseño del divisor en banda X, por lo que en esta sección simplemente se presenta las fórmulas y resultados de las simulaciones correspondientes.

El Sustrato dieléctrico utilizado en el diseño del Divisor de Potencia Tipo T Truncado para la banda Ku es FR4.

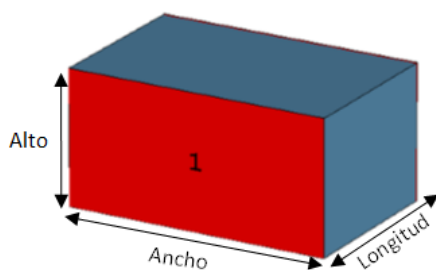
$$\lambda = \frac{c}{f_c}$$

$$\lambda = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{m}{s}}{15 \text{ GHz}}$$

$$\lambda = 19.986 \text{ mm}$$

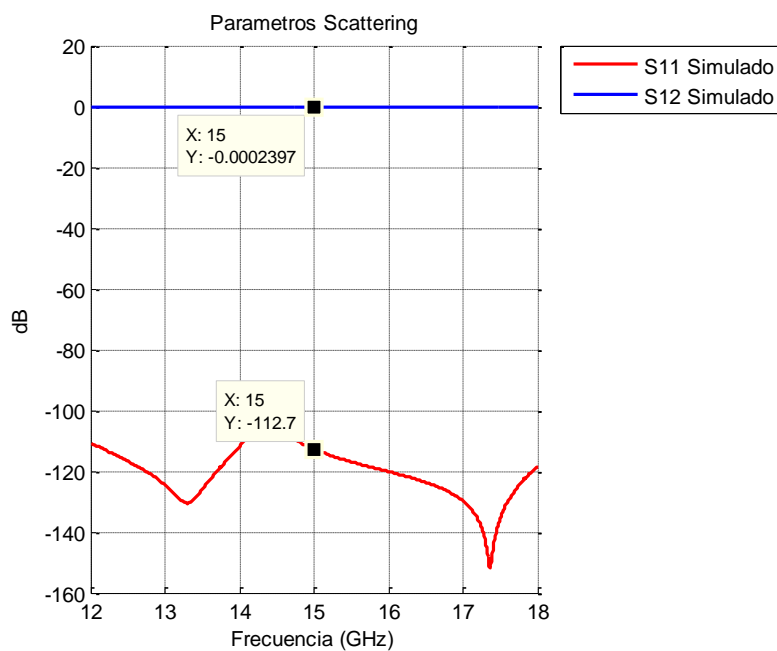
**Tabla 11**  
**Parámetros de Guía de Onda Rectangular Tradicional Banda Ku**

Parámetro	Valor [mm]
Lambda	19.986
Ancho	15.7988
Alto	7.8994



**Figura 76 Guía de Onda Rectangular Banda Ku**  
Fuente: Autor

En la figura 77 se muestran los parámetros *Scattering* de la guía de onda rectangular, trabajando en toda la banda Ku



**Figura 77 Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular en Banda Ku**  
Fuente: Autor

Posterior al proceso de diseño y simulación de la guía de onda tradicional, se procede a realizar la adaptación del Sustrato dieléctrico en la que se implementará la guía de onda SIW.

$$W_{\text{eff}} = \frac{W_{\text{guia}}}{\sqrt{\epsilon}}$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{15.7088\text{mm}}{\sqrt{4.3}}$$

$$W_{\text{eff}} = 7.619 \text{ mm}$$

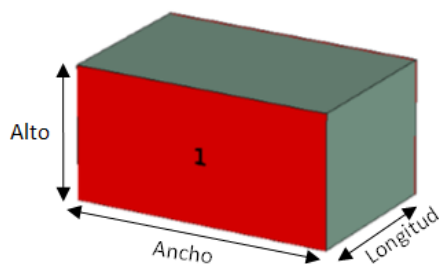
$$\lambda_s = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon}}$$

$$\lambda_s = \frac{19.986 \text{ mm}}{\sqrt{4.3}}$$

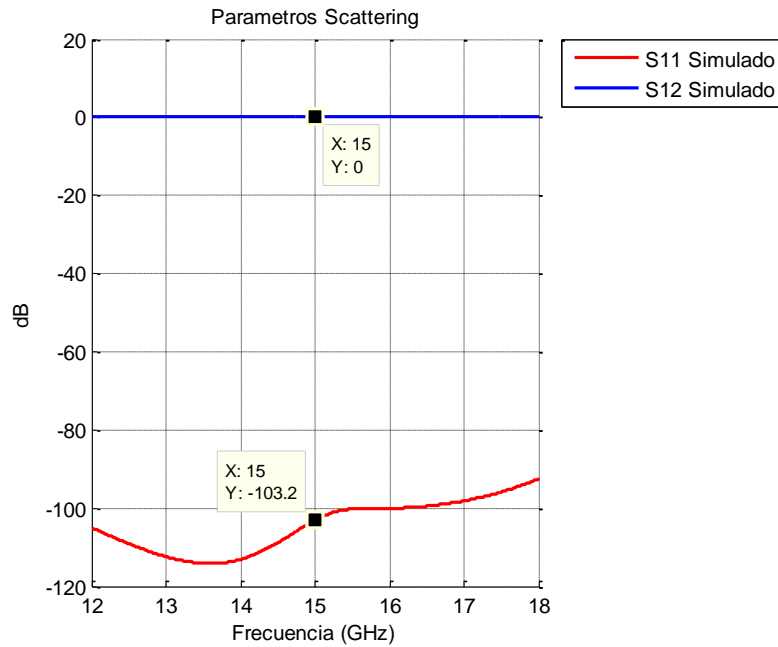
$$\lambda_s = 9.638 \text{ mm}$$

**Tabla 12**  
**Parámetros de Guía de Onda Rectangular con Sustrato Banda Ku**

Parámetro	Valor [mm]
Lambda	9.638
Ancho	3.809
Longitud	$\lambda_s/2$



**Figura 78** Guía SIW Rectangular con Sustrato en Banda Ku  
Fuente: Autor



**Figura 79 Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular con Sustrato en Banda Ku**

Fuente: Autor

En la Figura 79 se observa los parámetros *Scattering* de la guía de onda rectangular con sustrato en banda Ku.

Con la guía de onda tradicional en Sustrato, se procede a realizar el paso a SIW, tomando en cuenta los parámetros intrínsecos, mediante cálculos encontramos la nueva dimensión del ancho de la guía SIW.

$$W_{SIW} = W_{eff} + \frac{d^2}{0.95 * b}$$

$$W_{SIW} = 7.619(\text{mm}) + \frac{(0.6\text{mm})^2}{0.95 * 1.2(\text{mm})}$$

$$W_{SIW} = 7.829 \text{ mm}$$

Se procede a calcular la longitud de onda dentro de la guía de onda SIW.

$$f_{c_{TE10}} = \frac{c}{2 * W_{guia}}$$

$$f_{c_{TE10}} = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{m}{s}}{2 * 15.7988mm}$$

$$f_{c_{TE10}} = 9.488 \text{ GHz}$$

$$f_{c_{TE20}} = \frac{c}{W_{guia}}$$

$$f_{c_{TE20}} = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{m}{s}}{15.7988 \text{ mm}}$$

$$f_{c_{TE20}} = 18.976 \text{ GHz}$$

La frecuencia de corte, al ser de 15GHz, está entre las frecuencias de corte máximas y mínimas de los modos de propagación admitidos por la guía de onda SIW; por lo que procedemos a calcular la nueva longitud de onda que se encuentra en la guía de onda SIW.

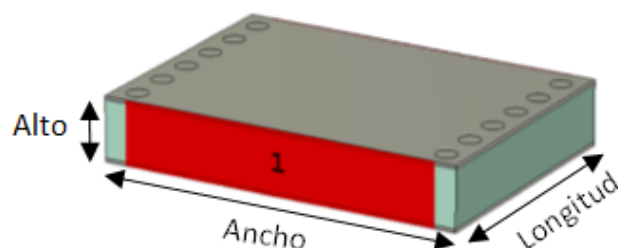
$$\lambda_{TE10} = \frac{\frac{\lambda_c}{\sqrt{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TE10}}}{f_c}\right)^2}}$$

$$\lambda_{TE10} = \frac{\frac{13.475 \text{ mm}}{\sqrt{4.3}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{9.488 \text{ GHz}}{15 \text{ GHz}}\right)^2}}$$

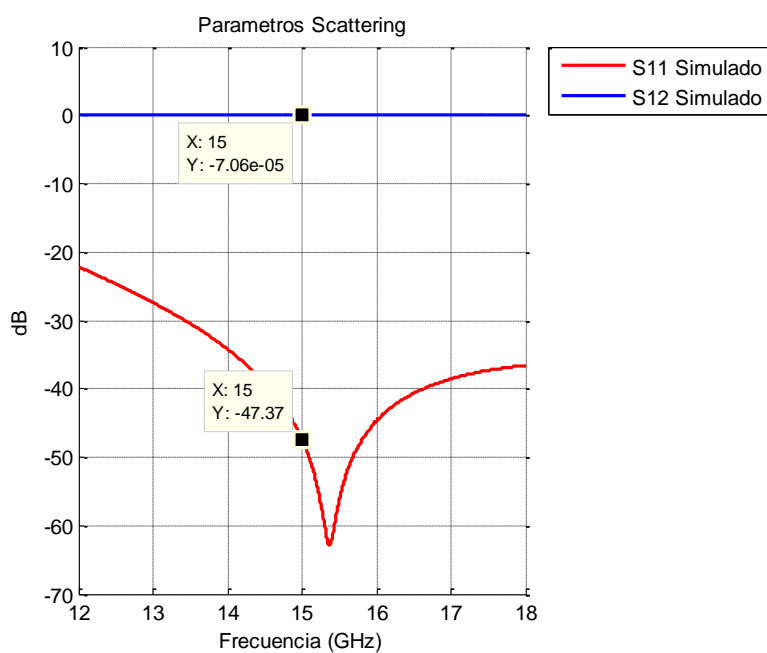
$$\lambda_{TE10} = 12.443709 \text{ mm}$$

**Tabla 13**  
**Parámetros de Guía SIW Banda Ku**

Parámetro	Valor [mm]
Lambda	12.443709
Ancho	7.829
Alto	1.6
Longitud	Lambda/2



**Figura 80** Guía de Onda en SIW para Banda Ku  
Fuente: Autor



**Figura 81** Parámetros Scattering de Guía SIW Banda Ku  
Fuente: Autor

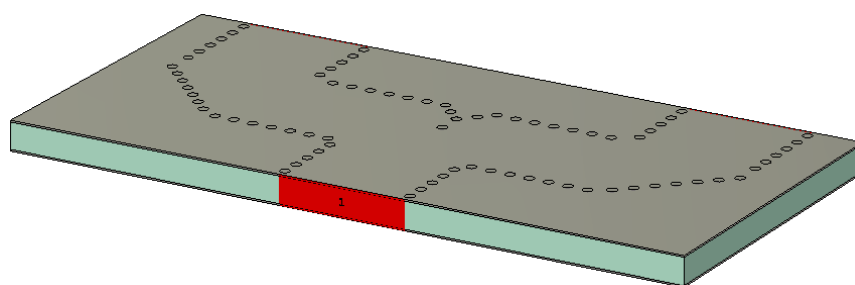
En la figura 81, se muestran los parámetros *Scattering* de la guía de onda SIW, en banda Ku. Una vez obtenida la guía de Onda SIW, adecuada para la banda Ku trabajando en 15GHz, seguimos un diseño idéntico al realizado con el divisor de 10GHz, hasta obtener el divisor diseñado y optimizado en todas sus partes, empezando con los codos, biselado, truncamiento y para finalizar las vías a una distancia de acoplamiento.



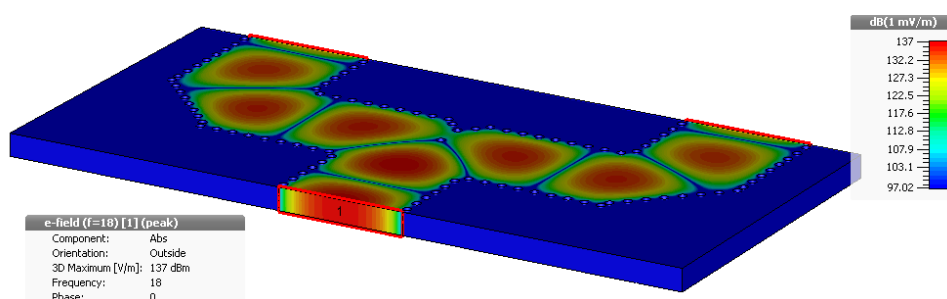
Las medidas y dimensiones diseñadas para el divisor son expresadas en la tabla 14.

**Tabla 14**  
**Parámetros de Diseño en el Divisor en banda Ku**

Parámetro	Valor [mm]
Lambda	12.443709
Wsiw	7.829
x	2.2896002469621
z	2.0837151540699
Distancia de Acoplamiento	1.5572006374934



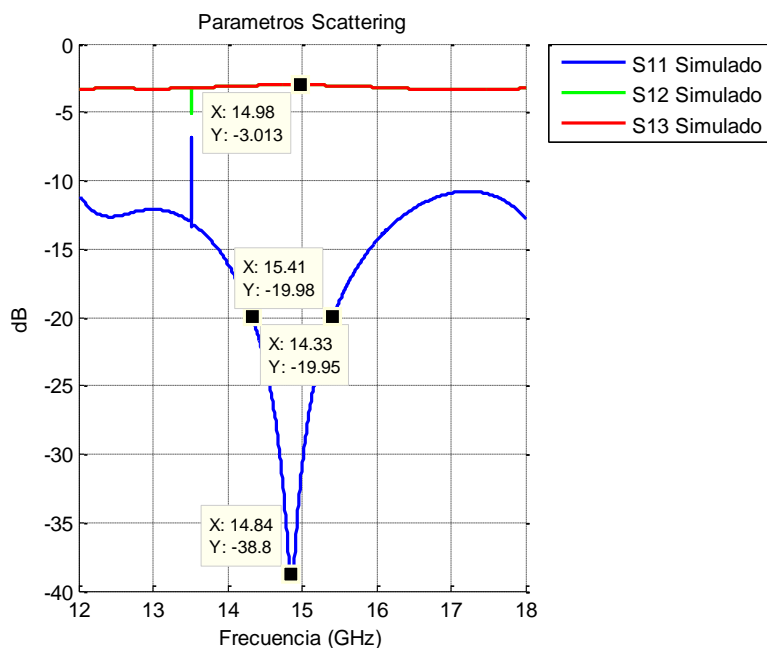
**Figura 82** Divisor de Potencia Tipo T Truncado en banda Ku  
Fuente: Autor



**Figura 83** Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncado  
Fuente: Autor

En la Figura 84 se observa que el divisor de potencia Tipo T Truncado, funciona en la frecuencia central de 15GHz, y las potencias en sus puertos de salida están alrededor de los -3dB,

en la que fue diseñado y a su vez se observa que el ancho de banda es de 1.08 GHz o el 18.5% de toda la banda.



**Figura 84** Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncado

Fuente: Autor

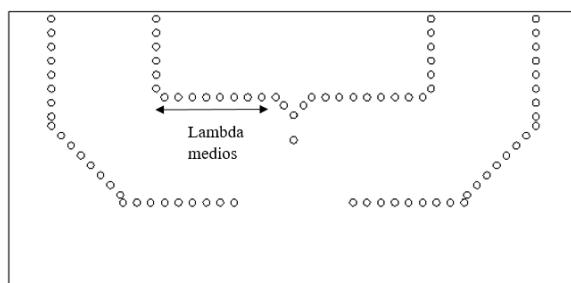
$$AB\% = \left( \frac{15.41 - 14.33}{15} \right) * 100$$

$$AB\% = 7.2\%$$

#### 4.6.1. Escalamiento para un Divisor de 8 Puertos

Para realizar el escalamiento del divisor de potencia tipo T truncado con 8 puertos de salida, al igual que el escalamiento del divisor de 4 Puertos, se utiliza como base principal el divisor de 2 salidas.

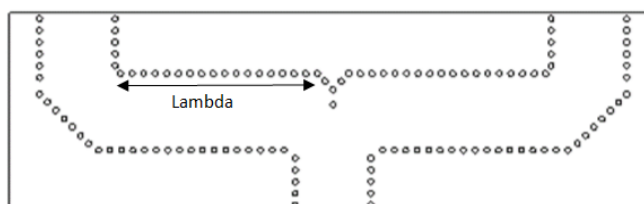
Los divisores de potencia de longitud lambda medios, serán los ramales de salida del nuevo prototipo, se necesitarán 4 divisores de longitud lambda medios, para así obtener las 8 salidas del divisor, para los siguientes ramales se utilizó 2 divisores de longitud lambda. Y para el ramal de la entrada se utiliza un divisor de longitud cinco lambda medios.



**Figura 85 Divisor de Potencia de longitud Lambda Medios**

Fuente: Autor

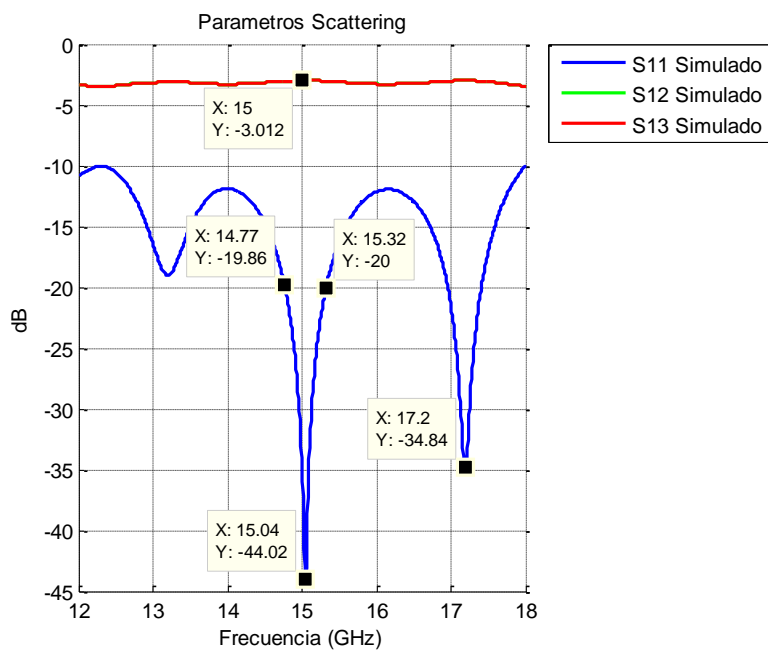
En la Figura 86 se muestra el divisor de longitud lambda, utilizado en uno de los ramales del divisor final de 8 puertos.



