



Diseño de un divisor de 5 puertos en guía de onda cuadrada utilizando unión tipo T como base y codos

Pazmiño Renteria, Yozef Andre

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. Haro Báez, Raúl Vinicio

4 de Agosto del 2022



[A_Tesis_Pazmino_Renteria_Yozef_Andre_Final.docx](#)

Scanned on: 16:47 August 3, 2022 UTC



Escanea electrónicamente por:

**RAUL
VINICIO**



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	281
Words with Minor Changes	91
Paraphrased Words	177
Omitted Words	0



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: “**Diseño de un divisor de 5 puertos en guía de onda cuadrada utilizando unión tipo T como base y codos**” fue realizado por el señor **Pazmiño Rentería, Yozef Andre**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 4 de Agosto de 2022



.....
Haro Báez, Raúl Vinicio

C. C. 1713500294



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Pazmiño Rentería, Yozef Andre**, con cédula de ciudadanía n°1105083768, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño de un divisor de 5 puertos en guía de onda cuadrada utilizando unión tipo T como base y codos** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 4 de Agosto del 2022

Pazmiño Rentería, Yozef Andre

C.C.: 1105083768



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Autorización de Publicación

Yo **Pazmiño Rentería, Yozef Andre**, con cédula de ciudadanía n°1105083768, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño de un divisor de 5 puertos en guía de onda cuadrada utilizando unión tipo T como base y codos** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 4 de Agosto de 2022

Yozef Andre, Pazmiño Rentería

C.C.: 1105083768

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi padre Manuel y mi Madre en el cielo por haberme forjado como la persona que soy actualmente, ya que sin ellos este logro no sería posible, desde pequeño me enseñaron la perseverancia y dedicación hasta lograr cada uno de mis sueños por más que estos cuesten.

Yozef Andre Pazmiño Renteria

Agradecimientos

Agradezco a mis padres Manuel y Gina, a mis hermanos Rolo y Alex que son pilares fundamentales en vida, me brindan su amor incondicional y valentía para alcanzar esta meta.

Agradezco mis familiares y amigos del Team que gracias a su apoyo incondicional se logró culminar esta etapa de formación académica.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe, en especial a los docentes del Departamento de Eléctrica y Electrónica por todos los conocimientos y enseñanzas durante todo este camino.

Finalmente, agradezco a mi tutor de Proyecto de Titulación al Ing. Raúl Haro quien con sus consejos y recomendaciones formó parte del proceso para concluir con éxito este proceso.

Tabla de contenido

Dedicatoria.....	6
Agradecimientos	7
Índice de Figuras	11
Resumen	13
<i>Palabras claves:</i> Guía de onda cuadrada, divisor tipo T, codo achaflado, coeficientes de transmisión y reflexión.	13
Abstract.....	14
Keywords: Square waveguide. T-type divider. chamfered bend, transmission and reflection coefficients.....	14
Capítulo I.....	15
Planteamiento del problema de investigación	15
Antecedentes	15
Justificación.....	16
Objetivos	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Capítulo II	18
Fundamento Teórico.....	18
Guías de Onda	18
Tipos de guías de Onda	18
Modos de propagación	22
Uniones de guía de onda tipo T	23
Capítulo III.....	25
Elementos utilizados	25
Software CST Studio Suite 2021.....	25

Capítulo IV.....	29
Diseño y Resultados	29
Diseño del divisor tipo T.....	30
Diseño del Codo de 90° achanflado	43
Diseño del divisor tipo T modificado con terminación en Y	54
Diseño del divisor tipo T de 5 puertos	58
Capítulo V.....	80
Conclusiones y recomendaciones.....	80
Conclusiones	80
Recomendaciones.....	81
Trabajos Futuros	81
Referencias.....	82
Apéndice	84

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Estándar para guías de onda rectangular</i>	21
Tabla 2 <i>Requerimientos para la instalación de CST Studio</i>	25
Tabla 3 <i>Parámetros del divisor tipo T de 3 puertos</i>	41
Tabla 4 <i>Valores de los parámetros del codo a 90° achanflado</i>	44
Tabla 5 <i>Parámetros para el diseño del codo a 90° achanflado</i>	46
Tabla 6 <i>Parámetros en el divisor con salida en codo achanflado modificación 1</i>	48
Tabla 7 <i>Parámetros modificados en la mejora 2</i>	50
Tabla 8 <i>Parámetros de la mejora 3</i>	52
Tabla 9 <i>Parámetros divisor tipo modificado</i>	54
Tabla 10 <i>Variación de parámetros en la mejora del divisor tipo Y</i>	56
Tabla 11 <i>Dimensiones de los parámetros del divisor de 5 puertos</i>	59
Tabla 12 <i>Valores de los parámetros modificados en la optimización 1</i>	60
Tabla 13 <i>Valores de los parámetros modificados en la optimización 2</i>	62
Tabla 14 <i>Valores de los parámetros modificados en la optimización 3</i>	63
Tabla 15 <i>Valores de los parámetros modificados en la optimización 4</i>	65
Tabla 16 <i>Valores de los parámetros modificados en la optimización 5</i>	67
Tabla 17. <i>Valores de los recortes en divisor tipo Y</i>	68
Tabla 18 <i>Valores de los parámetros modificados en la optimización 6</i>	69
Tabla 19 <i>Valores de los recortes en divisor tipo Y</i>	70
Tabla 20 <i>Valores de los parámetros modificados en la optimización 7</i>	71
Tabla 21 <i>Valores de los recortes en divisor tipo Y</i>	72

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Guía de onda rectangular</i>	19
Figura 2 <i>Guía de onda cuadrada</i>	22
Figura 3 <i>Modos de propagación en guía de onda rectangular</i>	23
Figura 4 <i>Unión T tipo E</i>	24
Figura 5 <i>Unión T tipo H</i>	24
Figura 6 <i>Selección del Template para el diseño de la aplicación.</i>	26
Figura 7 <i>Selección del Template Waveguides Couples & Dividers</i>	26
Figura 8 <i>Selección del modo de respuesta</i>	27
Figura 9 <i>Configuración de las unidades del diseño</i>	27
Figura 10 <i>Valores de frecuencia para el análisis.</i>	28
Figura 11 <i>Resumen de los parámetros ingresados</i>	28
Figura 12 <i>Ventana principal de CST Studio</i>	29
Figura 13 <i>Divisor tipo T con enumeración de sus puertos</i>	31
Figura 14 <i>Respuesta en frecuencia de los parámetros de reflexión del divisor tipo T</i>	31
Figura 15 <i>Respuesta en frecuencia de los parámetros de transmisión del divisor tipo T</i>	32
Figura 16 <i>Discontinuidad del Septum</i>	32
Figura 17 <i>Barrido de St en modo TE10</i>	33
Figura 18 <i>Barrido de St en modo TE01</i>	33
Figura 19 <i>Barrido de St en el rango de 14GHz a 16GHz del modo TE10</i>	34
Figura 20 <i>Barrido de St en el rango de 14GHz a 16GHz del modo TE01</i>	34
Figura 21 <i>Respuesta en frecuencia divisor tipo T con St=5mm</i>	35
Figura 22 <i>Discontinuidades laterales</i>	35
Figura 23 <i>Barrido de t con at fijo</i>	36
Figura 24 <i>Discontinuidades laterales t y at óptimos</i>	36
Figura 25 <i>Largo de la guía de onda en dirección del puerto 1</i>	37
Figura 26 <i>Discontinuidades cerca al puerto 1</i>	37
Figura 27 <i>Barrido del parámetro bt con ct fijo</i>	37
Figura 28. <i>Barrido del parámetro ct con bt fijo</i>	38
Figura 29 <i>Discontinuidades cerca al divisor</i>	38
Figura 30 <i>Barrido de ht con ht1 y lt fijos en modo TE10</i>	39
Figura 31 <i>Barrido de ht con ht1 y lt fijo en modo TE01</i>	39
Figura 32 <i>Barrido lt con ht y ht1 fijos en el modo TE 10</i>	40
Figura 33 <i>Barrido lt con ht1 y ht fijo en el modo TE01</i>	40
Figura 34 <i>Barrido ht1 con ht y lt fijo en el modo TE10</i>	40
Figura 35 <i>Barrido ht1 con ht y lt fijo en el modo TE01</i>	41
Figura 36 <i>Diseño final divisor tipo T de 3 puertos</i>	41
Figura 37 <i>Respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión del divisor tipo T de 3 puertos</i>	42
Figura 38 <i>Esquema codo a 90° achanflado o redondeado</i>	43
Figura 39 <i>Secciones del codo a 90° achanflado</i>	44
Figura 40 <i>Respuesta en frecuencia del codo a 90° en el modo TE10(línea continua)</i>	45
Figura 41 <i>Respuesta en frecuencia del codo a 90° en el modo TE10(línea continua)</i>	45
Figura 42. <i>Estructura del codo a 90° achanflado</i>	46

Figura 43 Respuesta en frecuencia codo a 90° achanflado para el modo TE10 y TE01	47
Figura 44 Unión del codo a 90° achanflado con el divisor tipo T de 3 puertos.....	47
Figura 45 Respuesta en frecuencia unión del codo a 90° achanflado con el divisor tipo T de 3 puertos....	48
Figura 46 Parámetros modificados en el divisor tipo T en codo achanflado modificación 1	49
Figura 47 Respuesta en frecuencia modificación 1	50
Figura 48 Posición de las modificaciones en la mejora 2	51
Figura 49 Respuesta en frecuencia de la mejora 2	52
Figura 50 Mejora 3 del divisor tipo T con codos achanflados.	53
Figura 51 Respuesta en frecuencia de la mejora 3	54
Figura 52 Divisor tipo T modificado con terminación en Y.....	55
Figura 53 Respuesta en frecuencia divisor tipo Y.....	56
Figura 54 Respuesta en frecuencia mejora del divisor tipo Y.....	57
Figura 55 Diseño final del divisor tipo T de 5 puertos	58
Figura 56 Respuesta en frecuencia divisor de 5 puertos	60
Figura 57 Respuesta en frecuencia optimización 1	61
Figura 58 Respuesta en frecuencia optimización 2	63
Figura 59 Respuesta en frecuencia optimización 3	65
Figura 60 Respuesta en frecuencia optimización 4	66
Figura 61 Respuesta en frecuencia optimización 5	69
Figura 62 Respuesta en frecuencia optimización 6	71
Figura 63 Respuesta en frecuencia optimización 7	73
Figura 64 Respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión del divisor de 5 puertos optimizado en modo TE10	73
Figura 65 Respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión del divisor de 5 puertos optimizado en modo TE01	74
Figura 66 Fase de los parámetros de transmisión del modo TE10.....	75
Figura 67 Fase de los parámetros de transmisión del modo TE01.....	75
Figura 68 Escalado del diseño final	77
Figura 69 Respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión del dispositivo escalado a 40GHz	77
Figura 70 Respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión escalados a 40GHz modo TE10	78
Figura 71 Respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión escalados a 40GHz modo TE01	78
Figura 72 Análisis de fase de los coeficientes de transmisión en modo TE10	79
Figura 73 Análisis de fase de los coeficientes de transmisión en modo TE01	79

Resumen

El presente proyecto de titulación tiene como finalidad emplear la bibliografía sobre guías de onda cuadrada para el diseño y optimización de un divisor tipo T de 5 puertos para la banda Ku (1 puerto de entrada y 4 puertos de salida), teniendo en cuenta que para el diseño final se parte del diseño individual de un divisor tipo T de 3 puertos, un codo a 90° achafnado y un divisor tipo Y de 3 puertos (modificación del divisor tipo T), esto con la finalidad de obtener un diseño totalmente acoplado. Luego de la unificación de los diseños individuales, se procede a realizar optimizaciones en el diseño hasta conseguir en la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión un ancho de banda de 1.082 GHz y 1.021 GHz para los modos TE₁₀ y TE₀₁ respectivamente, dando como resultado un ancho de banda promedio de 1.051 GHz, representando el 6.917% del ancho de banda útil de la banda Ku con pérdidas de retorno alrededor de -25dB, mientras que la respuesta de los coeficientes de transmisión se encuentran cercanos a -6dB en los puertos de salida, consiguiendo de esta manera dividir la potencia de entrada en 4 partes iguales para cada una de las salidas. Se realiza un escalado de frecuencia a 40GHz que se consigue disminuyendo las dimensiones de la guía de onda cuadrada, dando como resultado un ancho de banda de 2.926 GHz para el modo TE₁₀ y 2.765 GHz para el modo TE₀₁, en promedio un ancho de banda de 2.845 GHz alcanzando un 7.175% del ancho de banda disponible.

Palabras claves: Guía de onda cuadrada, divisor tipo T, codo achafnado, coeficientes de transmisión y reflexión.

Abstract

The purpose of this degree project is to use the bibliography on square wave guides for the design and optimization of a 5-port T-type divider for the Ku band (1 input port and 4 output ports), taking into account that for the final design we start from the individual design of a 3-port T-type divider, a 90° chamfered bend and a 3-port Y-type divider (modification of the T-type divider), this in order to obtain a fully coupled design. After the unification of the individual designs, optimizations are made in the design until the frequency response of the reflection coefficients is achieved with a bandwidth of 1.082 GHz and 1.021 GHz for the TE₁₀ and TE₀₁ modes respectively, resulting in an average bandwidth of 1.051 GHz, representing 6.917% of the useful bandwidth of the Ku band with return losses around -25dB, while the response of the transmission coefficients are close to -6dB in the ports of output, thus managing to divide the input power into 4 equal parts for each of the outputs. A frequency scaling to 40GHz is performed, which is achieved by reducing the dimensions of the square waveguide, resulting in a bandwidth of 2.926 GHz for the TE₁₀ mode and 2.765 GHz for the TE₀₁ mode, on average a bandwidth of 2.845 GHz reaching 7.175% of the available bandwidth.

Keywords: Square waveguide. T-type divider. chamfered bend, transmission and reflection coefficients.

Capítulo I

Planteamiento del problema de investigación

Antecedentes

En la actualidad, las Telecomunicaciones han evolucionado a tal punto de convertirse en un aspecto importante e indispensable dentro de la sociedad, puesto que se encuentran al alcance de todos brindando servicios como Televisión, Internet, Telefonía, comunicaciones satelitales, ubicación y rastreo de objetos, etc. sean para uso cotidiano o militar.

Dentro de las comunicaciones satelitales y móviles, estas señales trabajan en un rango de ondas milimétricas y microondas, es decir comprenden longitudes de onda de 1mm a 1m, esto significa que trabajan en bandas de alta frecuencia, por ende, estos dispositivos son sensibles a pequeños cambios en su estructura, además por lo antes descrito se usan las ecuaciones de Maxwell para caracterizar su comportamiento (Pascual, 2012).

Al trabajar en altas frecuencias, el análisis de dispositivos divisores de potencia tipo T se lo realiza a través de los Parámetros Scattering mediante los parámetros de reflexión S11 y transmisión S12, donde para obtener un diseño adecuado se requiere que cada puerto de salida proporcione -3 dB para dispositivos de 3 puertos y -6 dB para dispositivos de 5 puertos, uno de entrada y 4 de salida para transmisión, mientras que para reflexión se establece un nivel de -15 dB para el ancho de banda de las frecuencias de trabajo. (Xinyu & Bosisio, 2005).

Las guías de onda son elementos pasivos que sustituyen a las líneas de transmisión y entre sus principales ventajas presenta bajas pérdidas y buen aislamiento entre sus componentes, pese a sus grandes prestaciones tienen como principal desventaja su peso y volumen; esta tecnología es utilizada principalmente para la fabricación de divisores de potencia, multiplexores, filtros, circuladores, etc. (Muñoz, 2017).

Justificación

En la actualidad existe una mayor demanda en los servicios de telecomunicaciones, mismos que requieren optimización en cuanto al uso de ancho de banda, potencia y pérdidas de retorno para obtener mejores sistemas, estos utilizan cada vez más señales de RF, componentes y subsistemas. Los diseñadores necesitan dirigir estas señales a más de un destino o combinar varias señales, para que el sistema nos garantice el enrutamiento de la señal sin degradación debido a la falta de carga de impedancia, manteniendo los requisitos críticos de tamaño y costo (Pini, 2019).

Los divisores de potencia satisfacen esta necesidad, puesto que son elementos pasivos, es decir que no tienen la capacidad de generar potencia por sí mismos, sin embargo, dividen una señal en dos o más señales de menor potencia y se clasifican en divisores tipo T, divisores radiales, divisores radiales, cónicos, entre los más importantes (Pantoja, 2019).

Los mismos son considerados elementos importantes para el diseño de amplificadores de potencia en frecuencias de microondas y ondas milimétricas, ya que estos sistemas manejan distintas señales tanto para la transmisión (una banda de frecuencia) como para la recepción (otra banda de frecuencia), por lo cual la utilización de divisores de potencia es indispensable, debido a que se encargan de distribuir y combinar una señal para posteriormente unir las señales acorde al requerimiento de la aplicación. El diseño de la amplificación de las señales milimétricas se realiza a partir de amplificadores de estado sólido que hace referencia a circuitos semiconductores, los cuales presentan entre sus desventajas altos costos, el tamaño y complejidad que requiere el diseño de sus elementos (Salazar, 2017).

Uno de los divisores de potencia más común es la unión tipo T, este es un divisor de potencia de tres puertos, recíproco, sin pérdidas y se los puede fabricar en tecnología SIW, guía de ondas y microstrip (García, 2007).

La característica principal de la guía de onda cuadrada es que permite transmitir los modos de propagación Transversal Eléctrico TE₀₁ y TE₁₀ a una misma frecuencia, esto debido a la simetría en sus dimensiones. Esta guía de onda cuadrada es útil cuando se necesita obtener una polarización dual (Torre, 2016).