**Figura 86 Divisor de Potencia de longitud Lambda**

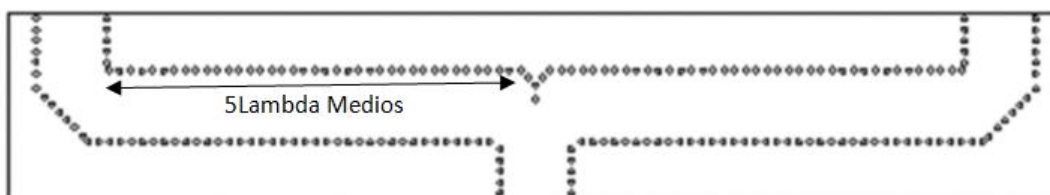
Fuente: Autor

En la Figura 87, observamos los parámetros *Scattering* del divisor de longitud lambda, en el que se observa en trabajo en doble banda, la frecuencia principal que es de 15.04GHz, y la segunda de 17.2GHz y con un ancho de banda de 550MHz en la frecuencia diseñada.



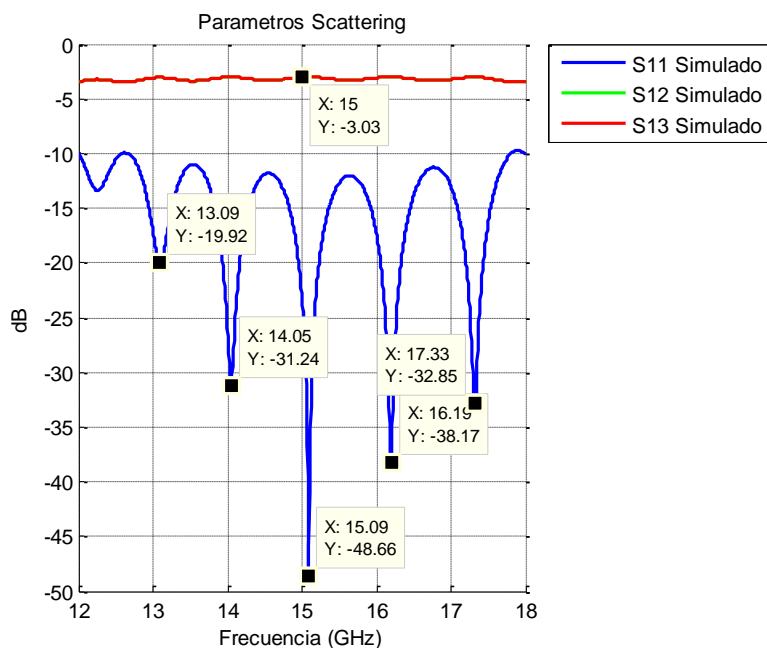
**Figura 87** Parámetros Scattering de Divisor de Potencia de Longitud 3 Lambda Medios  
Fuente: Autor

En la Figura 88 se muestra el divisor de longitud 5 lambda medios, utilizado en el ramal del divisor final de 8 puertos.



**Figura 88** Divisor de Potencia de longitud 5 Lambda Medios  
Fuente: Autor

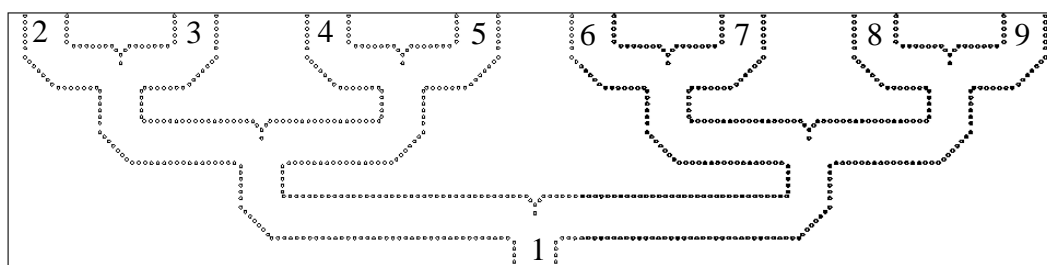
En la Figura 89, observamos los parámetros *Scattering* del divisor de longitud lambda, en el que se observa en trabajo en multi banda, la frecuencia principal que es de 15.09GHz.



**Figura 89** Parámetros Scattering de Divisor de Potencia de longitud 5 Lambda Medios  
Fuente: Autor

Analizando el resultado de los parámetros *Scattering* del divisor de potencia de longitud 7 lambda medios mostrados en la figura 89, se observa que aparte de trabajar en la frecuencia central de 15.09GHz, tiene una frecuencia de resonancia cerca de los 13.09GHz, 14.05GHz y 16.19GHz y 17.3GHz, lo cual es muy favorable ya que este dispositivo se transformaría en un divisor de potencia de multi banda.

Uniendo los diseños parciales, se forma el Divisor de potencia Tipo T Truncado, para banda Ku, como indica la figura 90.



**Figura 90** Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas  
Fuente: Autor

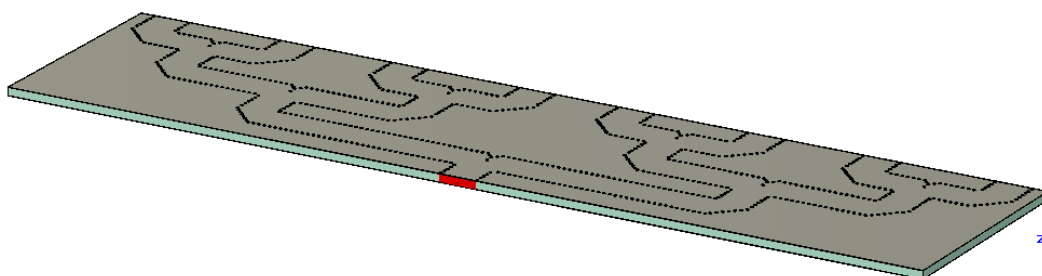
Los valores de los parámetros en los puertos de salida cambiarían, al ser un divisor de 8 salidas, por lo que su valor ideal sería de:

Siendo N, en número de puertos de salida del divisor.

$$\text{Coupling} = -10 * \log N$$

$$\text{Coupling} = -10 * \log 8$$

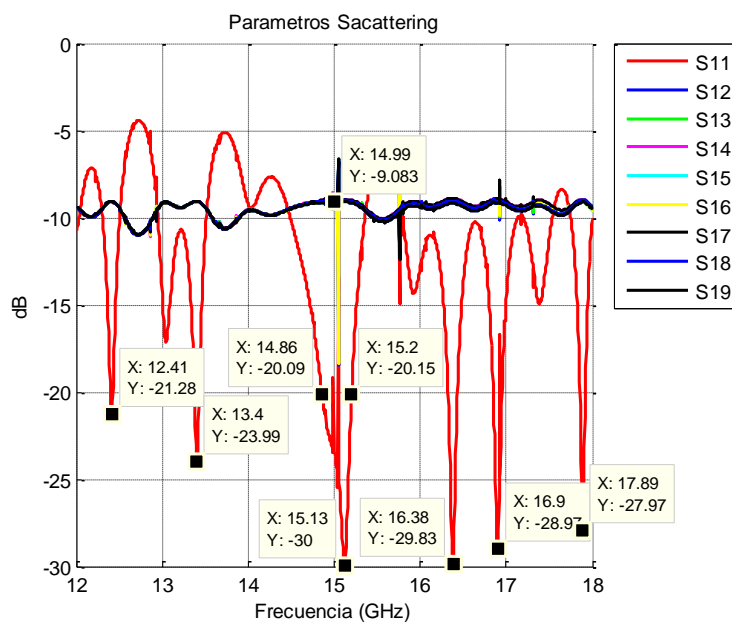
$$\text{Coupling} = -9.0308$$



**Figura 91** Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en 3D

Fuente: Autor

En la Figura 92, se observa los parámetros *Scattering* del divisor de 8 puertos simulado, observando un desempeño ideal en la frecuencia de 15GHz a la que fue diseñado



**Figura 92** Parámetros Scattering de Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas

Fuente: Autor

Una vez escalado el diseño a un divisor de 8 puertos, observamos que los parámetros *Scattering* presentan un excelente desempeño, logrando en sus puertos de salida un valor de -9.083 representando un octavo de la potencia de entrada, y en el parámetro S11, se observa en la Figura 92, una respuesta en seis frecuencias, 15.13GHz, que es la frecuencia central, y en 12.41 GHz, 13.4 GHz, 16.38 GHz, 16.9 GHz y 17.89 GHz, las que son consideradas frecuencias de trabajo secundarias, haciendo de este dispositivo, un Divisor de Potencia Tipo T truncado ideal para 6 bandas de frecuencia.

Su ancho de banda central es de 340 MHz, lo cual representa el 2.267 % de toda la banda.

$$AB\% = \left( \frac{15.2 - 14.86}{15} \right) * 100$$

$$AB\% = 2.267\%$$

#### 4.6.2. Transición tipo Taper en 15GHz

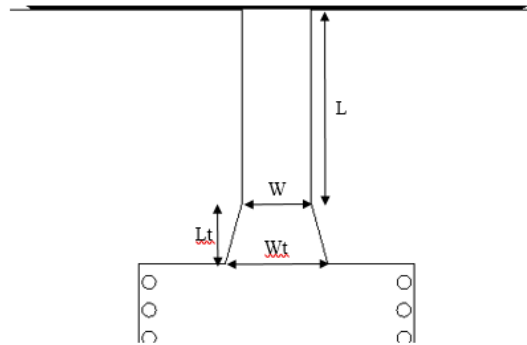
**Tabla 15**  
**Parámetros del Sustrato FR4 en transición**

Parámetros del Sustrato	Valor
Constante Dieléctrica ( $\epsilon$ )	4.3
Alto del Sustrato (h)	1.6 mm
Frecuencia	15 GHz

**Tabla 16**  
**Parámetros de Transición tipo Taper en 15GHz**

Parámetro	Valor [mm]
Ancho (W)	2.9545
Largo (L)	11.066448

La siguiente parte fundamental para realizar la transición es el trapecio de conductor que conecta con el dispositivo SIW, por lo que se procede al cálculo del ancho y el largo del trapecio.



**Figura 93 Transición tipo Taper en banda Ku**  
Fuente: Autor

$$\frac{W_t}{W_{siw}} \cong 0.4$$

$$W_t \cong 0.4 * W_{siw}$$

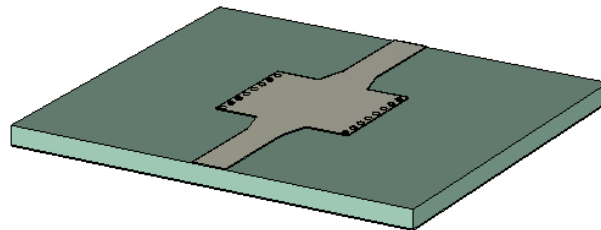
$$W_t \cong 0.4 * 7.829$$

$$W_t \cong 3.1316$$

$$\frac{\lambda_s}{2} < L_t < \lambda_s$$

Siendo  $\lambda_s$  la longitud de onda que se propaga dentro de la guía de onda SIW.

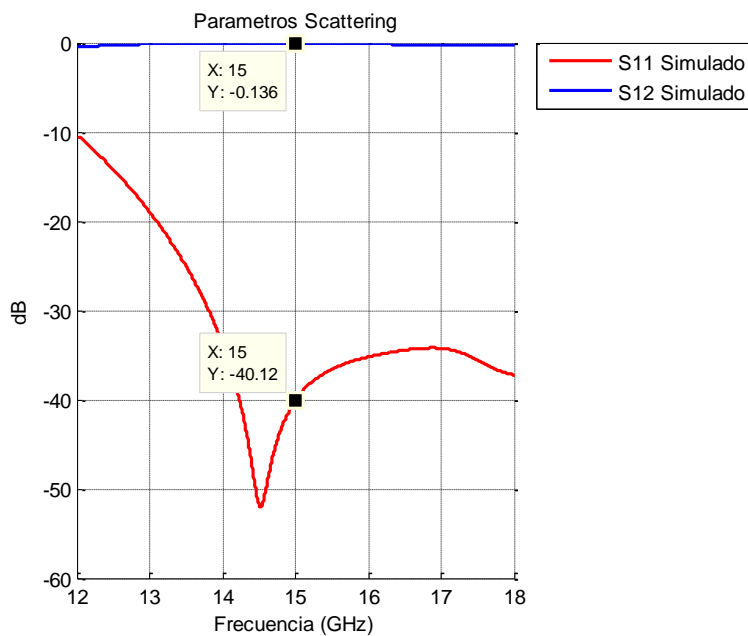
Distancias a que se aplica un proceso de optimización de dos variables, obteniendo los valores de  $W_t = 5$  y  $L_t = 1$



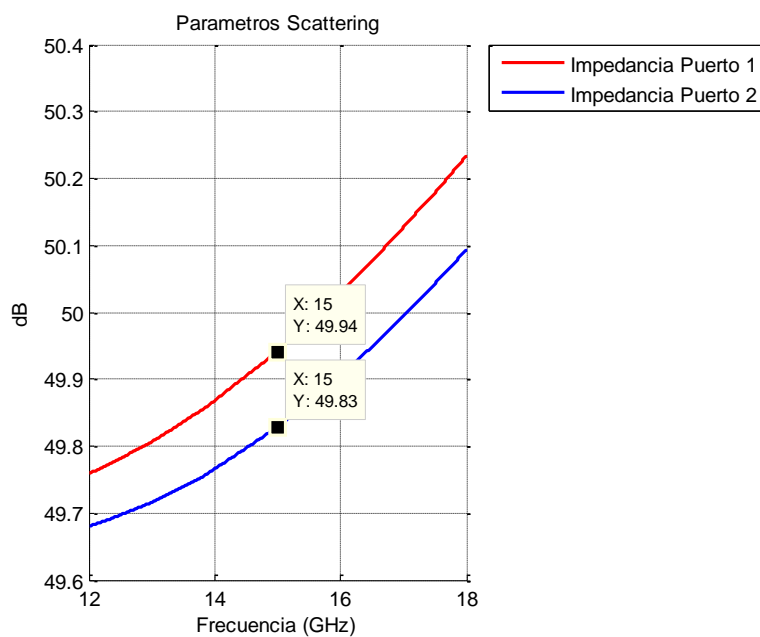
**Figura 94 Transición en SIW Banda Ku**  
Fuente: Autor



Con esta transición se consigue en toda la banda un Parámetro S11 menor a -20dB. Como se observa en la Figura 95.

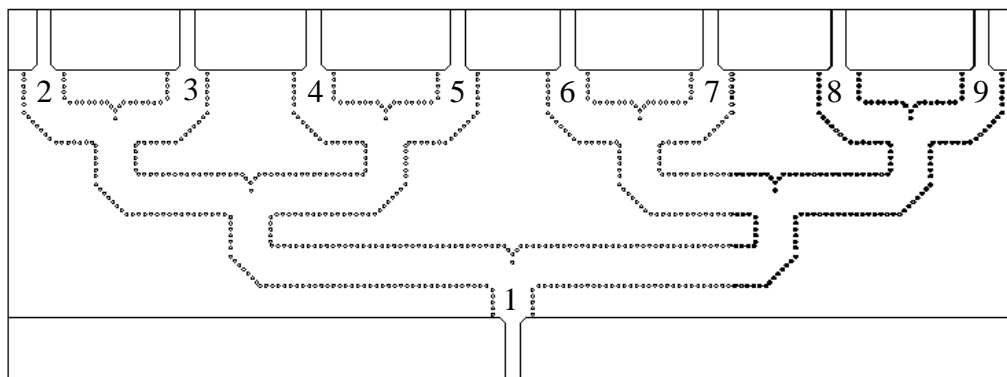


**Figura 95** Parámetros Scattering de guía SIW con transición  
Fuente: Autor

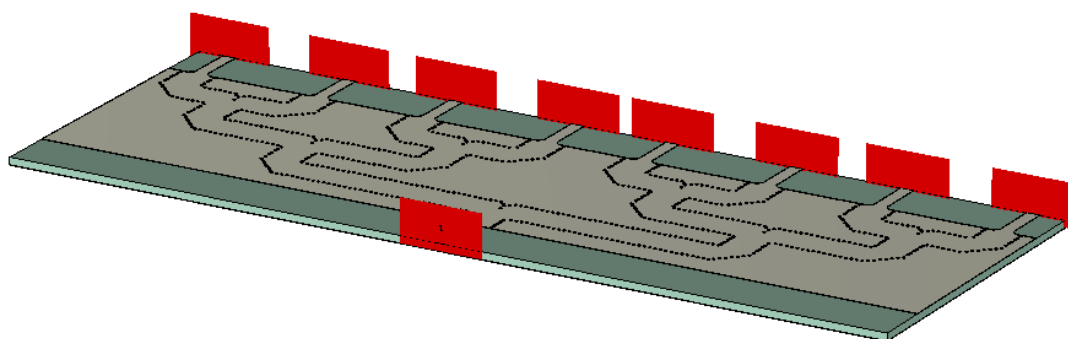


**Figura 96** Impedancia de Guía SIW con Transición Banda Ku  
Fuente: Autor

Al estar completamente acoplado el diseño de la guía de onda SIW a una impedancia de  $50\Omega$  como se observa en la Figura 96, se implementa las transiciones en el diseño del divisor de potencia tipo T truncada de 8 puertos como se muestra en las Figuras 97 y 98.

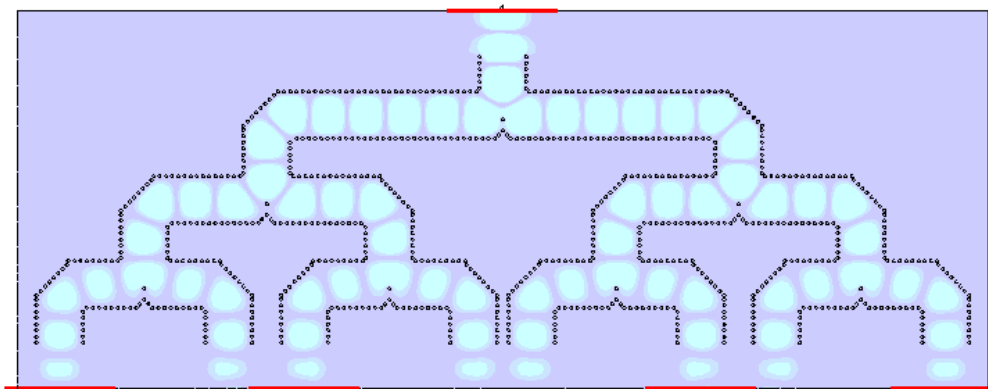


**Figura 97** Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda Ku  
Fuente: Autor



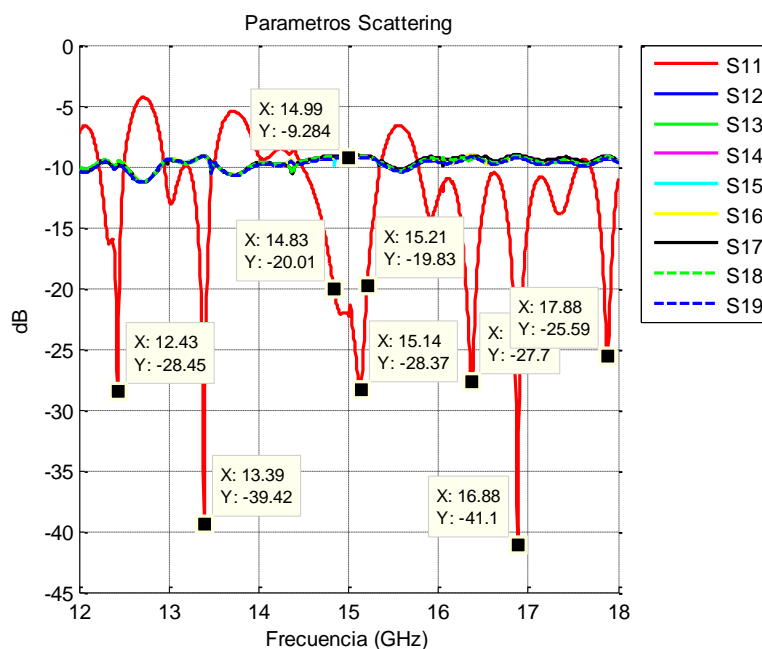
**Figura 98** Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda Ku en 3D  
Fuente: Autor

La propagación del campo eléctrico se observa en la Figura 99, el cual indica una propagación uniforme tanto en magnitud como en fase.



**Figura 99 Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda Ku**  
Fuente: Autor

Una vez simulado el diseño final del divisor de potencia tipo T truncada para banda Ku, podemos observar los parámetros *Scattering* en la Figura 100.



**Figura 100 Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K**  
Fuente: Autor

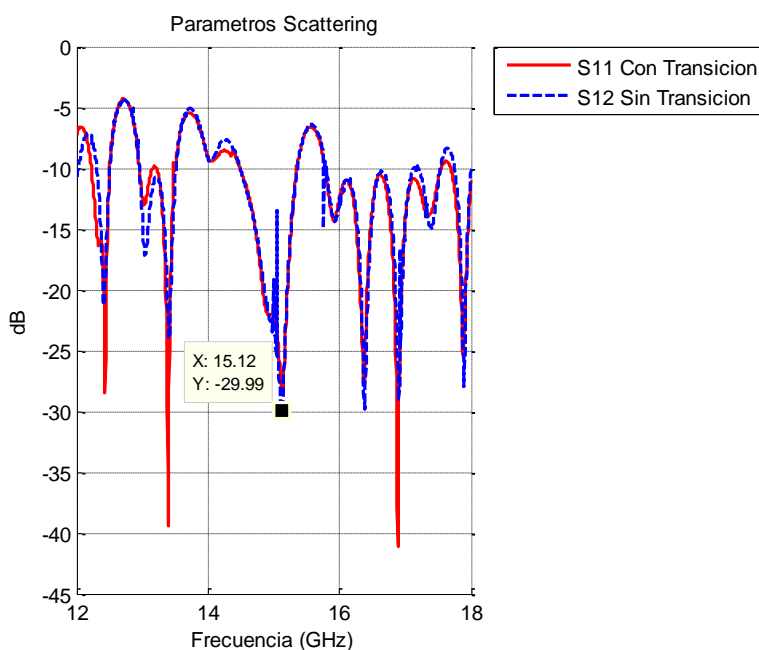
Analizando el resultado de la simulación podemos observar en la Figura 100 que está trabajando correctamente en la banda Ku, siendo 15.14GHz su frecuencia central y con frecuencias secundarias de 12.43GHz, 13.39GHz, 16.37GHz, 16.88GHz, y 17.88GHz

El ancho de banda en la frecuencia diseñada es de 380MHz, lo que representa el 2.533% de toda la banda.

$$AB\% = \left( \frac{15.21 - 14.83}{15} \right) * 100$$

$$AB\% = 2.533 \%$$

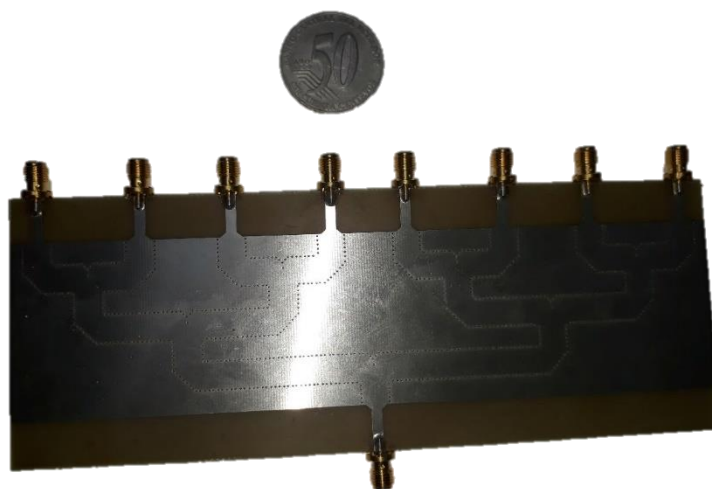
Una vez que se obtuvo los resultados en el divisor de potencia tipo T truncada, se realiza una comparación de los parámetros *Scattering* obtenidos del divisor con transición y sin transición, los cuales se observa en la Figura 101.



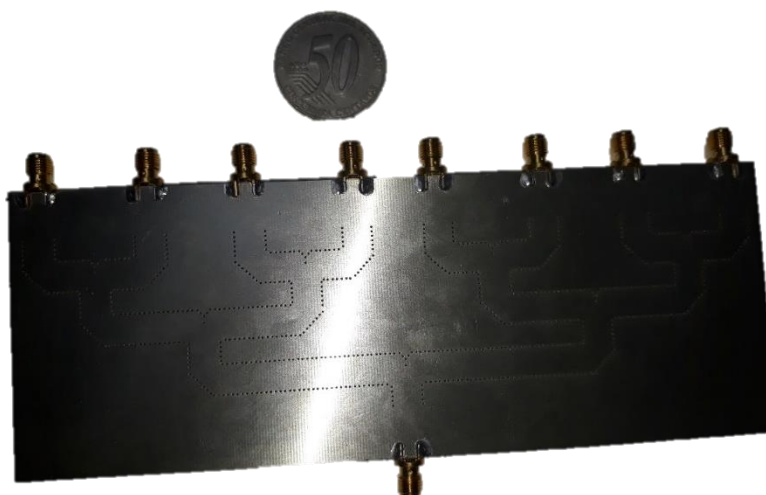
**Figura 101 Comparación de Resultados Con Transición y Sin Transición Banda K**  
Fuente: Autor

### 4.6.3. Construcción en Sustrato

Mediante el mismo procedimiento explicado en el divisor para banda X, se realiza la construcción del dispositivo en Sustrato FR4. Los dispositivos implementados se muestran en las Figuras 102 y 103.



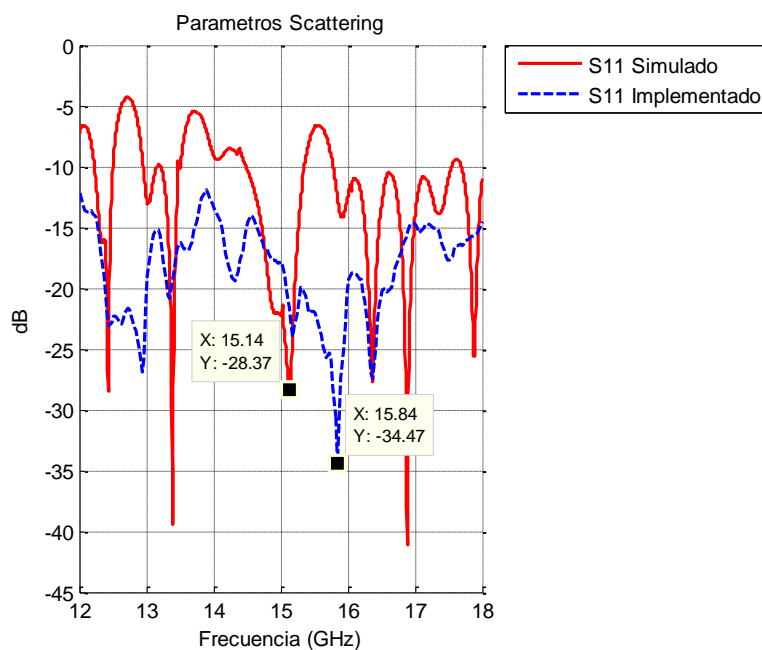
**Figura 102** Divisor Tipo T Truncado de 8 Salidas Implementado Vista Posterior  
Fuente: Autor



**Figura 103** Divisor Tipo T Truncado de 8 Salidas Implementado Vista Anterior  
Fuente: Autor

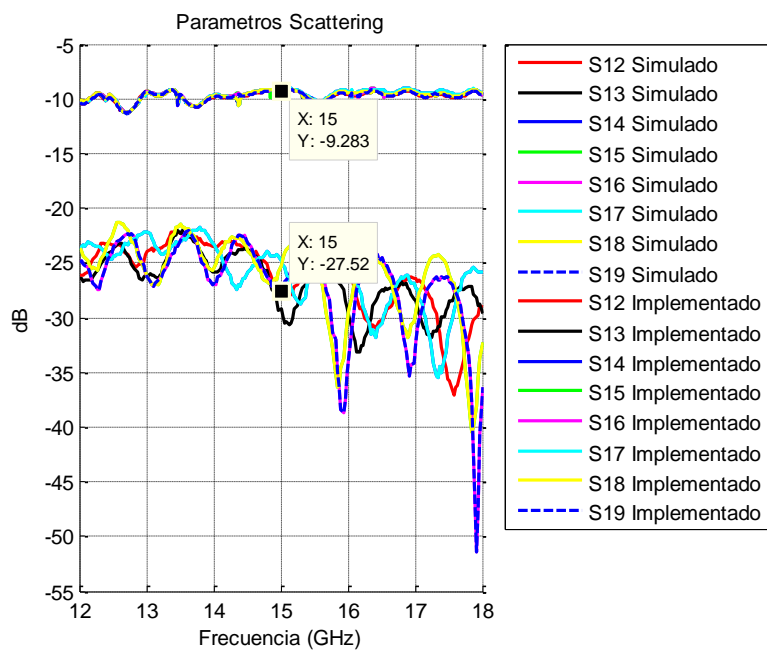
Con el divisor de potencia tipo T Truncado construido, se procede a realizar las mediciones de los parámetros *Scattering*, para así, realizar una comparación con los resultados obtenidos en

simulación. Esta comparación se observa en la Figura 104, para el parámetro S11, en la Figura 105 para los parámetros S de salida, y en las figuras 106 se aprecia la comparación entre las fases del divisor.

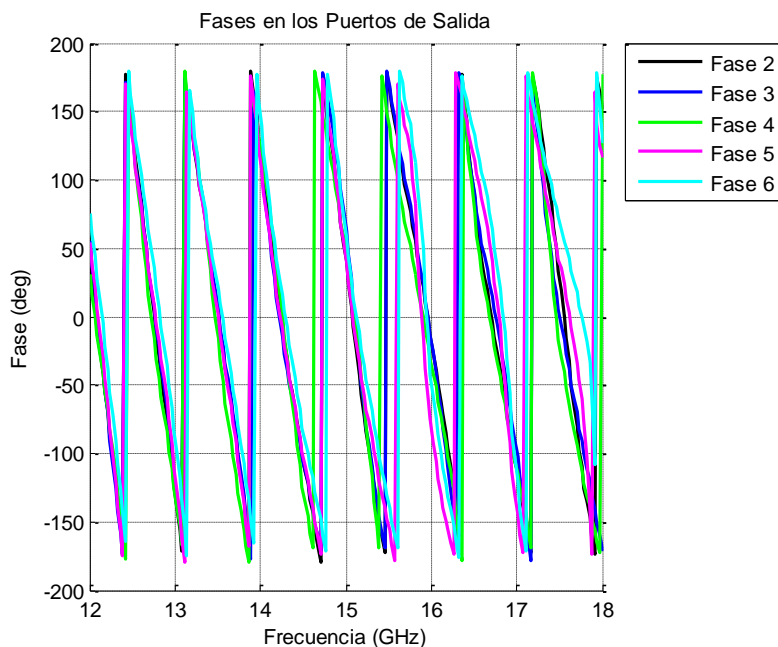


**Figura 104 Comparación de Resultados en Parámetros S11 Simulado vs Medido en Banda Ku**

Fuente: Autor



**Figura 105 Comparación de Resultados en los Puertos de Salida Simulado vs Medido en Banda Ku**  
Fuente: Autor



**Figura 106 Fases en Los Puertos de Salida Medidos**  
Fuente: Autor

#### 4.6.4. Resultados

Una vez realizadas las mediciones de los parámetros *Scattering* para el divisor de 8 Puertos, se realizó una comparativa entre el diseño con transición y sin transición como se observa en la Figura 101 aquí observamos el comportamiento del parámetro S11, el que tiene una similitud en los dos dispositivos, trabajando en la frecuencia central de 18GHz y teniendo un ancho de banda de aproximadamente 360 MHz, y trabajando en las frecuencias secundarias de 15.02, 15.62, 18, 19.31 y 19.98GHz.

Analizando los resultados del divisor de 8 puertos implementado, en las figuras 104 y 105, se observa que: El comportamiento del parámetro S11 es adecuado, pero presentando un desplazamiento en frecuencia debido a la construcción, obteniendo un ancho de banda aproximado de 900MHz, trabajando a una frecuencia central de 15.84 GHz. En las mediciones de los puertos de salida del divisor observamos que todos los puertos de salida tienen el mismo comportamiento en su señal, con el problema de las pérdidas, las cuales son producidas por el sustrato utilizado, en este diseño al ser más grande y con mayor cantidad de discontinuidades que en el divisor de 4 puertos diseñado en la sección anterior el porcentaje de pérdidas es mayor, llegando a los 16 o 18 dB de pérdidas, a las vez la frecuencia tiene una gran influencia en el desempeño de los parámetros *Scattering* en los puertos de salida, ya que a una mayor frecuencia de trabajo las pérdidas por el material van a ser mayores, esto lo podemos evidenciar en los parámetros *Scattering* mostrados en la Figura 105, ya que tienen una pendiente negativa conforme la frecuencia incrementa.

Las soluciones que se proponen a este tipo de problemas por las pérdidas en el material es la conexión de amplificadores de RF en la salida del divisor, llegando así a valores óptimos e ideales para diferentes aplicaciones, compensando así la pérdida de la potencia. Otra solución a este tipo de problemas es realizar el diseño e implementación en sustratos de mejor calidad y prestaciones, por ejemplo, el sustrato Roger RT 5880, el cual trabaja adecuadamente en frecuencias de hasta 40GHz, presentando una constante dieléctrica muy baja, lo cual es ideal para la propagación de ondas electromagnéticas.



En el siguiente diseño se presenta la simulación de un divisor de Potencia tipo T Truncado, en la banda K, trabajando en una frecuencia central de 18GHz, en el sustrato Roger RT 5880.

#### 4.7 Consideraciones de Diseño Para Banda K

Los cálculos de los parámetros del divisor de potencia tipo T truncado para la banda K en 18GHz, son los mismos que se aplicaron en el diseño del divisor en banda X y Ku, con un cambio en el Sustrato a utilizar, por lo que en esta sección se presenta las fórmulas y resultados de las simulaciones correspondientes.

El Sustrato utilizado en el diseño del Divisor de Potencia Tipo T Truncado para la banda K es el ROGER RT DUROID 5880, su principal característica que influye en el diseño es la constante dieléctrica, que es 2.2. La frecuencia central de trabajo  $f_c$  será de 18GHz.