El presente proyecto de Titulación se enfoca en el diseño y optimización de codos y uniones tipo T, con ayuda de guía de onda cuadrada que su uso en codos presenta un excelente desempeño en cuanto al ancho de banda disponible del ~34%, manteniendo las pérdidas de retorno y aislamiento en -30dB para la banda de frecuencia Ku (Cano & Mediavilla, 2017).

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un Divisor de 5 puertos en guía de onda cuadrada utilizando una unión tipo –T como base y codos en guía de onda cuadrada.

Objetivos Específicos

- Análisis e investigación del estudio del estado del arte y conceptos básicos correspondientes a guías de onda cuadrada, unión tipo T y divisor de tres y cinco puertos.
- Simular en el Software CST Studio el diseño del divisor de 5 puertos en guía de onda cuadrada
- Optimizar y validar el diseño del divisor de 5 puertos en guía de onda cuadrada mediante cambios en sus dimensiones de los septum y flanges.
- Elaborar en impresión 3D un prototipo del divisor de 5 puertos.

Capítulo II

Fundamento Teórico

Guías de Onda

Se denomina guía de onda a aquellas estructuras huecas en forma de tubo, que tienen la capacidad de propagar energía en forma de onda electromagnética en su interior, estas guías de onda pueden ser rectangulares, circulares o cuadradas (Cronin, 1995).

La propagación se produce en el interior de su estructura, en el dieléctrico, generalmente de aire, donde las ondas rebotan en las paredes de la guía en forma de zigzag (Pozar, 2012).

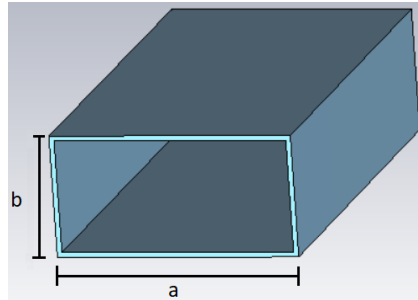
Tipos de guías de Onda

Guía de onda rectangular

Las guías de onda rectangulares son dispositivos huecos de material conductor, como su nombre lo indica tienen una sección transversal de forma rectangular, de dimensiones “a” x “b”, donde “a” es el lado más largo como se indica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Donde sus paredes conductoras encierran los campos electromagnéticos y los guían (Liao, 1980).

Figura 1

Guía de onda rectangular



La geometría de la guía de onda mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, permite que existan los modos Transversal Eléctrico y Transversal Magnético, denotados TE_{mn} y TM_{mn} respectivamente, donde “n” y “m” son los subíndices que definen los modos, en este tipo de guías de onda se define el modo TE_{10} como el modo fundamental (Pozar, 2012).

La ecuación 1 representa la frecuencia de corte en guías de onda rectangulares, en función de la velocidad de propagación de la luz y los lados “a” y “b” de la guía de onda.

$$f_c = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1)$$

El modo fundamental de la guía de onda rectangular TE_{10} , define la frecuencia de corte para dicho modo, donde a partir de la Ecuación 1 se puede reducir a la Ecuación 2, tomando en cuenta los valores de $m=1$ y $n=0$. (Tomasi, 2003).

$$f_c = \frac{c}{2a} \quad (2)$$

Las guías de onda rectangulares se encuentran estandarizadas como se observa en la Tabla 1 acorde a su frecuencia de trabajo y a sus dimensiones de largo y ancho.

Tabla 1*Estándar para guías de onda rectangular*

Banda de Frecuencia	Estándar de guía de onda	Límites de frecuencia (GHz)	Dimensiones internas (mm)
Banda R	WR-340	1.7 a 2.6	109.22 x 54.61
Banda D	WR-340	2.2 a 3.3	86.36 x 43.18
Banda S	WR-284	2.6 a 3.95	72.136 x 34.036
Banda E	WR-229	3.3 a 4.9	58.166 x 29.21
Banda G	WR-187	3.95 a 5.85	47.5488 x 22.1488
Banda F	WR-159	4.9 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 10.0	28.4988 x 12.6238
Banda X	WR-90	8.2 a 12.4	22.86 x 10.16
Banda Ku	WR-62	12.4 a 18.0	15.7988 x 7.8994
Banda K	WR-51	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	33.0 a 50.0	5.6896 x 2.8448
Banda U	WR-19	40.0 a 60.0	4.7752 x 2.3876
Banda V	WR-15	50.0 a 75.0	3.7592 x 1.8796
Banda E	WR-12	60.0 a 90.0	3.0988 x 1.5494
Banda W	WR-10	75.0 a 100.0	2.54 x 1.27

NOTA: Tabla obtenida de (MI-WAVE, 2007)

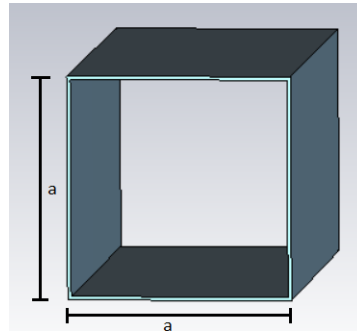
Guía de onda cuadrada

Las guías de onda cuadradas se caracterizan por tener sus lados iguales, definidos por un valor “a”, como se muestra en la Figura 2, la ventaja principal de estas guías de onda es

propagar los modos TE_{10} y TE_{01} a la misma frecuencia de corte, la matemática de estas guías es similar a las guías de onda rectangulares, con la variante de que “ $b=a$ ” (Torre, 2016).

Figura 2

Guía de onda cuadrada



Modos de propagación

Los principales modos de propagación existentes son TEM, TE, TM, siendo Transversal Electromagnético, Transversal Eléctrico y Transversal Magnético respectivamente.

El modo TEM presenta como su característica esencial la no existencia de componentes perpendiculares en dirección del campo eléctrico y magnético (Pozar, 2012).

El modo TE también conocido como onda H, se caracteriza por tener el campo eléctrico perpendicular a la dirección de propagación; además de no contener su componente eléctrica en la dirección de propagación (Pozar, 2012).

El modo TM u onda E, se caracteriza porque su campo magnético es perpendicular a la dirección de propagación, y no contiene su componente magnética en la dirección de propagación (Pozar, 2012).

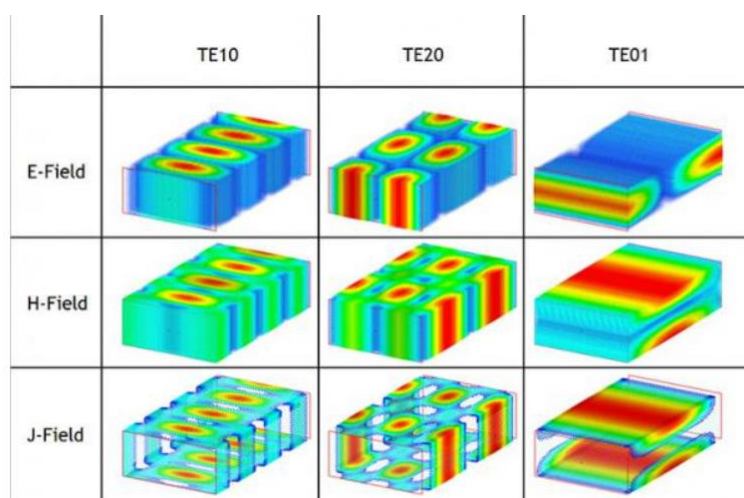
En las diferentes guías de onda estudiadas anteriormente, a diferencia de líneas de transmisión, se obtiene que los campos que no contienen todas sus componentes llegan a

satisfacer las condiciones de contorno de las guías de onda, es decir que las soluciones $E_z=0$ y $H_z=0$ son posibles (Collin, 2001).

En la Figura 3 se observa el patrón de radiación de los modos de propagación en una guía de onda rectangular.

Figura 3

Modos de propagación en guía de onda rectangular



Nota. Imagen obtenida de (Navarro & Toma, 2017)

Uniones de guía de onda tipo T

Las uniones de guía de onda son utilizadas para acoplar impedancias, para conectar las diferentes secciones de las guías de onda, ya sea en serie o paralelo a la guía de onda principal. Así como también son utilizadas en aplicaciones como Divisores, Acopladores, Combinadores, se clasifican en uniones tipo E y H. (Pozar, 2012)

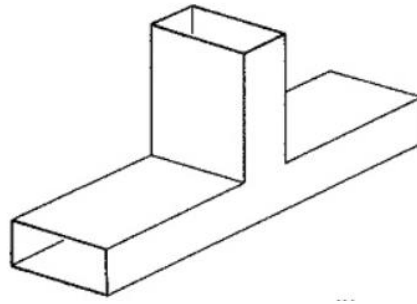
Unión T tipo E

Este tipo de unión se denomina tipo E, unión de voltaje o serie porque sus salidas se encuentran desfasadas 180° entre sí, además de que su brazo de unión se extiende desde la

guía en la misma dirección del campo eléctrico (E), como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** (Poole, 2016)

Figura 4

Unión T tipo E



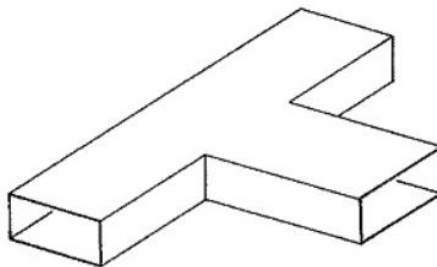
Nota. Imagen obtenida de (Tao, 2015)

Unión T tipo H

Denominada también unión de corriente o paralelo, debido a que el eje de su brazo lateral es paralelo al campo magnético H y sus salidas se encuentran entre sí en fase como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** (Poole, 2016).

Figura 5

Unión T tipo H



Nota. Imagen obtenida de (Tao, 2015)

Capítulo III

Elementos utilizados

Software CST Studio Suite 2021

El Software CST Studio (Computer Simulation Technology), permite realizar simulaciones de alta frecuencia, con un rendimiento elevado para el análisis y diseño electromagnético. En cuanto a la creación de estructuras CST Studio presenta una potente interfaz gráfica basada en el modelado tridimensional (ACIS) que le permite diseñar sólidos más robustos, así como también emplean un enmallado automático con la finalidad de mejorar el diseño y obtener una mayor eficiencia (Systems, 2019).

Por otra parte, CST Studio permite realizar optimizaciones a los diseños para mejorar su rendimiento, esto gracias a que entre sus paquetes se incluye optimizadores locales y globales.

A continuación, la Tabla 2 detalla los requerimientos mínimos para la instalación de CST Studio.

Tabla 2

Requerimientos para la instalación de CST Studio

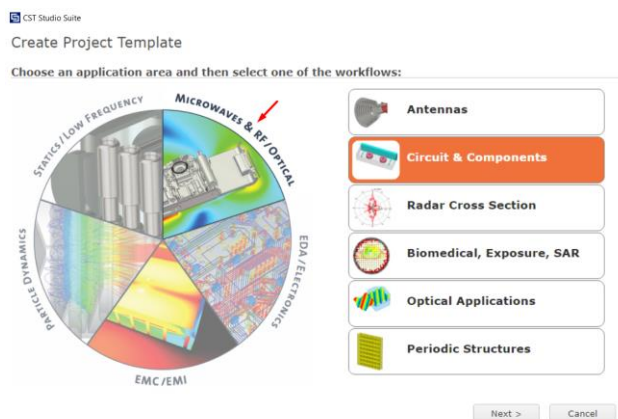
Componente	Requerimiento recomendado
Sistema operativo	Windows 7 (SP1) en adelante
Espacio libre disponible	100 GB
Procesador	Intel o AMD compatible con instrucciones SSE2
Memoria RAM	16 GB
Tarjeta gráfica	Tarjeta dedicada a aplicaciones CAD

Nota. Tabla reestructurada y obtenida (Systems, 2019)

La interfaz de usuario de CST Studio, es muy amigable para el diseñador al ser intuitiva y fácil de entender, se procede con la creación de un proyecto con las características necesarias para el desarrollo del presente trabajo, partiendo desde la selección de la aplicación que se va a desarrollar, para nuestro caso de estudio se elige MICROWAVES & RF/OPTICAL y la opción *Circuits & Components* como se indica en la Figura 6.

Figura 6

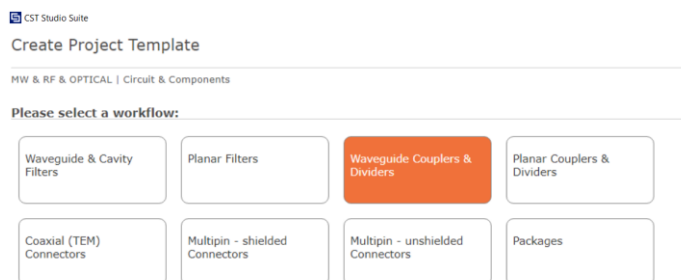
Selección del Template para el diseño de la aplicación.



Una vez seleccionado el *modo Circuits & Components*, se despliega un nuevo submenú, donde se procede a elegir la opción *Waveguides Couples & Dividers* según la Figura 7.

Figura 7

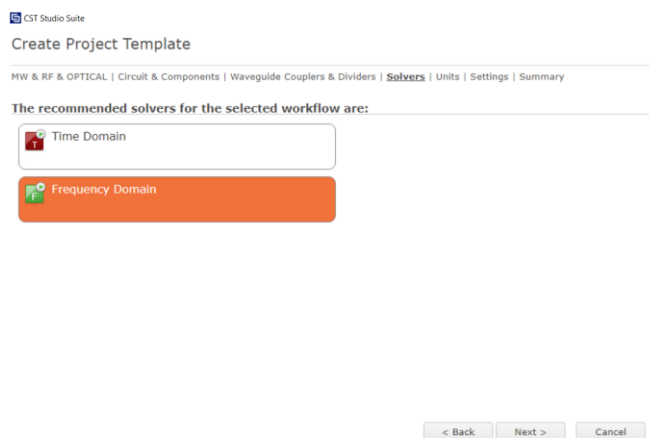
Selección del Template Waveguides Couples & Dividers



Al continuar con configuración del Template de la aplicación nos encontramos con un nuevo submenú, donde seleccionamos *Frequency Domain*, como se indica en la Figura 8.

Figura 8

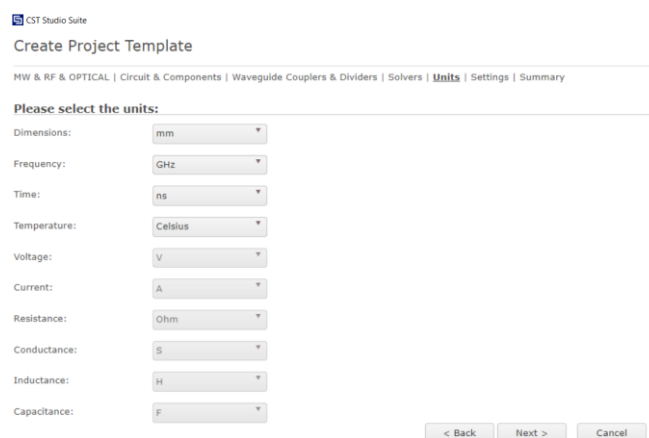
Selección del modo de respuesta



Luego se procede a la configuración de las unidades en que se va desarrollar el diseño, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Configuración de las unidades del diseño



Ahora, como se muestra en la Figura 10 se ingresa los valores de la frecuencia mínima, máxima donde se realiza el análisis y la frecuencia de trabajo, así como también los monitores del campo eléctrico y magnético.

Figura 10

Valores de frecuencia para el análisis.

CST Studio Suite
Create Project Template

MW & RF & OPTICAL | Circuit & Components | Waveguide Couplers & Dividers | Solvers | Units | **Settings** | Summary

Please select the Settings

Frequency Min.: 14 GHz

Frequency Max.: 16 GHz

Monitors: E-field H-field Farfield Power flow Power loss

Define at: 15.2 GHz
Use semicolon as a separator to specify multiple values.
e.g. 20;30;30.1;30.2;30.3

< Back Next > Cancel

Con el ingreso de las frecuencias donde se realiza el análisis, se presenta un resumen de los parámetros ingresados según la Figura 11, se pulsa finalizar y se termina con la configuración del *Template* para el diseño de la aplicación.

Figura 11

Resumen de los parámetros ingresados

CST Studio Suite
Create Project Template

MW & RF & OPTICAL | Circuit & Components | Waveguide Couplers & Dividers | Solvers | Units | Settings | **Summary**

Please review your choice and click 'Finish' to create the template:

Template Name: Waveguide Coupler & Divider_12

Solver	Units	Settings
	- Dimensions: mm	- Frequency Min.: 14 GHz
	- Frequency: GHz	- Frequency Max.: 16 GHz
	- Time: ns	- Monitors: E-field, H-field
	- Temperature: Celsius	- Define at: 15.2 GHz

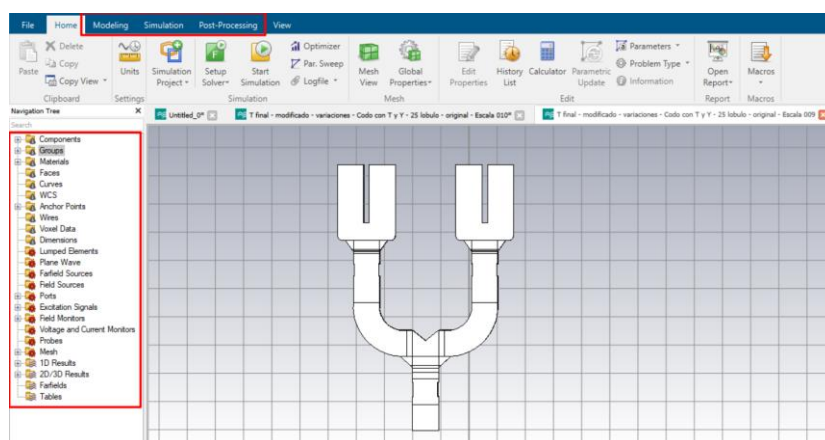
Waveguide couplers, dividers/combiners, Isolators, Circulators, etc.