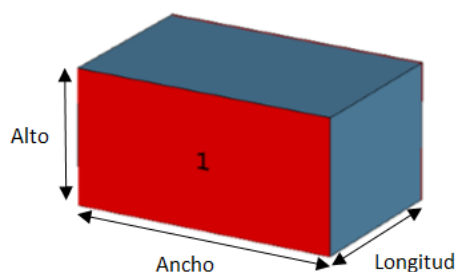
$$\lambda = \frac{c}{f_c}$$

$$\lambda = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{m}{s}}{18 \text{ GHz}}$$

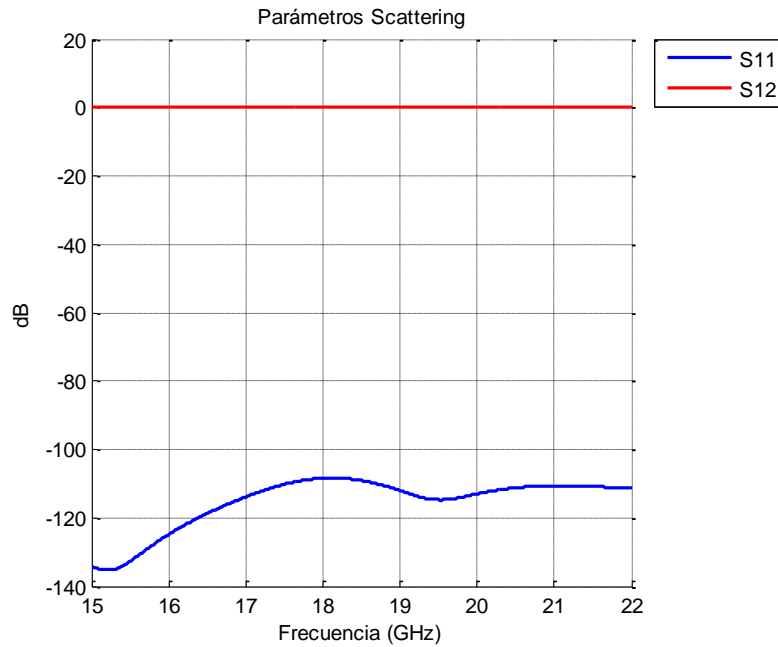
$$\lambda = 16.655 \text{ mm}$$

**Tabla 17**  
**Parámetros de Guía de Onda Rectangular Tradicional Banda K**

Parámetro	Valor [mm]
Longitud	$\lambda/2$
Ancho	12.954
Alto	6.477



**Figura 107** Guía SIW Rectangular Banda K  
Fuente: Autor



**Figura 108 Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular en Banda K**  
Fuente: Autor

En la figura 108, se observa que la guía de onda diseñada, trabaja en toda la banda con su S11 menor a -100dB.

Posterior al proceso de diseño y simulación de la guía de onda tradicional, se procede a realizar la adaptación del Sustrato dieléctrico en la que se implementará la guía de onda SIW.

$$W_{\text{eff}} = \frac{W_{\text{guía}}}{\sqrt{\epsilon}}$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{12.954 \text{ mm}}{\sqrt{2.2}}$$

$$W_{\text{eff}} = 8.734 \text{ mm}$$

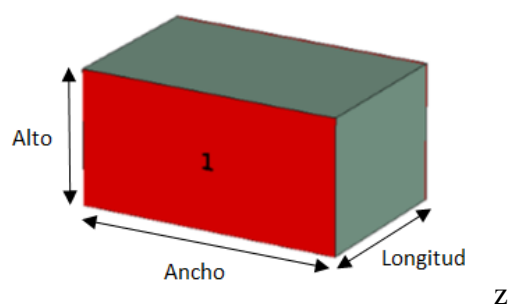
$$\lambda_s = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon}}$$

$$\lambda_s = \frac{16.655 \text{ mm}}{\sqrt{2.2}}$$

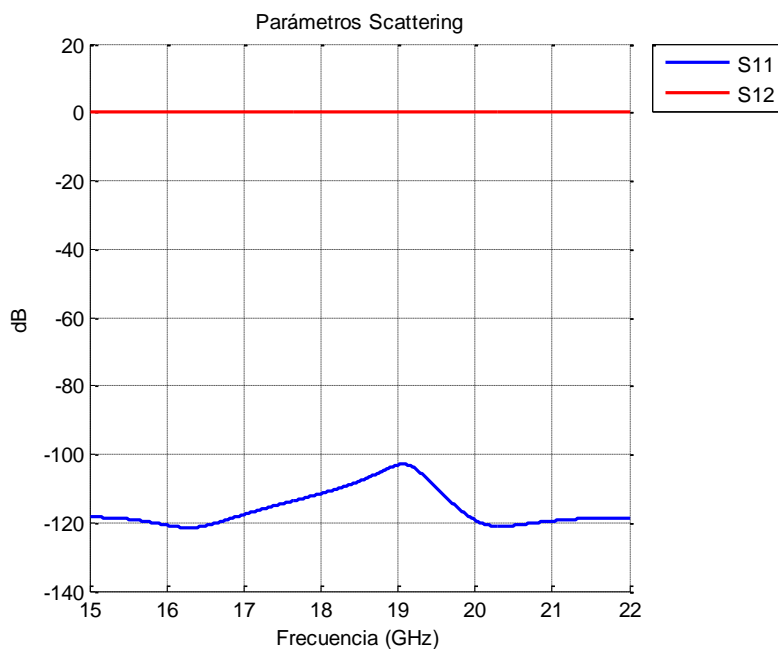
$$\lambda_s = 11.2287 \text{ mm}$$

**Tabla 18**  
**Parámetros de Guía de Onda Rectangular con Sustrato Banda K**

Parámetro	Valor [mm]
Lambda	11.2287
Ancho	8.734
Longitud	$\lambda_s/2$



**Figura 109** Guía SIW Rectangular con Sustrato en Banda K  
Fuente: Autor



**Figura 110** Parámetros Scattering de la Guía de Onda Rectangular con Sustrato en Banda K  
Fuente: Autor

En la figura 110, se observa que la guía de onda en sustrato diseñada, trabaja en toda la banda con su S11 menor a -100dB.

Con la guía de onda tradicional en Sustrato, se procede a realizar el paso a SIW, tomando en cuenta los parámetros intrínsecos revisados anteriormente, y mediante cálculos encontramos la nueva dimensión del ancho de la guía SIW.

$$W_{SIW} = W_{eff} + \frac{d^2}{0.95 * b}$$

$$W_{SIW} = 8.734(\text{mm}) + \frac{(0.6\text{mm})^2}{0.95 * 1.2(\text{mm})}$$

$$W_{SIW} = 9.049 \text{ mm}$$

Se procede a calcular la longitud de onda dentro de la guía de onda SIW.

$$f_{c_{TE10}} = \frac{c}{2 * W_{guia}}$$

$$f_{c_{TE10}} = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * 12.954\text{mm}}$$

$$f_{c_{TE10}} = 11.57 \text{ GHz}$$

$$f_{c_{TE10}} = \frac{c}{W_{guia}}$$

$$f_{c_{TE01}} = \frac{2.9998 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{12.954 \text{ mm}}$$

$$f_{c_{TE01}} = 23.145 \text{ GHz}$$

La frecuencia de corte, al ser de 18GHz, está entre las frecuencias de corte máximas y mínimas de los modos de propagación admitidos por la guía de onda SIW; por lo que procedemos a calcular la nueva longitud de onda que se encuentra en la guía de onda SIW.

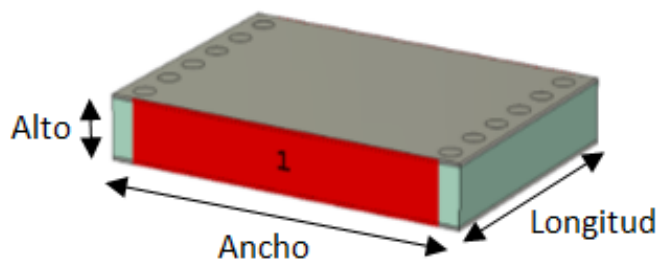
$$\lambda_{TE10} = \frac{\frac{\lambda_c}{\sqrt{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TE10}}}{f_c}\right)^2}}$$

$$\lambda_{\text{TE}_{10}} = \frac{\frac{16.655 \text{ mm}}{\sqrt{2.2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{11.57 \text{ GHz}}{18 \text{ GHz}}\right)^2}}$$

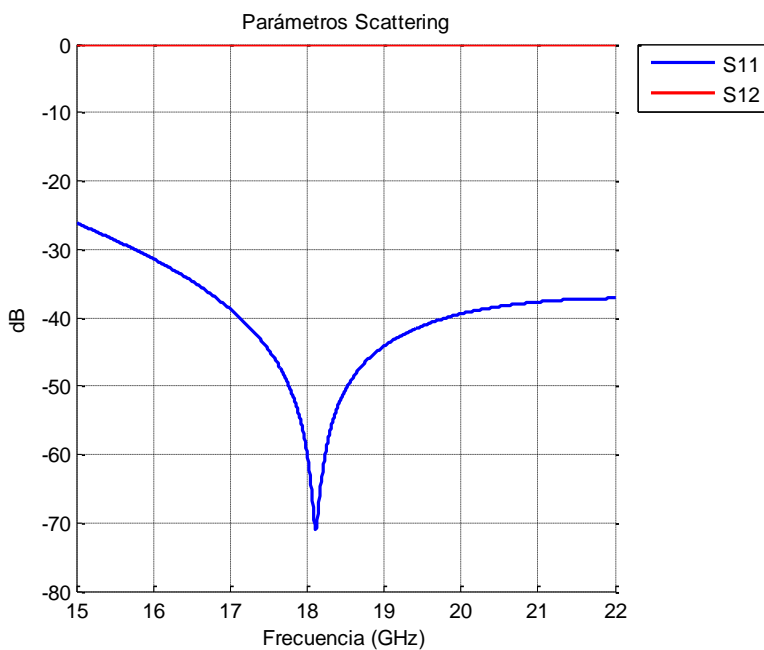
$$\lambda_{\text{TE}_{10}} = 14.6593 \text{ mm}$$

**Tabla 19**  
**Parámetros de Guía SIW Banda K**

Parámetro	Valor [mm]
Lambda	14.6593
Ancho	9.049
Longitud	$\lambda_{\text{TE}_{10}}/2$



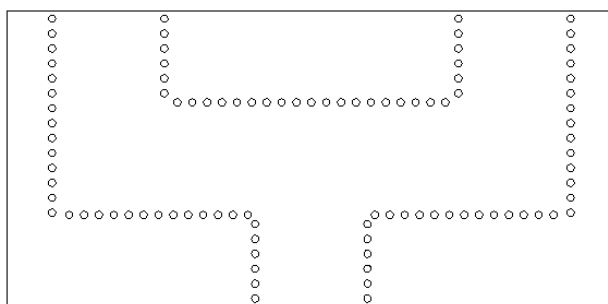
**Figura 111** Guía de Onda en SIW para Banda K  
Fuente: Autor



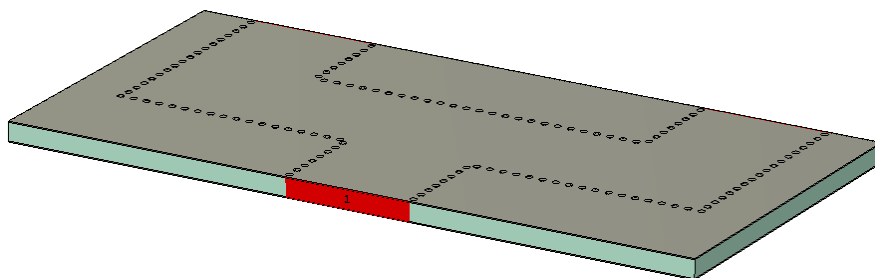
**Figura 112 Parámetros Scattering de Guía SIW Banda K**  
Fuente: Autor

La Figura 112 muestra el S11 y S12 de la guía de onda en SIW, consiguiendo en toda la banda un valor de -20dB y 0 dB en el S12.

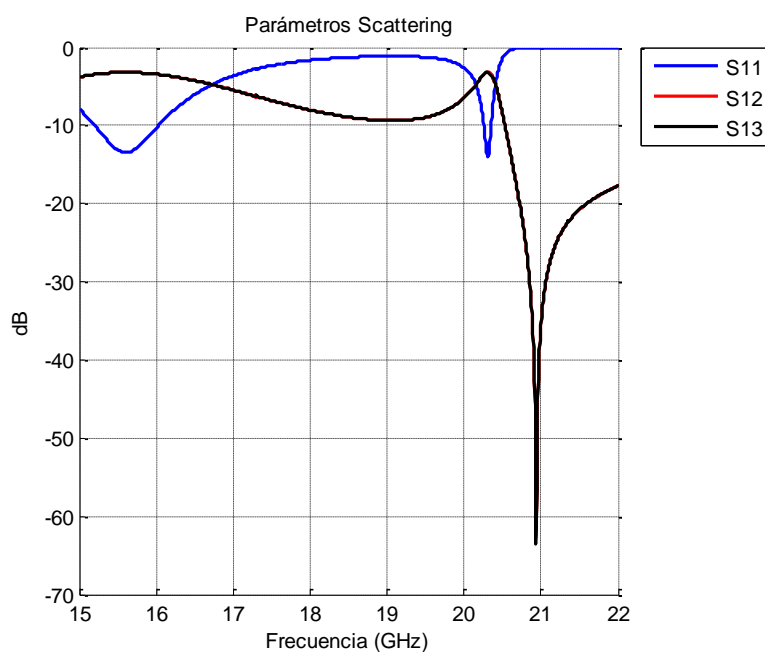
Posterior al diseño de la guía de onda SIW, armamos el divisor T, con dos puertos de salida como su muestra en la Figura 113.



**Figura 113 Divisor de Potencia Tipo T Banda K (1)**  
Fuente: Autor



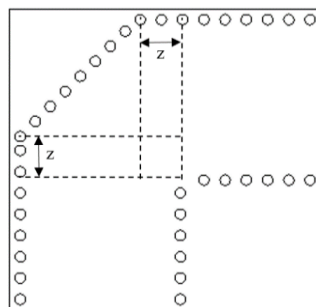
**Figura 114 Divisor de Potencia Tipo T Banda K (2)**  
Fuente: Autor



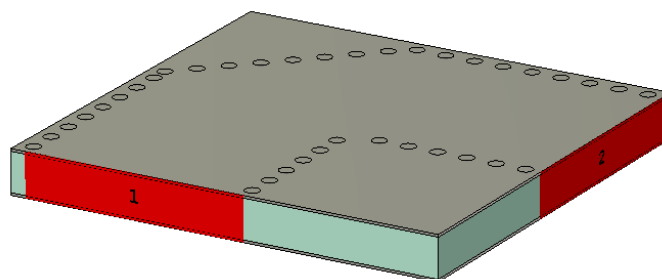
**Figura 115 Parámetros Scattering de Divisor de Potencia Tipo T Banda K**  
Fuente: Autor

Se realizó la simulación de este diseño los que se aprecian en la Figura 115, para posteriormente realizar los biselados en los codos mediante simulaciones paramétricas, variando la distancia “z”, en una distancia de 1 mm por simulación.

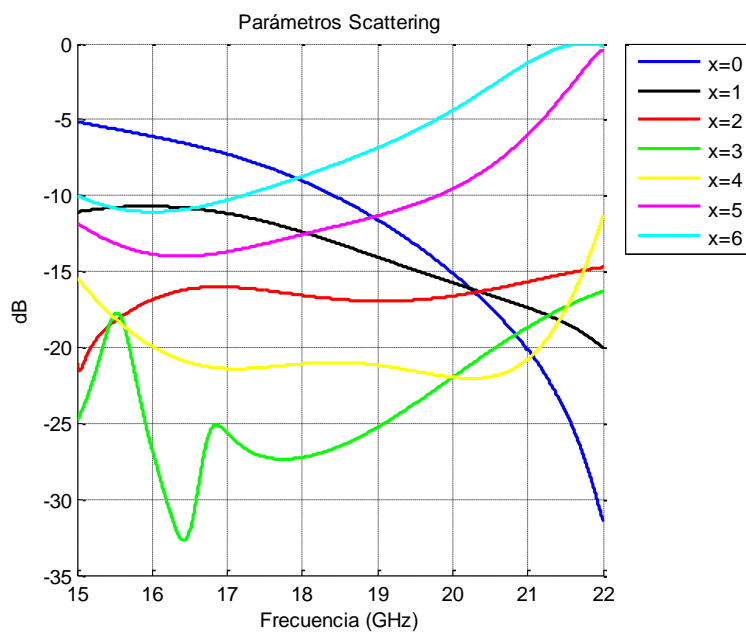
A continuación, en la Figura 116, se muestra el proceso de diseño del codo, y su respectivo resultado de la simulación paramétricas en la Figura 118.



**Figura 116** Diseño de Codo a  $90^\circ$   
Fuente: Autor



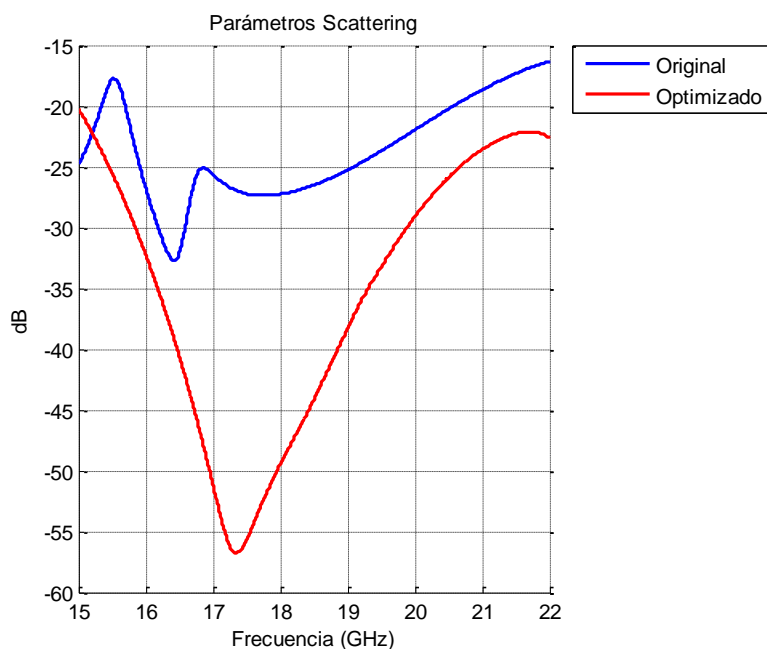
**Figura 117** Codo a  $90^\circ$  en 3D  
Fuente: Autor



**Figura 118** Simulaciones Paramétricas de Codo en Banda K  
Fuente: Autor

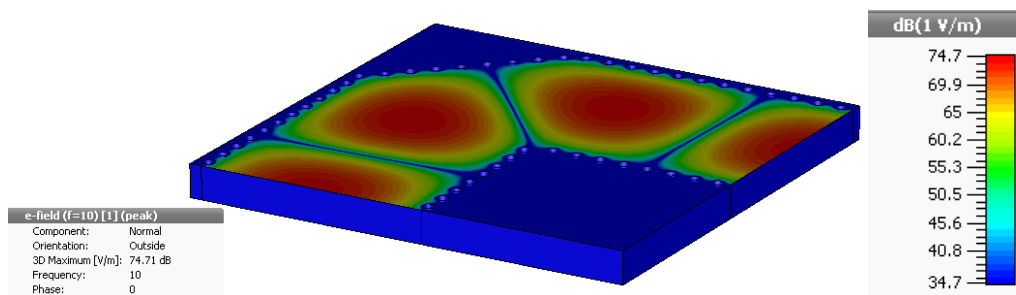


Una vez encontrado en valor de  $z=3\text{mm}$ , en el cual el codo logra un  $S_{11}$  menor a  $-20\text{dB}$ , se procede a realizar una optimización de este valor, mediante el módulo de optimización del programa CST STUDIO SUITE, el que nos arroja un valor de  $z=2.458567493743$ , simulación que la podemos observar en la Figura 119.



**Figura 119 Optimización de Medida de Codo en Banda K**

Fuente: Autor

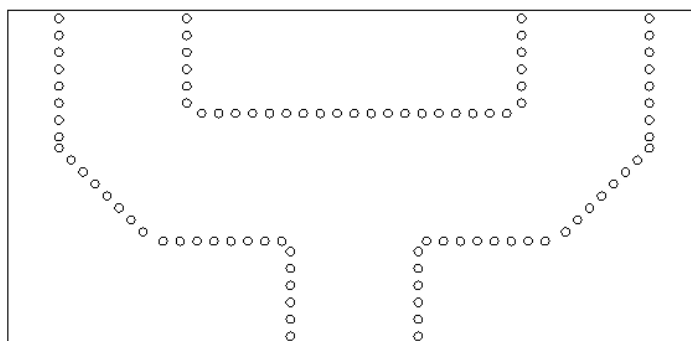


**Figura 120 Propagación de Campo Eléctrico en Codo a 90°**

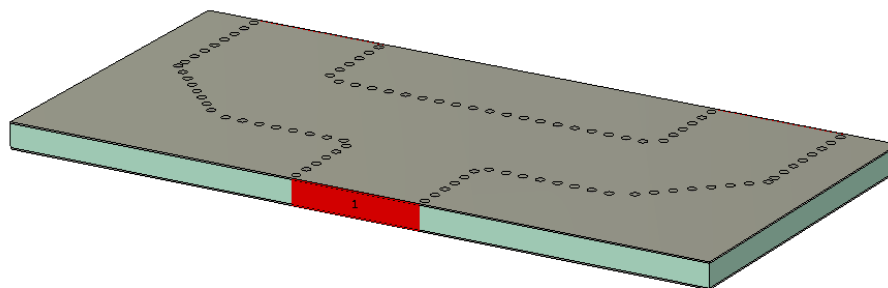
Fuente: Autor

En la Figura 120 se observa la propagación del Campo Eléctrico en el interior del codo diseñado.

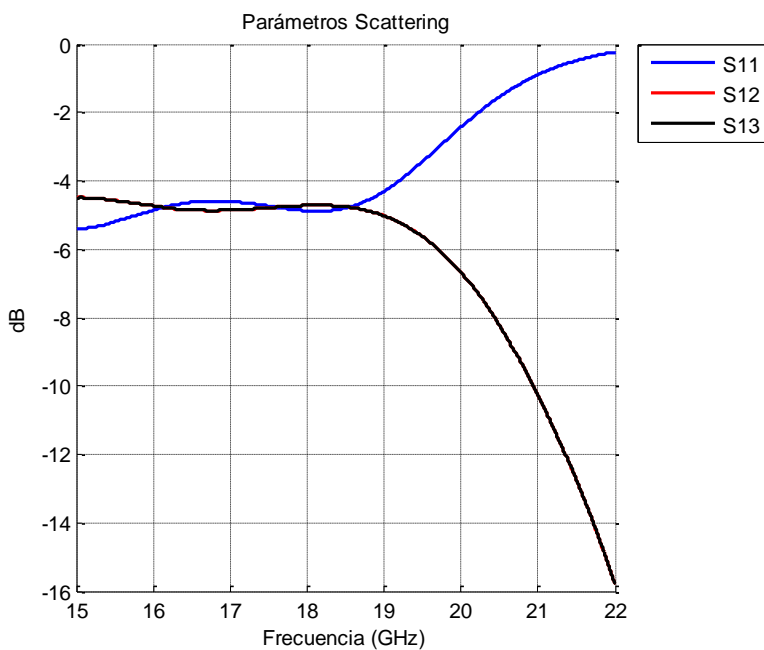
Ahora, se incluye los codos y biselados en el divisor de potencia tipo T como indica la figura 121, para verificar los resultados.



**Figura 121 Divisor de Potencia Tipo T con codos y Biselados**  
Fuente: Autor



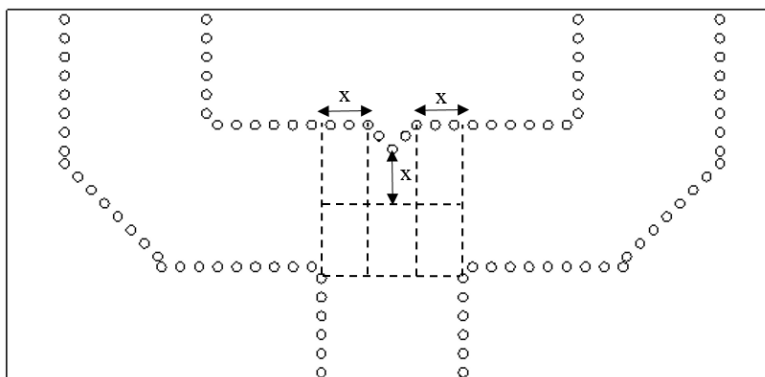
**Figura 122 Divisor de Potencia Tipo T con codos y Biselados en 3D**  
Fuente: Autor



**Figura 123 Parámetros Scattering de Divisor de Potencia Tipo T con codos y Biselados**  
Fuente: Autor

Los resultados de los parámetros *Scattering*, del diseño con codos y biselados esta expresado en la Figura 123

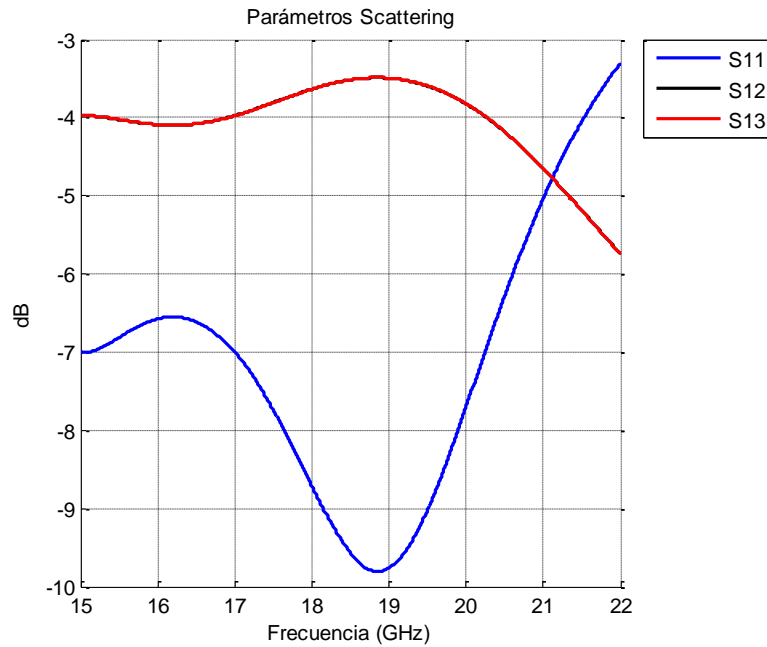
Con el objetivo de mejorar el coeficiente de reflexión (S11), añadimos un truncamiento como se indica en la Figura 124, medida que se la diseña mediante simulaciones paramétricas con variación de 1mm por simulación.



**Figura 124 Truncamiento en Divisor de Potencia Tipo T**  
Fuente: Autor

Obteniendo así un valor de  $x$ , aproximado en los 3mm, para realizar la respectiva optimización en la cual el resultado para  $x$  fue de 2.9793152147117mm.

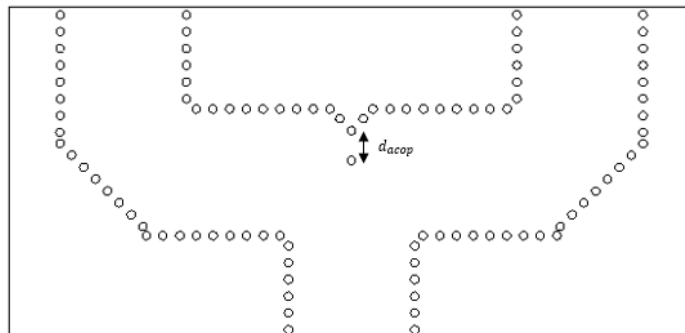
Resultado que podemos observar en la Figura 125



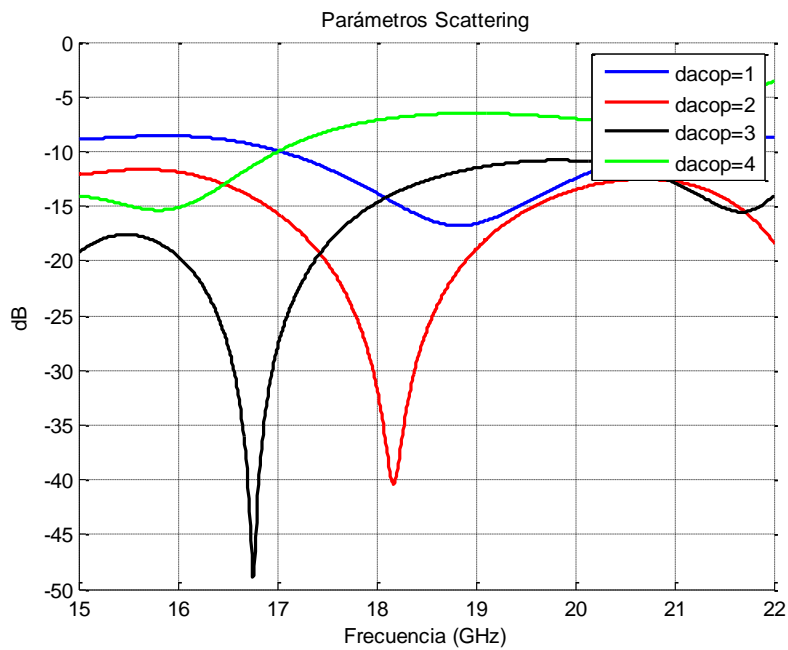
**Figura 125 Parámetros Scattering del Truncamiento del Divisor de Potencia tipo T en banda K**

Fuente: Autor

Como parte final del diseño, añadimos vías de cilindro metalizado a la distancia de acoplamiento ( $d_{acop}$ ), que muestra la Figura 126, y los resultados de este diseño se visualizan en la Figura 127.

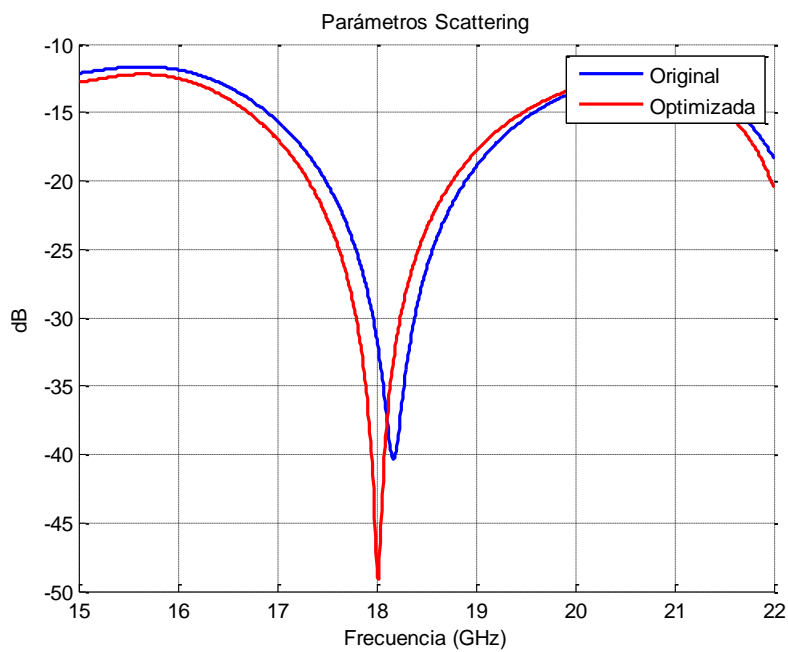


**Figura 126** Distancia de Acoplamiento en Divisor de Potencia Tipo T  
Fuente: Autor



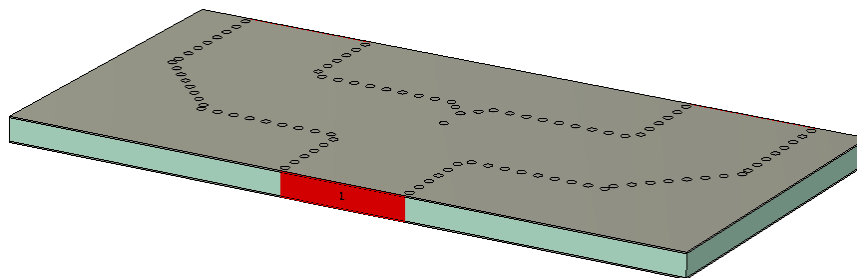
**Figura 127** Simulaciones Paramétricas de Distancia de Acoplamiento  
Fuente: Autor

Observando que el divisor de potencia trabaja en la frecuencia central diseñada, con una distancia de acoplamiento de 2 mm. Dicha distancia de acoplamiento optimizada tiene un valor de 2.784 mm como se muestra en la Figura 128.

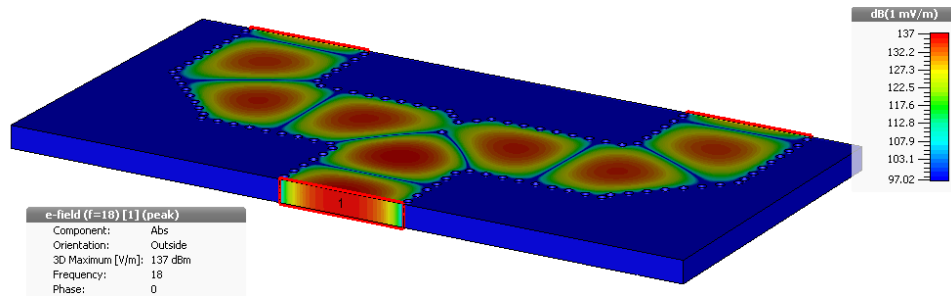


**Figura 128 Optimización de la Distancia de Acoplamiento**  
Fuente: Autor

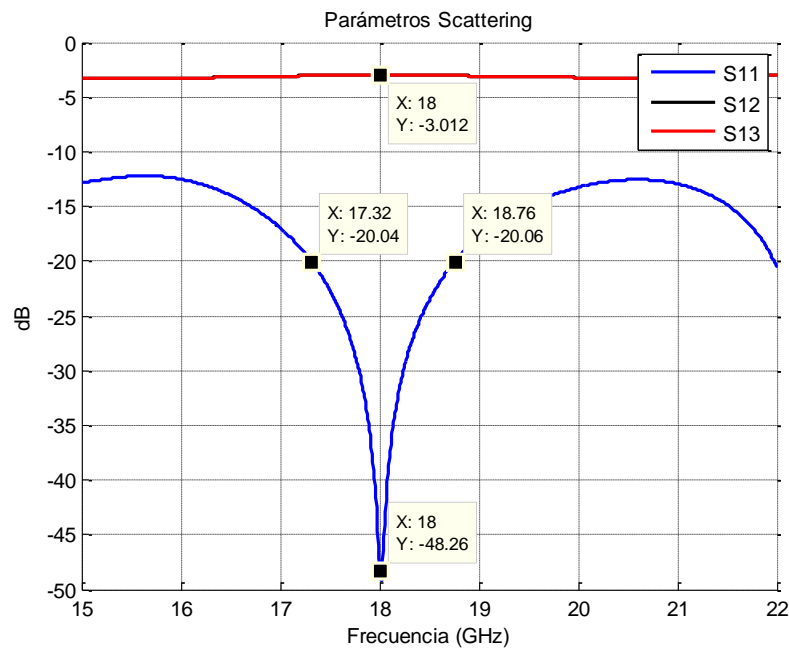
El divisor de potencia tipo T Truncado para banda K, lo podemos observar terminado en la Figura 129, y la propagación del campo eléctrico en la Figura 130.