< Back **Finish** Cancel

Finalmente, con el Template configurado, en la Figura 12 se muestra en la parte izquierda el contenido clasificado por carpetas de diseño, donde se encuentra la información acerca de los componentes, curvas, puertos, monitores de campo, los resultados se presentan en la carpeta 1D *Results* y 2D/3D *Results*. Adicional en la parte superior se encuentran las herramientas para el modelado, simulación y postprocesamiento, mientras que en la parte central se encuentra el diseño del dispositivo.

Figura 12

Ventana principal de CST Studio



Capítulo IV

Diseño y Resultados

En la presente sección se desarrolla el diseño y la simulación del Divisor de Potencia tipo T en guía de onda cuadrada, mismo que consta de tres partes fundamentales: a) diseño del divisor tipo T, b) diseño del codo de 90° y c) diseño del divisor tipo T modificado con terminación en Y.

Diseño del divisor tipo T

Para el diseño del divisor tipo T, se define la frecuencia de trabajo $f_0 = 15.2GHz$, a continuación, con ayuda de la ecuación (1) se calcula el valor el valor de la frecuencia de corte del modo TE10 con $a = 12.5 mm$, de la siguiente manera:

$$f_{c_{TE10}} = \frac{c}{2a}$$

$$f_{c_{TE10}} = \frac{3 * 10^8}{2(12.5 * 10^{-3})}$$

$$f_{c_{TE10}} = 12GHz$$

Cabe recalcar que, al trabajar en guía de onda cuadrada, la frecuencia de corte para el modo TE01, es la misma frecuencia del modo TE10.

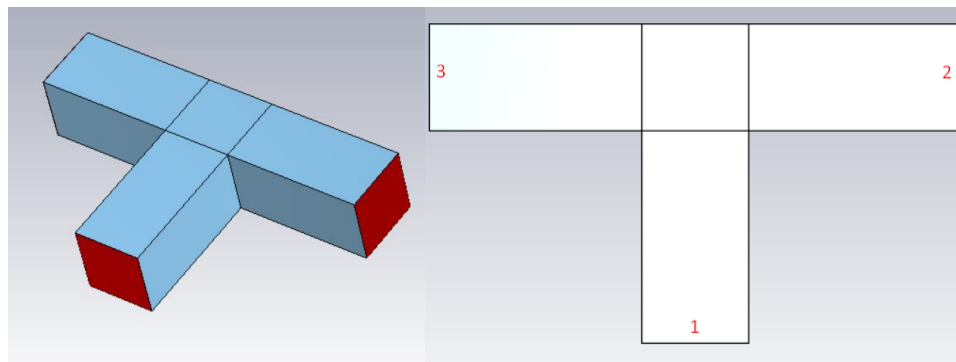
$$f_{c_{TE01}} = f_{c_{TE10}}$$

$$f_{c_{TE01}} = 12GHz$$

Ahora en el software CST Studio, se procede a crear un nuevo proyecto donde se define el valor de la guía de onda cuadrada $a = 12.5 mm$, para posterior diseñar un divisor tipo T con sus respectivos puertos, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13

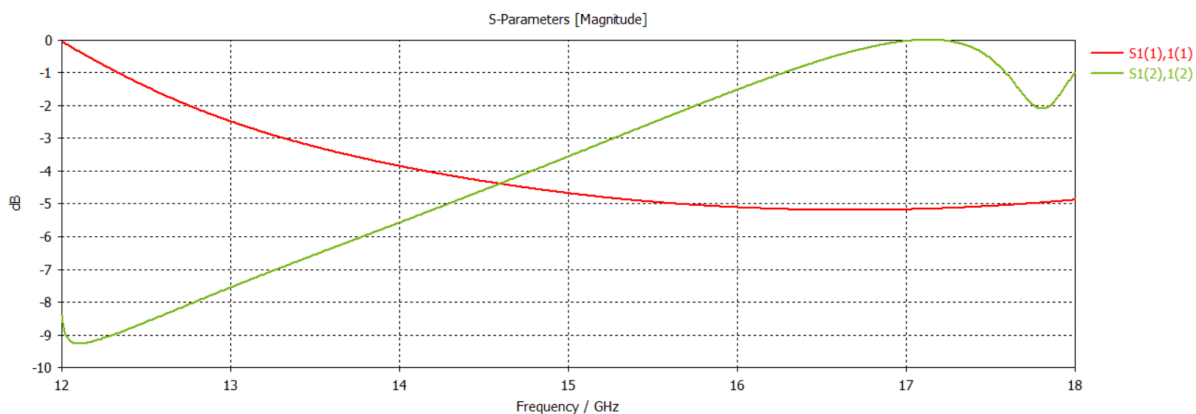
Divisor tipo T con enumeración de sus puertos



Se procede a simular el diseño anterior y se obtiene las gráficas mostradas en la Figura 14, donde los parámetros $S_{1(1),1(1)}$ y $S_{1(2),1(2)}$ corresponden a los coeficientes de reflexión y representan los modos TE₁₀ y TE₀₁ respectivamente.

Figura 14

Respuesta en frecuencia de los parámetros de reflexión del divisor tipo T

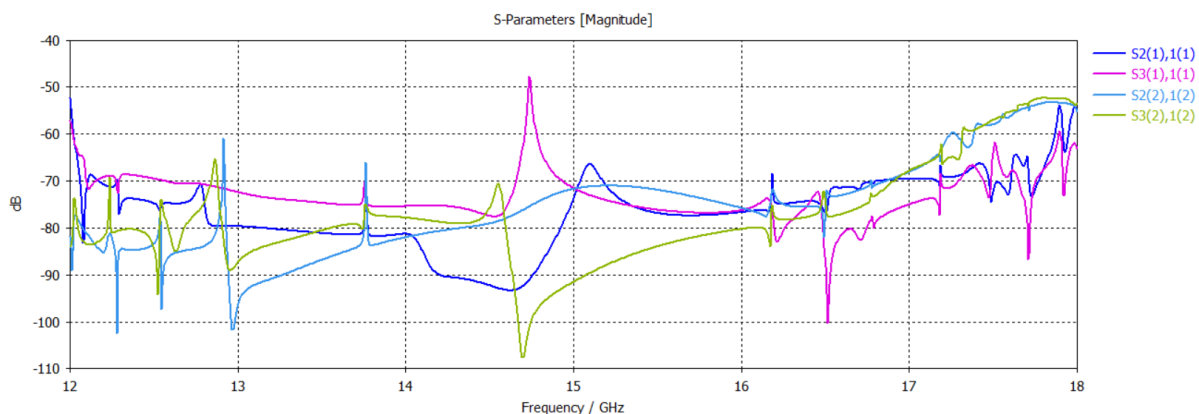


Ahora en la Figura 15, se muestran los coeficientes de transmisión del divisor tipo T diseñado, donde $S_{2(1),1(1)}$; $S_{3(1),1(1)}$ corresponden al modo TE₁₀ y $S_{2(2),1(2)}$; $S_{3(2),1(2)}$ al modo TE₀₁.

Las respuestas en frecuencia mostradas en la Figura 14 y Figura 15 corresponden al diseño del divisor tipo T sin discontinuidades, como se observa no existe una buena respuesta en frecuencia de los parámetros de reflexión como de transmisión, por tal motivo se procede a añadir discontinuidades al diseño inicial.

Figura 15

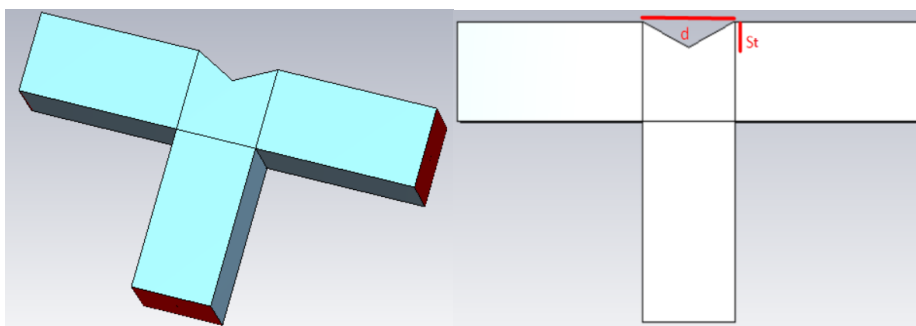
Respuesta en frecuencia de los parámetros de transmisión del divisor tipo T



La primera discontinuidad que se agrega corresponde a la del Septum, para esto se necesita definir los valores d y St , como se observa en la Figura 16; donde d toma el valor del ancho de la guía de onda, es decir $d = 12.5 \text{ mm}$, mientras que el valor óptimo St , se lo encontrará al realizar un barrido posterior.