**Figura 129 Divisor de Potencia Tipo T Truncado en banda K**  
Fuente: Autor



**Figura 130 Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncado**  
Fuente: Autor



**Figura 131 Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncado**  
Fuente: Autor

En la Figura 131 se observa el divisor de potencia Tipo T Truncado, funciona en la frecuencia central de 18GHz, y las potencias en sus puertos de salida están alrededor de los -3dB, en la que fue diseñado y a su vez se observa que el ancho de banda es de 1.44 GHz o el 8% de toda la banda

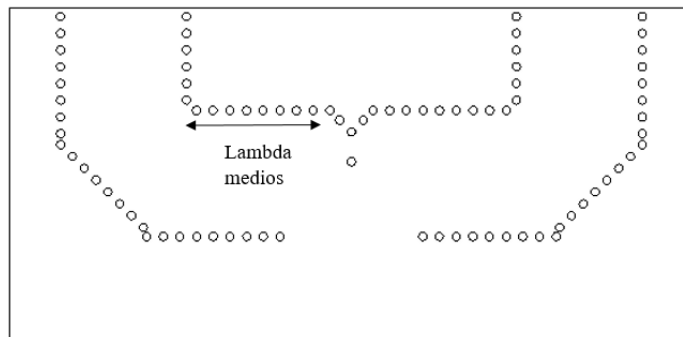
$$AB\% = \left( \frac{18.76 - 17.32}{18} \right) * 100$$

$$AB\% = 8\%$$

#### 4.7.1. Escalamiento para un Divisor de 8 Puertos

Para realizar el escalamiento del divisor tipo T truncado con 8 puertos de salida, al igual que el escalamiento del divisor de 4 Puertos, se utiliza como base principal el divisor de 2 salidas.

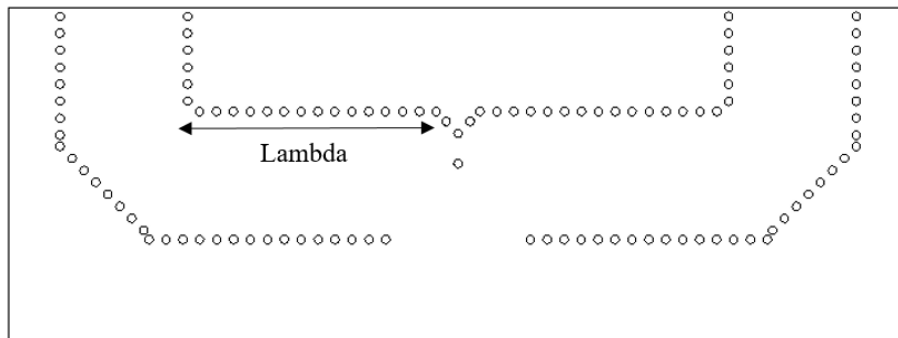
Los divisores de potencia de longitud lambda medios, serán los ramales de salida del nuevo prototipo, se necesitarán 4 divisores de longitud lambda medios, para así obtener las 8 salidas del divisor, para los siguientes ramales se utilizó 2 divisores de longitud lambda. Y para el ramal de la entrada se utiliza un divisor de longitud cinco lambda medios.



**Figura 132 Divisor de Potencia de longitud Lambda Medios**

Fuente: Autor

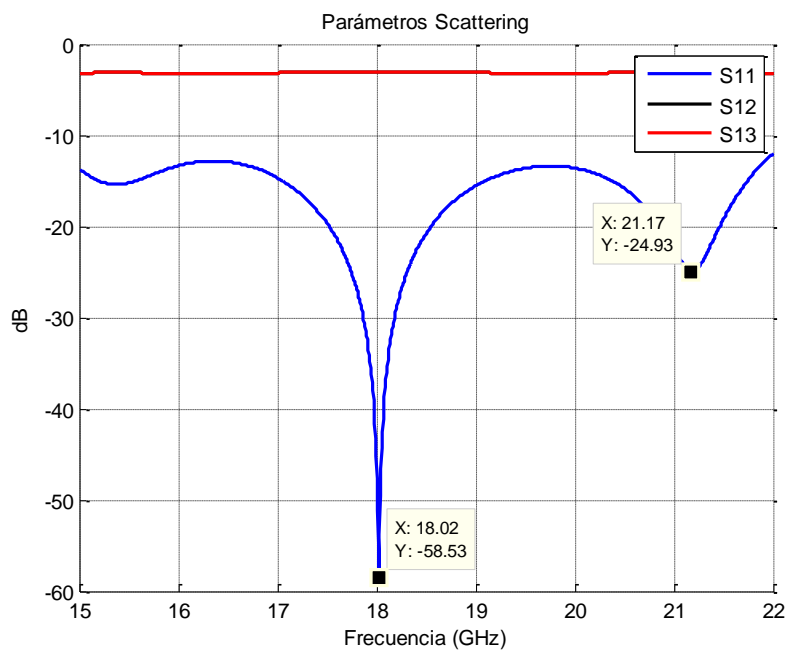
Los ramales del divisor de potencia de longitud lambda, se lo observa en la Figura 133, con sus respectivos parámetros *Scattering* en la Figura 134



**Figura 133 Divisor de Potencia de longitud Lambda**

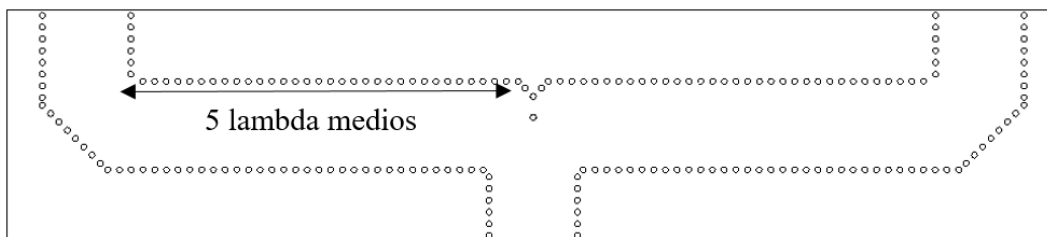
Fuente: Autor



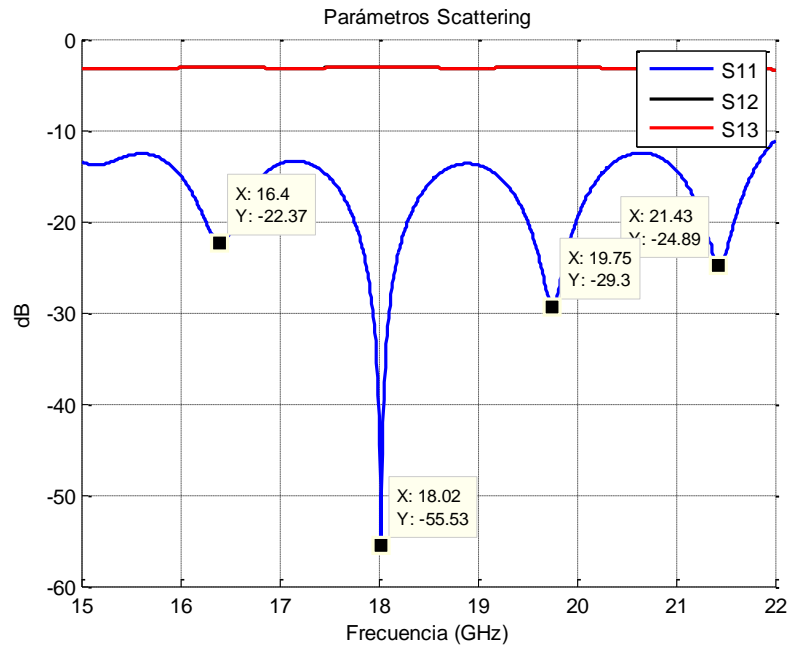


**Figura 134** Parámetros Scattering de Divisor de Potencia de longitud Lambda  
Fuente: Autor

Los ramales del divisor de potencia de longitud 5 lambda medios, se lo observa en la Figura 135, con sus respectivos parámetros *Scattering* en la Figura 136



**Figura 135** Divisor de Potencia de longitud 5 Lambda Medios  
Fuente: Autor



**Figura 136 Parámetros Scattering de Divisor de Potencia de longitud 5 Lambda Medios**  
Fuente: Autor

Como se observan en la Figura 136, el resultado de los parámetros *Scattering* del divisor de potencia de longitud 5 lambda medios, que aparte de trabajar en la frecuencia central de 18GHz, tiene una frecuencia de resonancia cerca de los 16.4GHz, 19.75GHz y 21.4GHz.

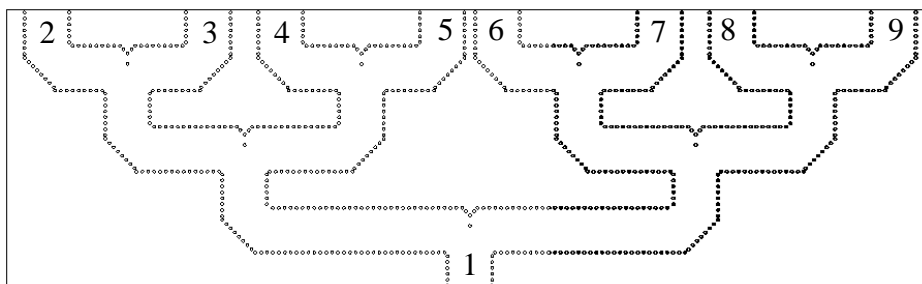
Los valores de los parámetros en los puertos de salida cambiarían, al ser un divisor de 8 salidas, por lo que su valor ideal sería de:

Siendo N, el número de salidas del divisor de potencia.

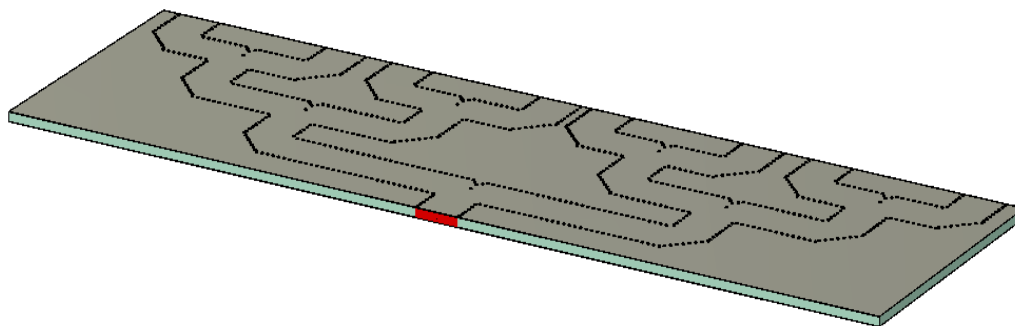
$$\text{Coupling} = -10 * \log N$$

$$\text{Coupling} = -10 * \log 8$$

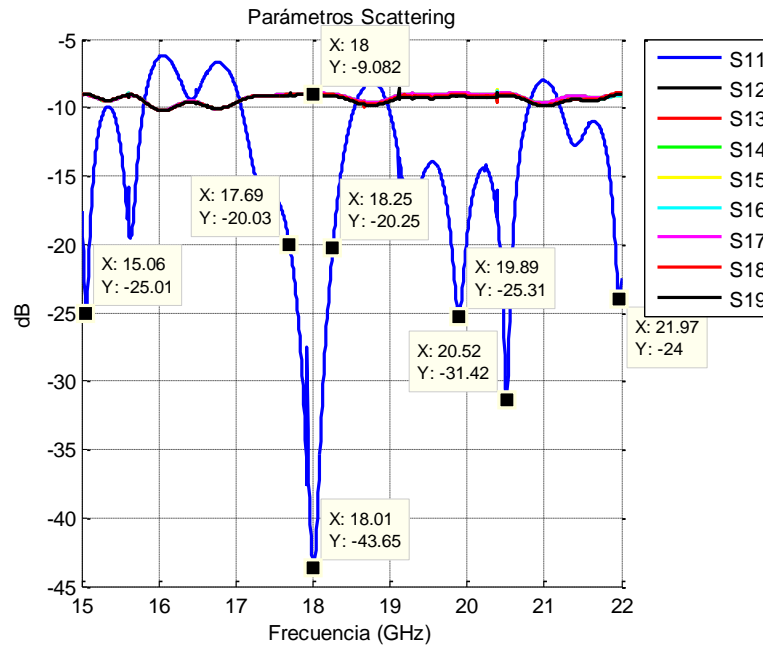
$$\text{Coupling} = -9.0308 \text{ dB}$$



**Figura 137** Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas  
Fuente: Autor



**Figura 138** Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en 3D  
Fuente: Autor



**Figura 139 Parámetros Scattering de Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas**  
Fuente: Autor

Una vez escalado el diseño a un divisor de 8 puertos, se observa en la Figura 139, que los parámetros *Scattering* presentan un excelente desempeño, logrando en sus puertos de salida un valor de -9.082dB representando un octavo de la potencia de entrada, y en el parámetro S11, se observa una respuesta en cinco frecuencias, las cuales son 18GHz, que es la frecuencia central, y en 15.06 GHz, 19.89 GHz, 20.52 GHz, y 21.97 GHz, las que son consideradas frecuencias de trabajo secundarias.

Su ancho de banda central es de 560 MHz, lo cual representa el 8 % de toda la banda.

$$AB\% = \left( \frac{18.25 - 17.69}{18} \right) * 100$$

$$AB\% = 3.11\%$$

#### 4.7.2. Transición tipo Taper en 18GHz

Para la realización de la transición, es necesario recordar los parámetros del sustrato, ya que es de vital importancia para el desarrollo del acoplamiento.

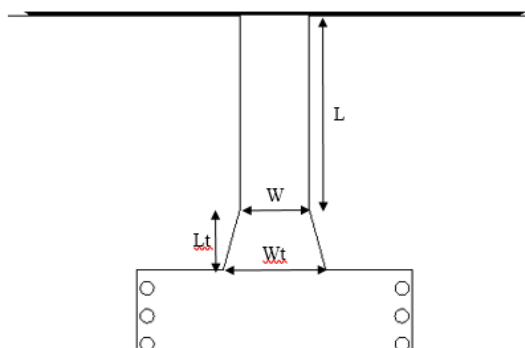
**Tabla 20.**  
**Parámetros del Sustrato Roger 5880 en transición**

Parámetros del Sustrato	Valor
Constante Dieléctrica ( $\epsilon$ )	2.2
Alto del Sustrato (h)	1.575 mm
Frecuencia	18 GHz

**Tabla 21.**  
**Parámetros de Transición tipo Taper en 18GHz**

Parámetro	Valor [mm]
Ancho (W)	4.852848
Largo (L)	6.09198

La siguiente parte fundamental para realizar la transición es el trapecio de microstrip que conecta con el dispositivo SIW, por lo que se procede al cálculo del ancho y el largo del trapecio.



**Figura 140** Transición tipo Taper en banda K  
Fuente: Autor

$$\frac{W_t}{W_{siw}} \cong 0.4$$

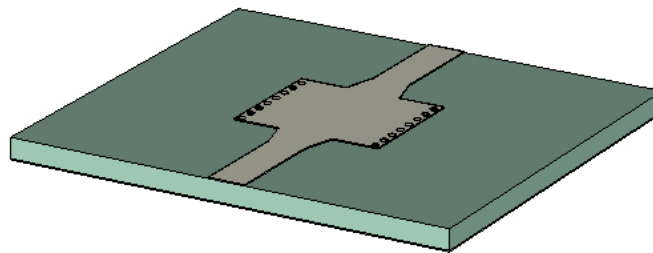
$$W_t \cong 0.4 * W_{siw}$$

$$W_t \cong 0.4 * 9.049$$

$$W_t \cong 3.6196$$

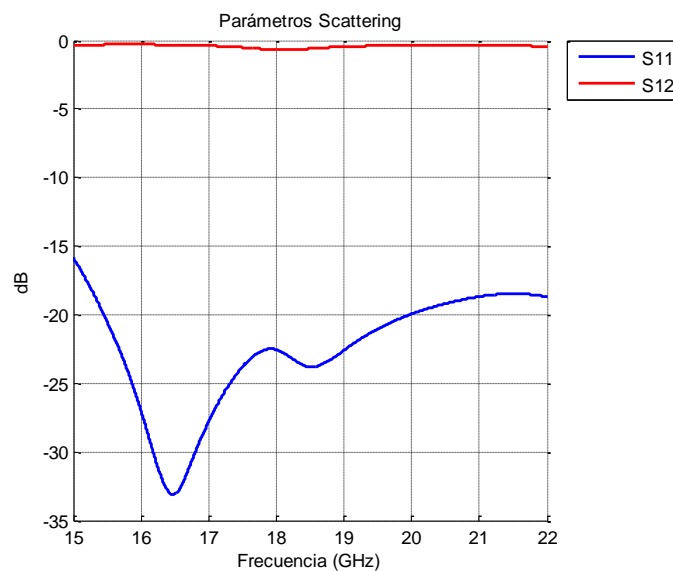
$$\frac{\lambda_s}{2} < L_t < \lambda_s$$

Distancias a que se aplica un proceso de optimización de dos variables, obteniendo los valores de  $W_t = 7.6761$  y  $L_t = 2.1818$ . en la Figura 141 se observa la transición implementada en la guía de onda SIW. Logrando que trabaje en toda la banda de frecuencia y con un acople de impedancias de  $50\Omega$ , como se observa en la figura 142 y 143.