Figura 16

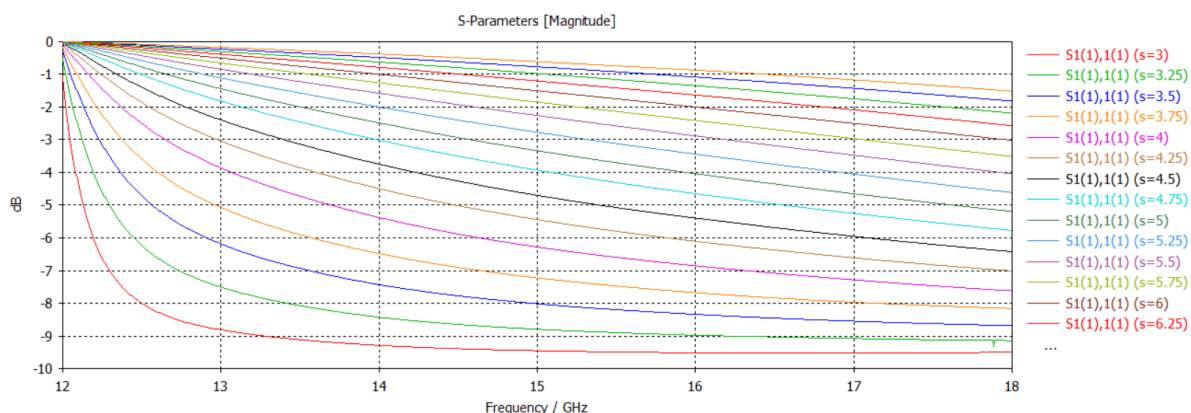
Discontinuidad del Septum



En la Figura 17 se muestra la variación del parámetro S_t de la discontinuidad del Septum en pasos de 0.25 mm para el modo TE_{10} .

Figura 17

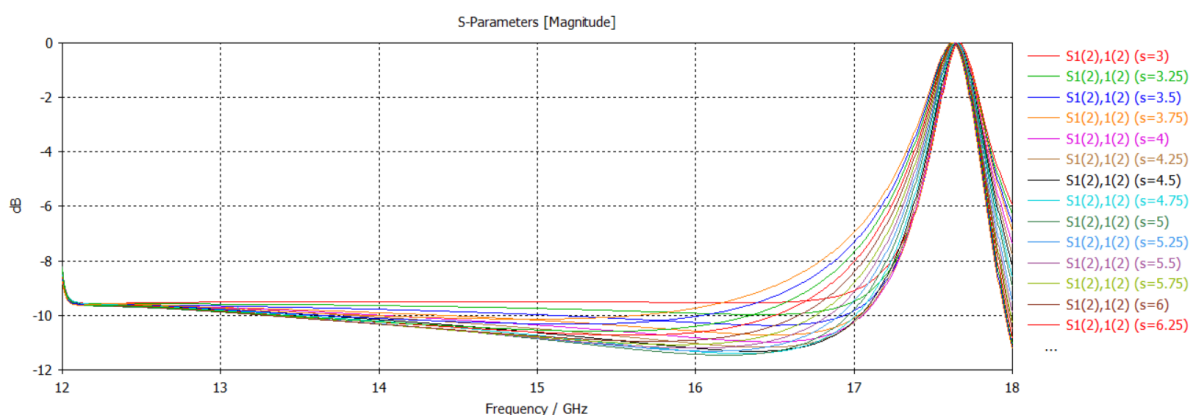
Barrido de S_t en modo TE_{10}



Ahora en la Figura 18 se presenta el barrido del mismo parámetro S_t de la discontinuidad del Septum en el modo TE_{01} .

Figura 18

Barrido de S_t en modo TE_{01}



En la Figura 17 y Figura 18 se observa el barrido del parámetro S_t en toda la banda de frecuencias Ku, con la finalidad de optimizar el diseño y obtener los mejores resultados se procede a tomar un rango de frecuencias dentro de la banda Ku, sobre la cual se va a

trabajar, dicho rango de frecuencias va de 14GHz a 16GHz; por lo tanto para escoger el valor óptimo de St se reduce la simulación del barrido al rango seleccionado, como se muestra en la Figura 19 y Figura 20.

Figura 19

Barrido de St en el rango de 14GHz a 16GHz del modo TE₁₀

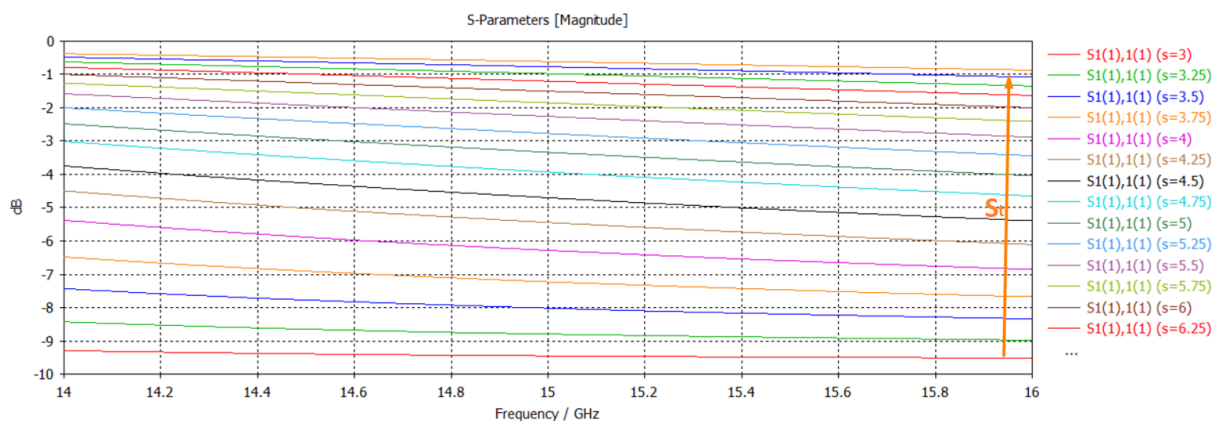
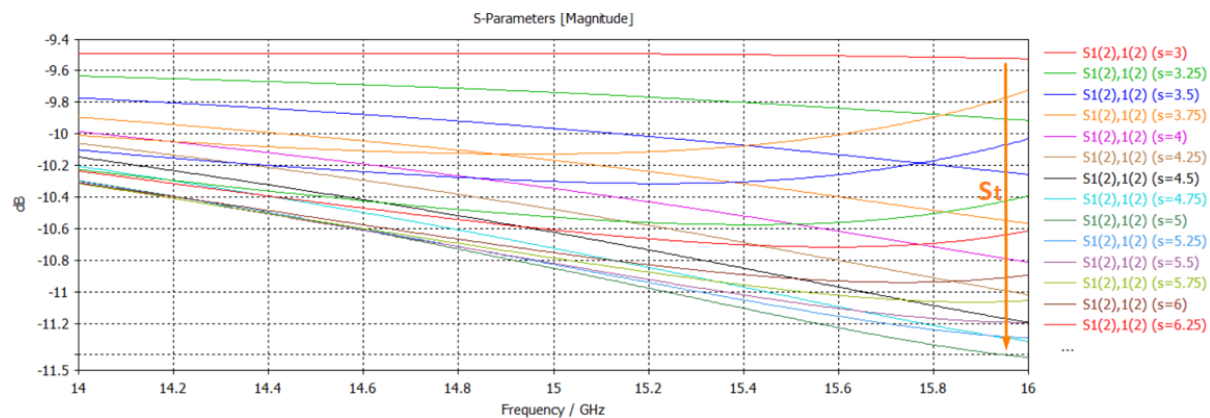


Figura 20

Barrido de St en el rango de 14GHz a 16GHz del modo TE₀₁

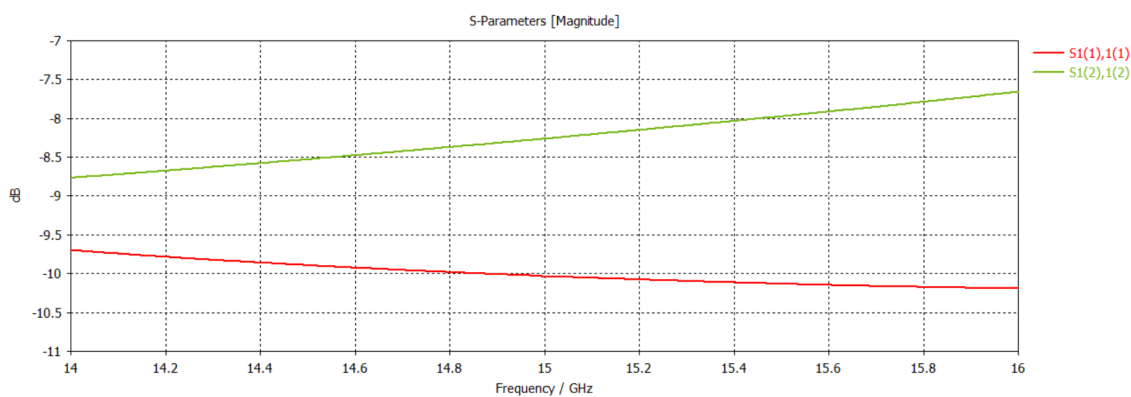


Como se observa en la Figura 19 y Figura 20, a medida que St aumenta el modo TE₁₀ tiende a 0dB, mientras que en el modo TE₀₁ ocurre todo lo contrario, es decir a mayor longitud de St se tiende a -12dB, por ende, para obtener buenos resultados se define el valor de $St = 5mm$.