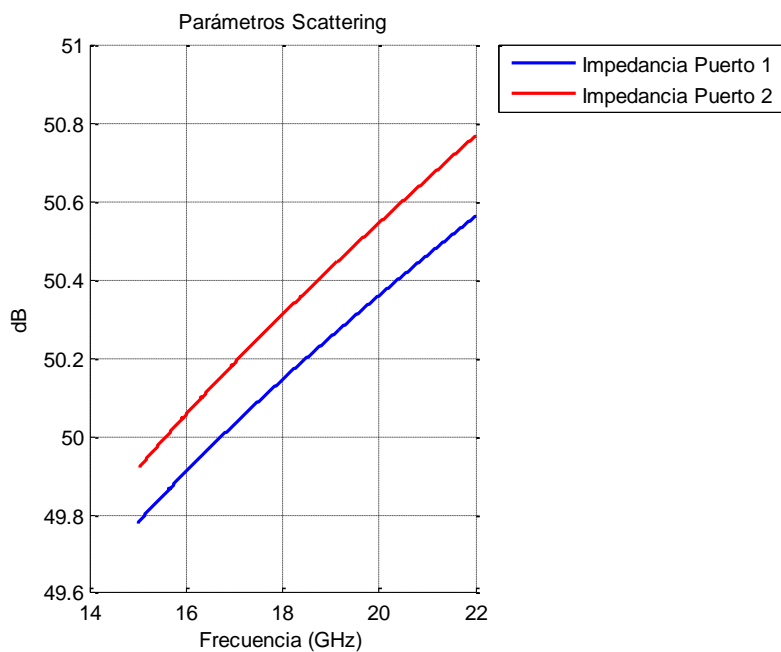
**Figura 141 Transición en SIW Banda K**

Fuente: Autor



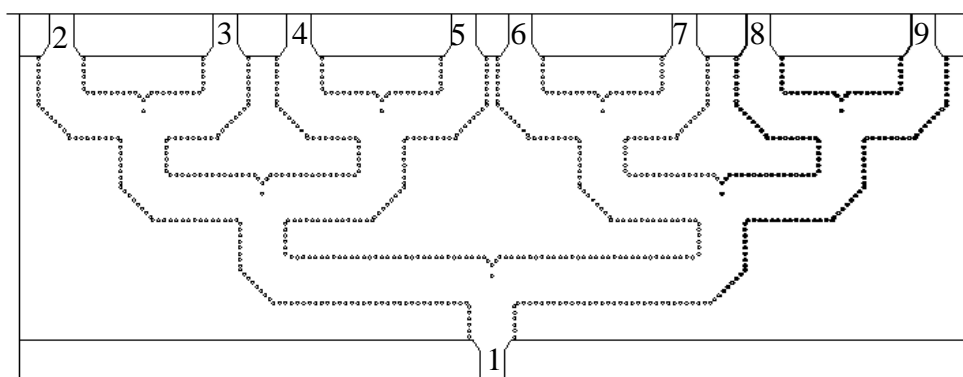
**Figura 142 Parámetros Scattering de guía SIW con transición**

Fuente: Autor

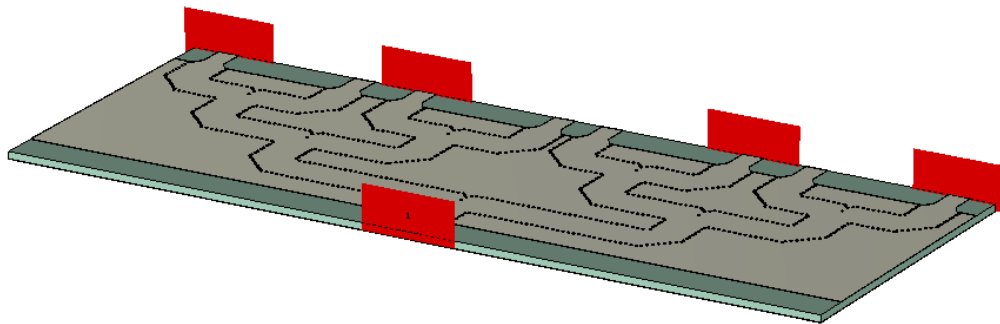


**Figura 143 Impedancia de Guía SIW con Transición**  
Fuente: Autor

Al estar completamente acoplado el diseño de la guía de onda SIW a una impedancia de  $50\Omega$ , hacemos la implementación de las transiciones en el diseño del divisor de potencia tipo T truncada de 8 puertos como se observa en las Figuras 144 y 145.



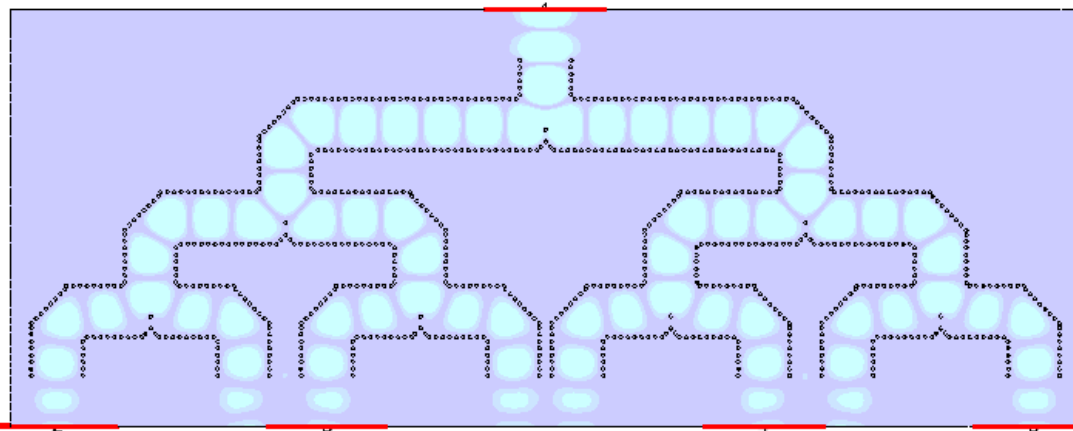
**Figura 144 Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K**  
Fuente: Autor



**Figura 145 Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K en 3D**

Fuente: Autor

La Figura 146 muestra el flujo de Campo Eléctrico en el plano E, observando una distribución uniforme en todos los puertos de salida del divisor.



**Figura 146 Propagación del Campo Eléctrico en Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K**

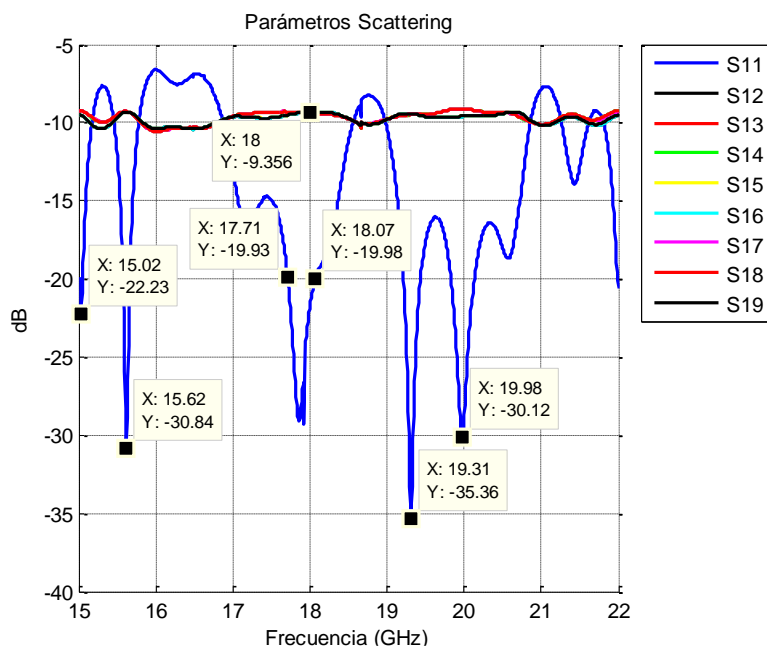
Fuente: Autor

Los resultados del diseño final del divisor de potencia tipo T truncado de 8 salidas en banda K, se los puede observar en la figura 147, observando que el dispositivo trabaja en varias bandas, las cuales son: 15.02GHz, 15.62GHz, 19.31GHz y 19.98GHz y la frecuencia central de trabajo es de 18GHz.

$$AB\% = \left( \frac{18.07 - 17.71}{18} \right) * 100$$

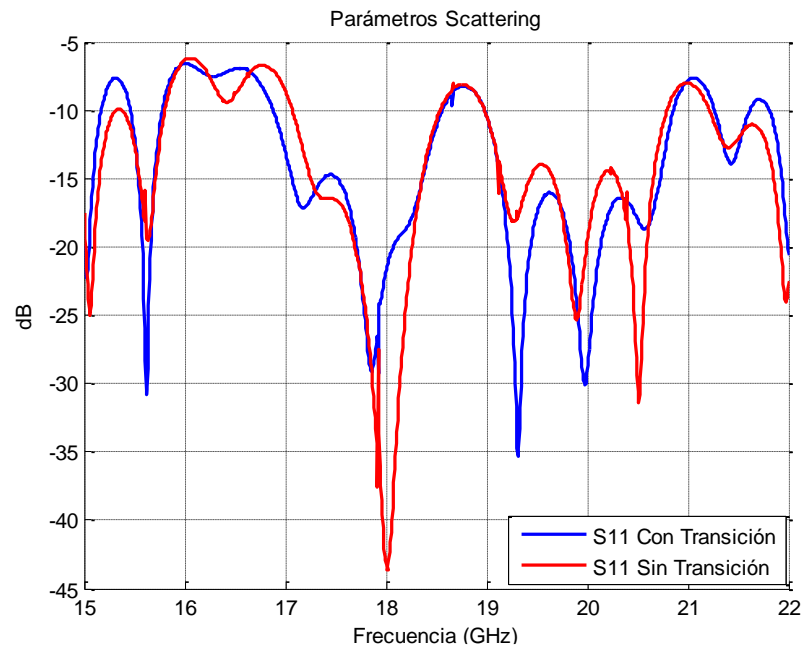
$$AB\% = 2 \%$$





**Figura 147 Parámetros Scattering en Divisor de Potencia Tipo T Truncada de 8 Salidas en Banda K**  
Fuente: Autor

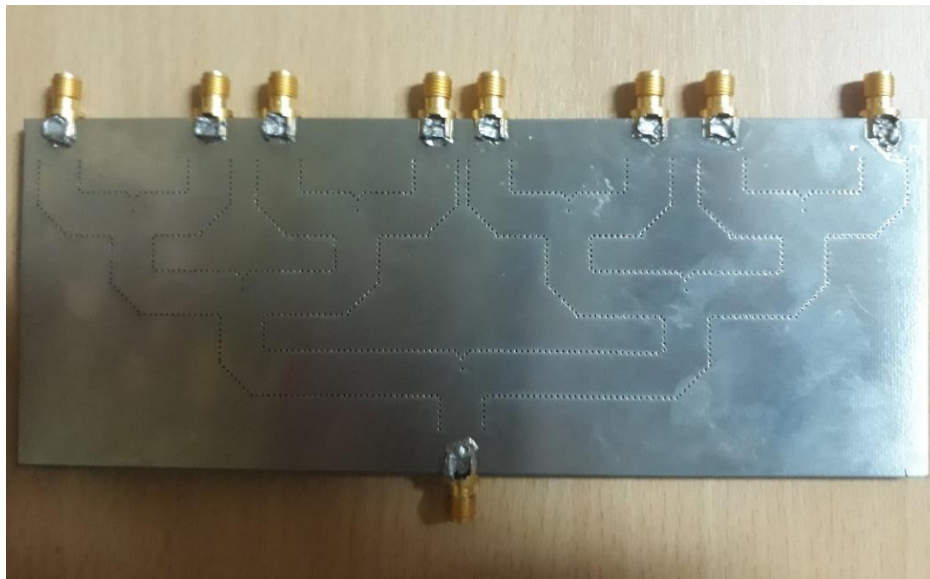
Para comprobar que la transición funciona y realmente cumple con las especificaciones de diseño, realizamos una comparación entre el diseño con transición y sin transición, la cual se observa en la figura 148. Observando que el parámetro S11, se comporta de manera similar en los 2 diseños, siendo la frecuencia central de 18GHz y manteniendo el ancho de banda.



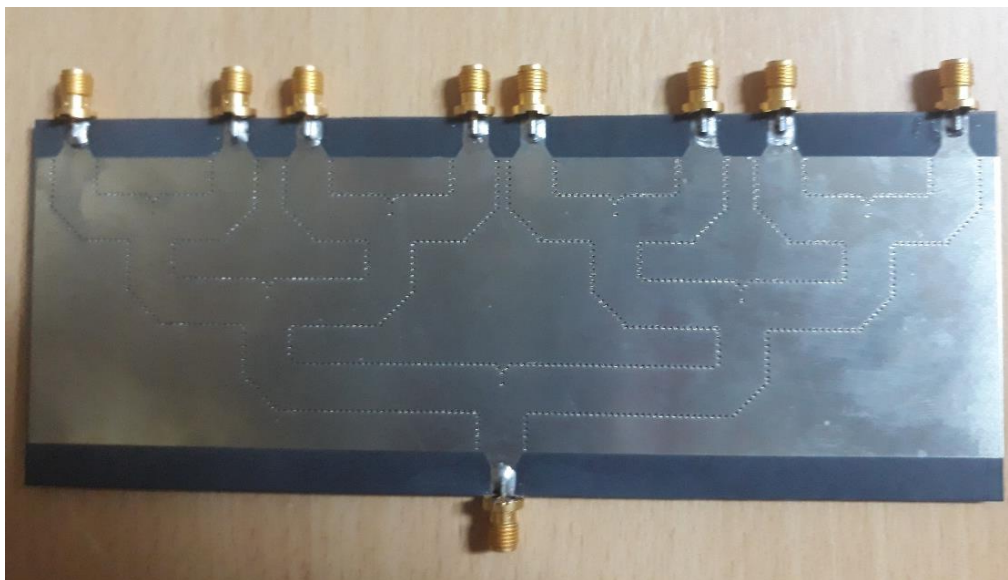
**Figura 148 Comparación de Resultados Con Transición y Sin Transición Banda K**  
Fuente: Autor

### 4.7.3. Construcción en Sustrato

Mediante el mismo procedimiento explicado en la sección 4.5.3, se realiza la construcción del dispositivo en Sustrato Roger RT Duroid 5880. Los dispositivos implementados se muestran en las Figuras 149 y 150.

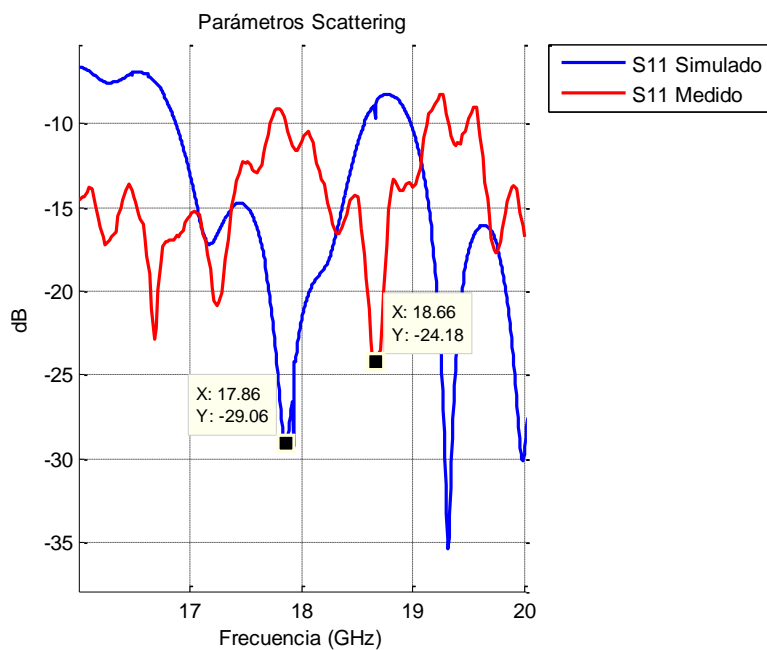


**Figura 149** Divisor Tipo T Truncado de 8 Salidas Implementado Vista Posterior  
Fuente: Autor



**Figura 150** Divisor Tipo T Truncado de 8 Salidas Implementado Vista Frontal  
Fuente: Autor

En la Figura 151 se muestra los resultados del parámetro S11, observando un desplazamiento de la frecuencia de operación, esto se debe a fallos en la construcción, ya que en estos dispositivos se necesita una exactitud de milésimas de milímetros para lograr el dispositivo ideal.

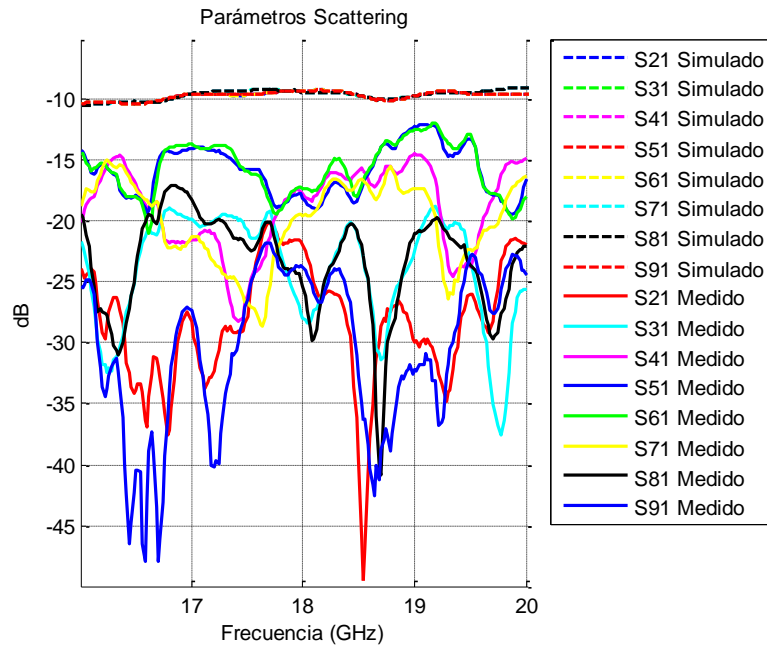


**Figura 151 Comparación de Resultados en Parámetros S11 Simulado vs Medido en Banda K**

Fuente: Autor

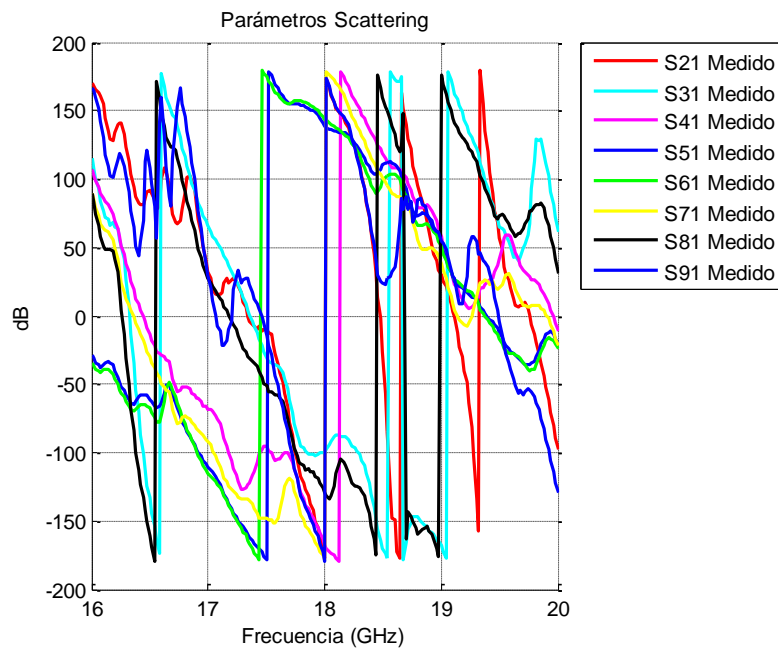
De igual manera en la figura 152, se observa la comparación de todos los puertos de salida del dispositivo, simulados con los medidos, encontrando que: todos los puertos de salida del dispositivo implementado tienen pérdidas, las cuales se producen por efecto *skin depth*, el cual se lo analiza más adelante.