En la Figura 21 se presenta la respuesta en frecuencia del divisor tipo T para el modo TE₁₀ y el modo TE₀₁, con $St = 5\text{mm}$ y $d = 12.5\text{mm}$ para ambos modos.

Figura 21

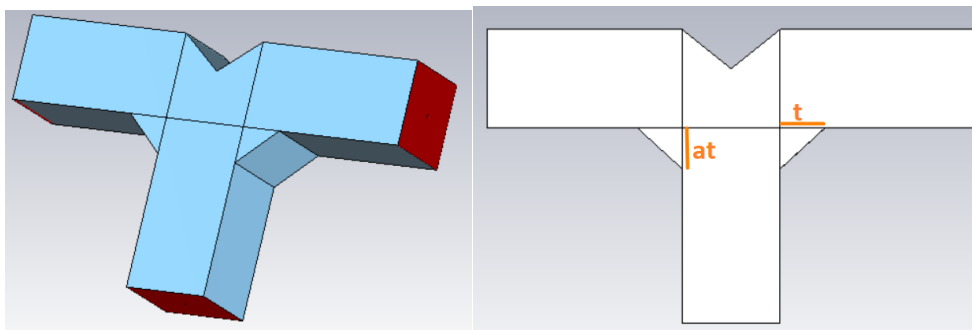
Respuesta en frecuencia divisor tipo T con $St=5\text{mm}$



Ahora, se procede a agregar una nueva discontinuidad en los laterales de las uniones de los puertos, como se observa en la Figura 22.

Figura 22

Discontinuidades laterales



En la Figura 23, se puede ver que al agregar las discontinuidades laterales t y at y realizar un barrido, se logra mejorar la respuesta en frecuencia del modo TE₀₁, mientras que el modo TE₁₀ sufre pequeñas variaciones, a continuación, se procede a obtener la respuesta en

frecuencia con los valores óptimos de a_t y t , siendo estos $a_t = 5.3mm$ y $t = 5.8mm$, como se muestra en la Figura 24.

Figura 23

Barrido de t con a_t fijo

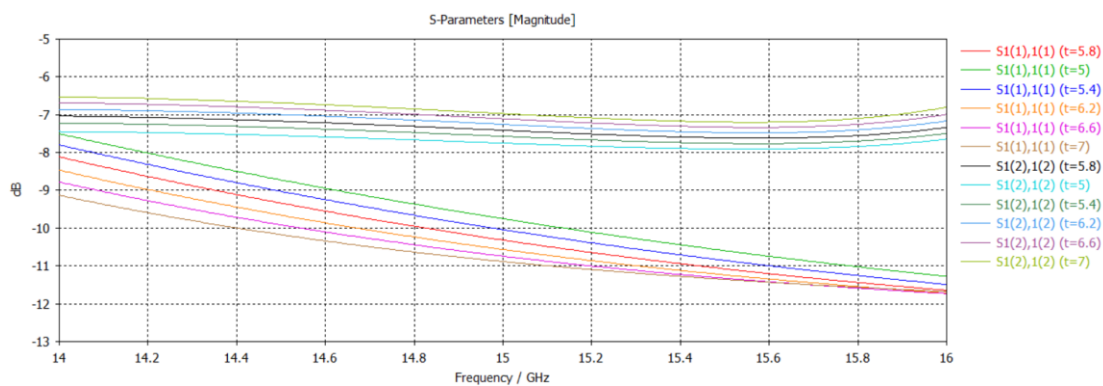
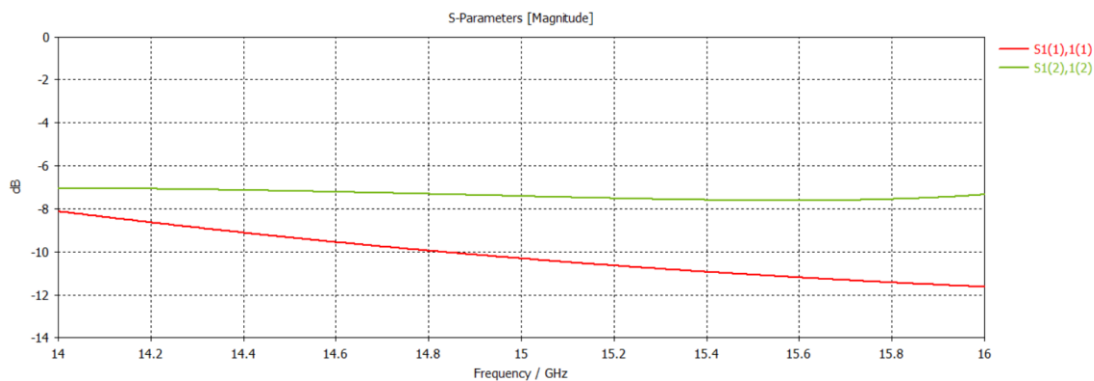


Figura 24

Discontinuidades laterales t y a_t óptimos



A continuación, se modifica en largo de la guía de onda que va hacia el puerto 1, donde p_t se define con un valor fijo $p_t = 12.225mm$, como se muestra en la Figura 25 y se agrega una discontinuidad en el puerto 1, como se observa en la Figura 26.

Figura 25

Largo de la guía de onda en dirección del puerto 1

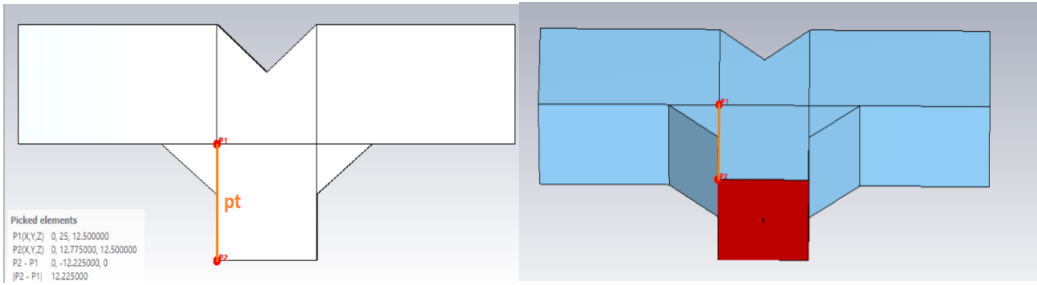
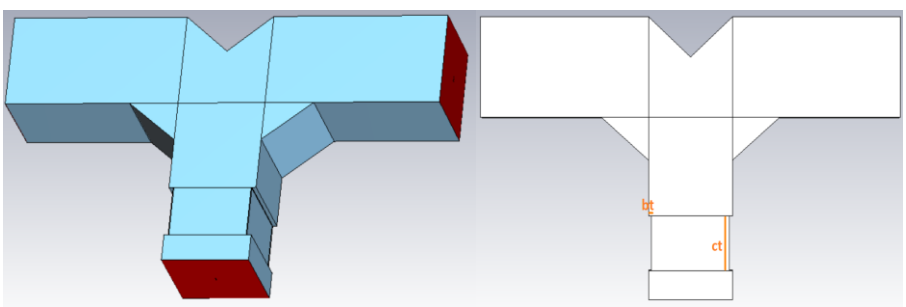


Figura 26

Discontinuidades cerca al puerto 1



Para las discontinuidades se realiza un barrido, partiendo de un valor fijo de bt y variando ct como en la Figura 27 y viceversa como en la Figura 28, con la finalidad de obtener los valores óptimos de bt y ct .