En la figura 153, se muestran las fases de salida del divisor implementado, estas no tienen un comportamiento homogéneo que se esperaba, esto se debe al mismo efecto *skin depth*, y pérdidas en la propagación dentro del sustrato, todas las causas y efectos de los problemas presentados, se analizan a continuación.



**Figura 152 Comparación de Resultados en los Puertos de Salida Simulado vs Medido en Banda K**

Fuente: Autor



**Figura 153 Fases en Los Puertos de Salida Medidos**

Fuente: Autor

#### 4.7.4. Resultados

Una vez realizadas las mediciones de los parámetros *Scattering* para el divisor de 8 Puertos, se realizó una comparativa entre el diseño con transición y sin transición como se observa en la Figura 147. Observando que el comportamiento del parámetro S11, tiene una gran similitud en los dos dispositivos, trabajando en la frecuencia central de 18GHz y teniendo un ancho de banda similar que ronda entre los 360 MHz, y trabajando en las frecuencias secundarias de 15.02, 15.62, 18, 19.31 y 19.98GHz.

Analizando los resultados del divisor de 8 puertos implementado, en las Figuras 151 y 152, se observa que: El comportamiento del parámetro S11 es adecuado, pero presentando un desplazamiento en frecuencia, obteniendo un ancho de banda aproximado de 900MHz, trabajando a una frecuencia central de 18.66 GHz. En las mediciones de los puertos de salida del divisor se encuentra con un problema, ya que estos no son los valores ideales para el desempeño del dispositivo, presentando grandes pérdidas en el sustrato. Una de las razones de estas pérdidas en el sustrato es la profundidad de piel (*skin depth*), la cual es una medida característica de los conductores que indica la profundidad a la cual una onda mantiene sus características esenciales. Esta medida está directamente relacionada con la frecuencia, la permeabilidad y la conductividad del material, es decir el área efectiva por la que circula la onda. El efecto que produce el *skin depth*, es que las ondas milimétricas y de microonda, se escapan por las paredes de las vías metalizadas, causando pérdidas en los parámetros de salida y cambios en la fase del dispositivo. Este efecto es apreciable en conductores de gran tamaño y con presencia de discontinuidades, como es el caso del divisor de 8 puertos, y a la vez, el efecto de perdidas aumenta de manera proporcional con la banda de trabajo.

La fórmula para calcular la Penetración Superficial esta expresada a continuación, y calculada la penetración en materiales como el cobre y el aluminio

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \sigma}}$$

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{\pi(18GHz)(4\pi * 10^{-7})_0 \sigma}}$$

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{\sigma}} * 0.0038$$

Utilizando el material cobre

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{5.813 * 10^7}} * 0.0038$$

$$\delta_s = 4.9841 * 10^{-7} m$$

Utilizando el material aluminio

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{3.816 * 10^7}} * 0.0038$$

$$\delta_s = 6.1515 * 10^{-7} m$$

Siendo estos valores, los mínimos del laminado metalizado de las paredes del interior de los orificios. Lo que concluimos en el caso del divisor en 18Ghz, es que no se asegura el grosor suficiente en las vías del material conductor que forma el dispositivo. Es por esta razón que la propagación de la onda electromagnética presenta fugas por las paredes del metalizado, las cuales afectan directamente en los resultados de los parámetros de salida y en las fases de divisor.

Existen 2 soluciones que se plantean en el capítulo siguiente, para combatir los efectos del *skin depth*, y así lograr mejores resultados en la construcción de este tipo de dispositivos en tecnología SIW. Recordemos que, este diseño en sustrato Roger RT Duroid 5880, fue parte de las soluciones propuestas a las pérdidas encontradas al utilizar un sustrato de menor calidad como es el FR4.



## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El capítulo final de la investigación se expone las conclusiones y recomendaciones una vez analizados los resultados de los prototipos de divisores de potencia tipo T truncada implementados. A parte de esto, también se menciona trabajos futuros y soluciones a los problemas encontrados, con los que se puede complementar y ampliar el campo de investigación en SIW.

#### 5.1 Conclusiones

- Se diseñó e implementó una Red de Divisores de Potencia Tipo T truncada, para las bandas de frecuencia  $X$  y  $Ku$ , empleando la tecnología SIW, con la ayuda de un software de simulación electromagnético (CST), ideal para trabajar en altas frecuencias y diseños en diferentes tipos de Sustrato, obteniendo como resultado diseños electrónicos de bajo costo, tamaño y peso reducido en comparación a un diseño en guía de onda tradicional.
- Se realizó el cálculo matemático de los parámetros de la Tecnología SIW, como son el grosor del sustrato ( $h$ ), la distancia entre orificios metalizados ( $b$ ), el diámetro de los orificios ( $d$ ), y el ancho de la guía de onda ( $W_{siw}$ ). Posteriormente dichos parámetros fueron implementados en los 2 diseños de divisores de potencia para la banda  $X$  y  $Ku$ .
- Se diseñó el truncamiento en los divisores de potencia tipo T, el cual permite una distribución homogénea de potencia en los puertos de salida, mejorando el flujo de campo eléctrico ingresado por el puerto de entrada, que disminuye las pérdidas de inserción y reflexión que se presentan en el puerto de entrada. Adicional al truncamiento, se añadió una vía metalizada a una distancia de acoplamiento la cual mejora los parámetros *Scattering* tanto en el puerto de entrada y puertos de salida.

- Se utilizó dos tipos de sustrato, el FR4 que se empleó en el diseño del divisor de potencia tipo T truncada para la banda  $X$  y  $Ku$ , dicho sustrato trabaja en un rango reducido de frecuencia, hasta los 10GHz. Mientras que el sustrato Roger RT Duroid 5880, trabaja en un rango de frecuencia de 8GHz a 40GHz, este es un sustrato de mejores prestaciones por lo que se lo utilizó para la simulación en el diseño del Divisor de Potencia tipo T en la banda K. Observando las claras diferencias tanto en su frecuencia de operación, como en las pérdidas presentadas en las mediciones.
- Se comprobó que la longitud de los brazos de la T en los divisores de potencia, tienen relación directa con el ancho de banda en el lóbulo principal del parámetro S11, teniendo que, si aumentamos la longitud de los brazos en una distancia de  $n \cdot \frac{\lambda}{2}$ , siendo n un número entero positivo, el ancho de banda se reduce y aparecen nuevas frecuencias de trabajo, adicionales a la frecuencia central diseñada.
- Se logró escalar el diseño de un divisor tipo T Truncado de dos salidas, a diseños de cuatro y ocho salidas trabajando en las bandas  $X$  y  $Ku$  respectivamente, esto se logró mediante un diseño con conexión en cascada de los divisores, variando el largo del brazo del divisor primario, y teniendo muy en cuenta que los brazos de salida del divisor final no se solapen y estén a una distancia razonable para posteriormente soldar los conectores SMA.
- Se midió y comparó los anchos de banda en simulación y en los prototipos implementados, concluyendo que el ancho de banda implementado en el diseño para la banda X en 10GHz, 130MHz o el 3.25% de toda la banda, mientras que el ancho de banda Simulado presenta 236MHz o el 5.9%, esto se debe principalmente al Sustrato FR4 en el que fue construido el dispositivo, el cual ocasiona un desplazamiento en la frecuencia central, la cual es ocasionada por alteraciones de las medidas en la construcción, la reducción de ancho de banda en el lóbulo principal del parámetro S11, y la aparición de lóbulos o frecuencias secundarias que trabajan en el dispositivo. Mientras que para el diseño en banda Ku, se realizó un análisis idéntico al anterior, concluyendo que el ancho de banda implementado en el diseño para la banda Ku en 15GHz, 900MHz o el 15% de toda la banda, mientras que el ancho de banda Simulado presenta

380MHz o el 6.33%, verificando que es un valor aceptable y se puede utilizar un arreglo de antenas de varias frecuencias.

- Para la construcción del divisor en Banda X, trabajando en 18GHz, se presenta el problema de los efectos de *skin deep* o penetración superficial, razón por la cual los resultados no fueron los esperados, presentando pérdidas, desvanecimiento y deterioro de las señales dentro del dispositivo, para lo cual se tendría que utilizar otros métodos de metalizado en los orificios o la inclusión de conductores sólidos (vías rígidas) dentro de los orificios.

## 5.2 Recomendaciones

- Lo ideal en el presente trabajo de investigación es el correcto diseño del Divisor de Potencia Tipo T, por lo que se recomienda iniciar el proceso realizando el diseño en guía de onda, para su posterior paso a SIW, así se comprenderá y verificará las mejores prestaciones que ofrece la tecnología SIW.
- Se recomienda que el análisis en la parte electromagnética se la maneje con más exactitud, ya que, al presentar varias discontinuidades en el diseño, como son el truncamiento, los codos y las transiciones, las componentes del campo electromagnético en estos puntos afecta en la propagación final esperada.
- Se debe soldar de forma adecuada los conectores SMA ya que, al trabajar con frecuencias altas, pequeñas imperfecciones o discontinuidades en el soldado causarían cambios en el resultado final, como son pérdidas en los puertos y el bajo desempeño del divisor de Potencia de Salida.
- Realizar un estudio a profundidad de los materiales que se ocupará en la fabricación y medición de los diseños finales, ya que de ellos depende los resultados e influyen directamente en las pérdidas que se generan, especialmente en el tipo de Sustrato que se ocupa. Ya que como se analizó en la investigación, hay varios sustratos en el mercado que trabajan en rangos de frecuencias definidos.

### 5.3 Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se propone la inclusión de vías rígidas de cobre en los agujeros de SIW, ya que en la investigación actual se realizó la metalización de las paredes interiores de los orificios, presentando un desempeño poco adecuado para los resultados esperados en especial en el divisor de 18GHz, esto se debe a la presencia de aire en el interior del orificio, siendo este dieléctrico el causante de pérdidas y la fuga de la onda por el efecto *skin deep*, añadiendo un riblet o vía rígida metálica, evitará la fuga del campo eléctrico y se asegura que las pérdidas se reduzcan de una forma muy significativa. Mejorando el comportamiento en ancho de banda y evitando el desplazamiento de la frecuencia central de trabajo, este procedimiento no se lo realizo en este trabajo debido a que en el mercado nacional no se cuenta con los materiales necesarios para este tipo de trabajos, viéndonos obligados a la importación de una remachadora de precisión y la cantidad necesaria de riblet para ocupar en los agujeros de SIW.

Una propuesta que se analizaría a futuro para mejorar el desempeño de los dispositivos SIW es buscar otro tipo de transiciones SIW a microstrip además de la transición de tipo taper que se utilizó en esta tesis, la cual dio buenos resultados, pero la dificultad en encontrar los valores ideales para el acoplamiento entre dos dispositivos de banda angosta resulta un problema si la frecuencia de trabajo aumenta o se requiere diseños de doble banda o banda ancha.

Con respecto al diseño del divisor tipo T Truncado, se podría ir variando la forma del truncamiento presentado en esta tesis, el cual es un truncamiento en forma de “V”, otro tipo de truncamientos podría resultar mejor de acuerdo a la propagación de la onda y frecuencia diseñada.

Para comparar el desempeño y realizar una analogía adecuada se puede desarrollar los dispositivos divisores de potencia tipo T Truncado en otra tecnología diferente, como son en guía de onda rectangular, microstrip o por líneas conductoras.

## CAPITULO VI

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anónimo. (07 de 08 de 2017). *www.mimw.com*. Obtenido de Mi Wave: <http://miwv.com/images/Waveguide-Chart.pdf>
- Bartsch, M. (2007). *CST*. Obtenido de CST-Computer Simulation Technology: <https://www.cst.com/products/csts2>
- Boria, V. (2017). *Grupo de Aplicaciones de las Microondas*. Obtenido de Universidad Politecnica de Valencia: <http://gam.webs.upv.es/index.php/lineas-de-investigacion/analisis-y-diseno-de-dispositivos-pasivos-de-microondas-en-tecnologias-planar-e-hibrida-guias-siw/?lang=es>
- Boucha, R. (2013). *Coupler, Power Divider and Circulator in V-Band Substrate Integrated Waveguide Technology*. IJCSA International Journal on Computational Sciences & Applications Vol3.
- Coenen, T. (2010). *Analysis and Design of Post Wall Waveguides for Applications in SIW*. Netherlands: PhD Thesis, the Telecommunication Engineering group of thr Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science of the University of Twente Enschede.
- D. Navarro, F. C. (2001). *Guías de Onda Integrada en Substrato para Aplicaciones en las Bandas de Microondas y Ondas Milimétricas*. Obtenido de Research Gate: [https://www.researchgate.net/publication/267297095\\_Guias\\_de\\_Onda\\_Integradas\\_en\\_Substrato\\_para\\_Aplicaciones\\_en\\_las\\_Bandas\\_de\\_Microondas\\_y\\_Ondas\\_Milimetricas](https://www.researchgate.net/publication/267297095_Guias_de_Onda_Integradas_en_Substrato_para_Aplicaciones_en_las_Bandas_de_Microondas_y_Ondas_Milimetricas)
- electro111306. (14 de 04 de 2016). *Blogdiario.com*. Obtenido de <http://electro111306.blogspot.es/1460658686/guias-de-onda/>
- ElePrint. (2013). *ElepPrint Circuitos Impresos*. Obtenido de <http://www.eleprint.com.ar/material.htm>
- García, J. (2008). *Análisis y modelado de una guía de onda integrada en un sustrato semiconductor como interfase de comunicacion ultrarapida*. Mexico DF: Escuela Superior de Ingenieria Mecánica y Eléctrica ZACATENCO.
- Guoliang Li, K. S. (12 de Diciembre de 2015). *IEEE Xplore*. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/document/7332247/>
- Hwagm. (s.f.). *Seguridad Wireless*. Obtenido de <http://www.seguridadwireless.net/hwagm/galeria-conectores.html>

- Javier, G. M. (Julio de 2015). *Slide Doc*. Obtenido de Universidad Carlos III de Madrid: <https://slidedoc.es/disenio-de-un-divisor-de-potencia-en-tecnologia-gap-waveguide-y-su-aplicacion-a-un-array-de-ranuras>
- KeysightTechnologies. (2016). *Keysight Technologies*. Obtenido de <http://www.keysight.com/en/pdx-x201927-pn-N9918A/fieldfox-handheld-microwave-analyzer-265-ghz?cc=EC&lc=eng>
- Kumar Hemendra, J. R. (Octubre de 2012). *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*. Obtenido de <http://www.iosrjournals.org/>
- MathWorks. (2017). *MathWorks MatLab*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- Microensamble. (2016). *Glosario Electrónico*. Obtenido de <http://microensamble.com/glosario/fr4/>
- Monzón, V. (2009). *Diseño e implementación de circuitos pasivos de microonda en tecnología CRLH*. Madrid, España: Universidad Carlos III De Madrid.
- Muhammada Imrad Nawaz, Z. H. (2014). *Northwestern Polytechnical University*. Obtenido de <http://inase.org>: <http://inase.org/library/2014/interlaken/bypaper/CSC/CSC-09.pdf>
- Pascual Garcia, P. (2012). *Modelos de análisis y diseño de dispositivos en guía integrada en sustrato para banda Ku*. Obtenido de Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones: <http://hdl.handle.net/10486/10358>
- Pasternack. (07 de 08 de 2017). *www.pasternack.com*. Obtenido de The Engineer's RF source: <http://es.pasternack.com/guias-de-ondas.html>
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering*. Massachusetts: John Wiley & Sons Inc.
- Quelex, B. (s.f.). *SlideShare*. Obtenido de Escuela de Mecánica Eléctrica: <https://es.slideshare.net/Byronf46/tarea-1-lt-200818857>
- Rahali Boucha, F. M. (10 de Abril de 2014). *Cornell University Library*. Obtenido de <https://arxiv.org/abs/1404.2888>
- Rodriguez, C. (25 de Noviembre de 2013). *Guias de Ondas*. Obtenido de <http://grupo5-guiadeondas.com/2013/11/guias-de-ondas.html>
- Rogerscorp. (2017). *Rogerscorp Corporation*. Obtenido de <http://www.rogerscorp.com/acs/products/32/rt-duroid-5880-laminates.aspx>
- Smith, N. A. (2010). *Substrate Integrated Waveguide Circuits and Systems*. Quebec, Canada: Thesis for the degree of Master Of Engineering, Department of Electrical & Computer Engineering.

Xinyu Xu, R. B. (2005). *A New Six-Port Junction Based on Substrate*. Obtenido de Microwave Conference Proceedings 2005: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1463344/>