Figura 27

Barrido del parámetro bt con ct fijo

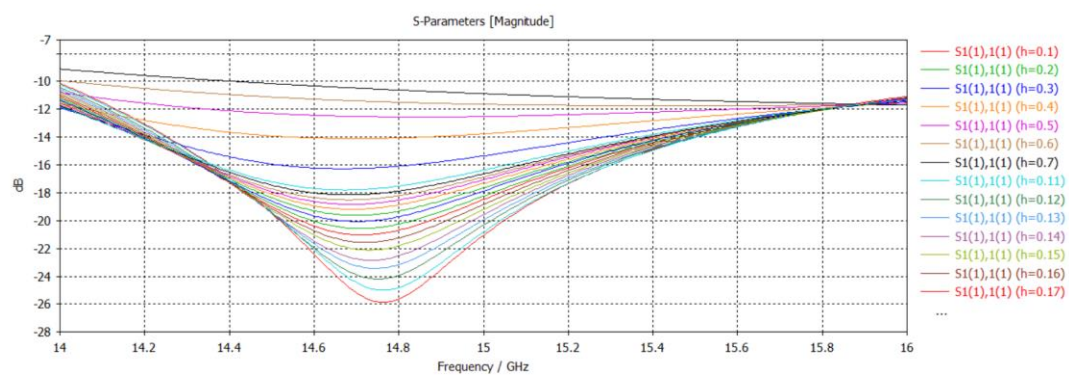
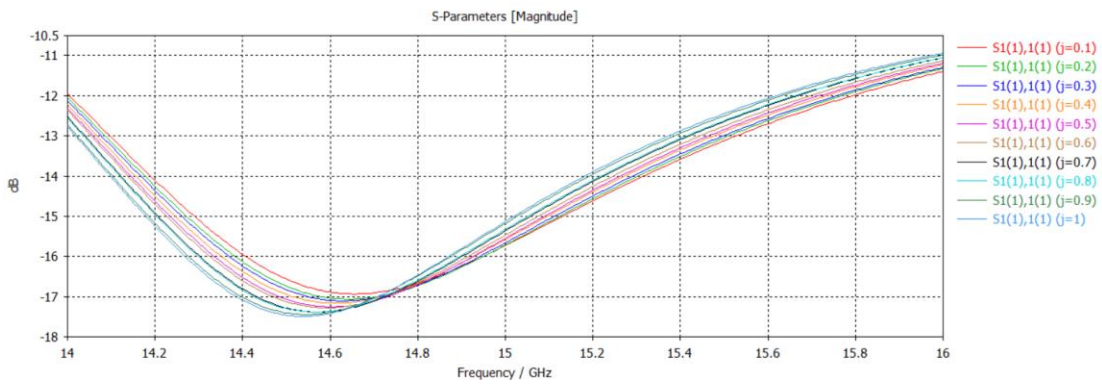


Figura 28.

Barrido del parámetro ct con bt fijo

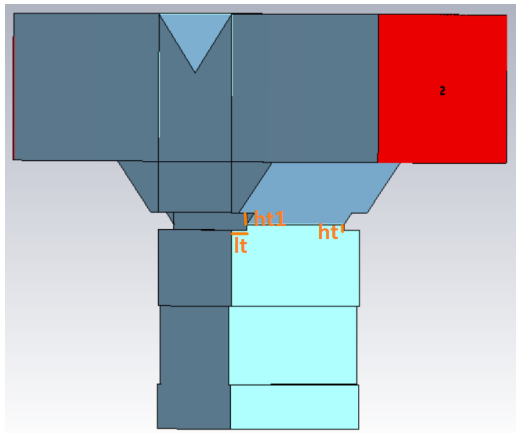


Al realizar el barrido correspondiente a los parámetros bt y ct , se define los valores $bt = 0.45mm$ y $ct = 7mm$.

Ahora se procede a diseñar las discontinuidades cerca al divisor como se muestra en la Figura 29, esta consideración de diseño se la realiza con el fin de obtener una mejor adaptación entre los modos TE_{10} y TE_{01} .

Figura 29

Discontinuidades cerca al divisor



En la Figura 30, Figura 31 se observa el barrido del parámetro ht , con lt y ht_1 fijos, este proceso es importante porque nos permitirá determinar el valor óptimo de los parámetros mencionados, tanto para el modo TE₁₀ como para el modo TE₀₁.

Figura 30

Barrido de ht con ht_1 y lt fijos en modo TE₁₀

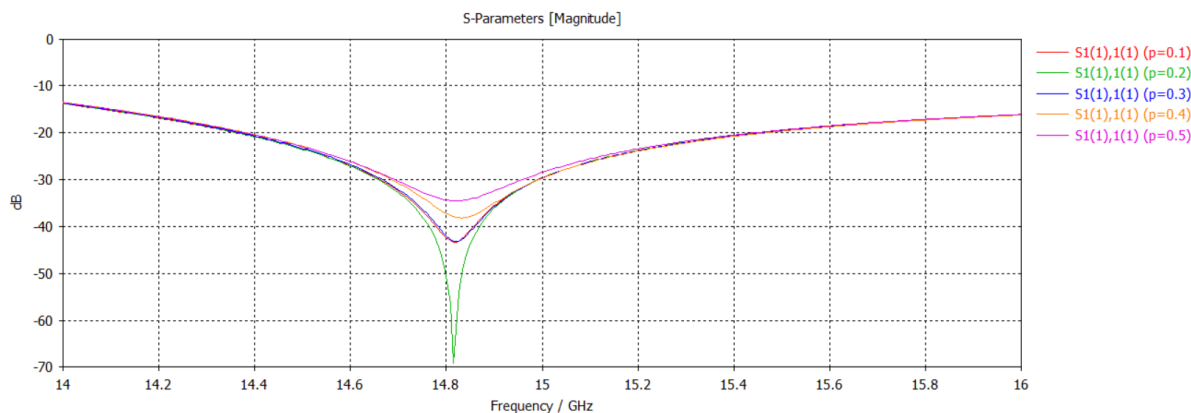
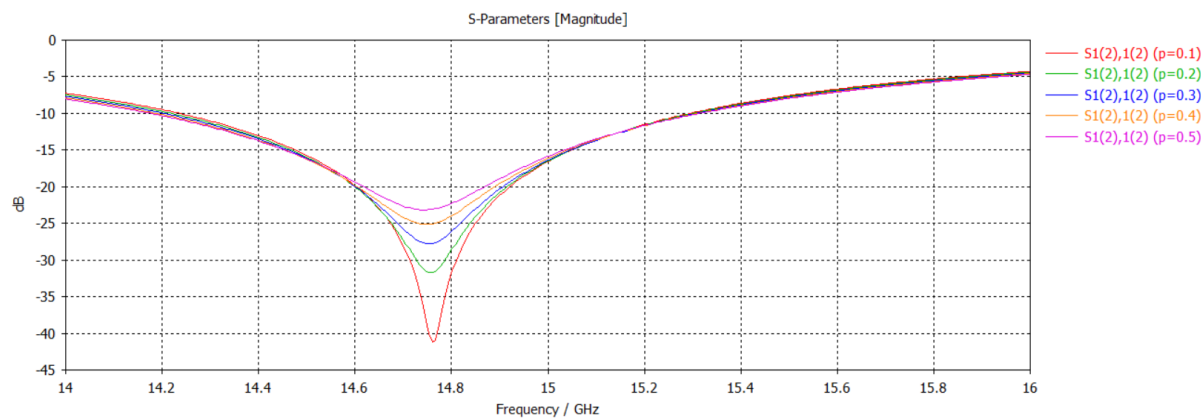


Figura 31

Barrido de ht con ht_1 y lt fijo en modo TE₀₁



Ahora en la Figura 32, Figura 33 se presenta el barrido lt , con ht y ht_1 fijo, luego en la Figura 34, Figura 35, se ver el barrido de ht_1 con ht y lt fijos para ambos modos. Finalmente luego de realizar los barridos respectivos, se define $ht_1 = 1\text{mm}$, $lt = 1.5\text{mm}$ y $ht = 0.475\text{mm}$.

Figura 32

Barrido l_t con h_t y h_{t1} fijos en el modo TE 10

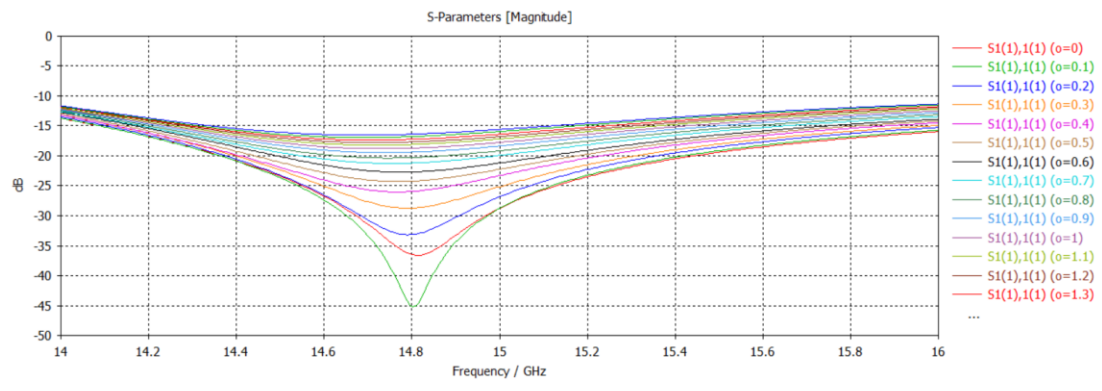


Figura 33

Barrido l_t con h_{t1} y h_t fijo en el modo TE01

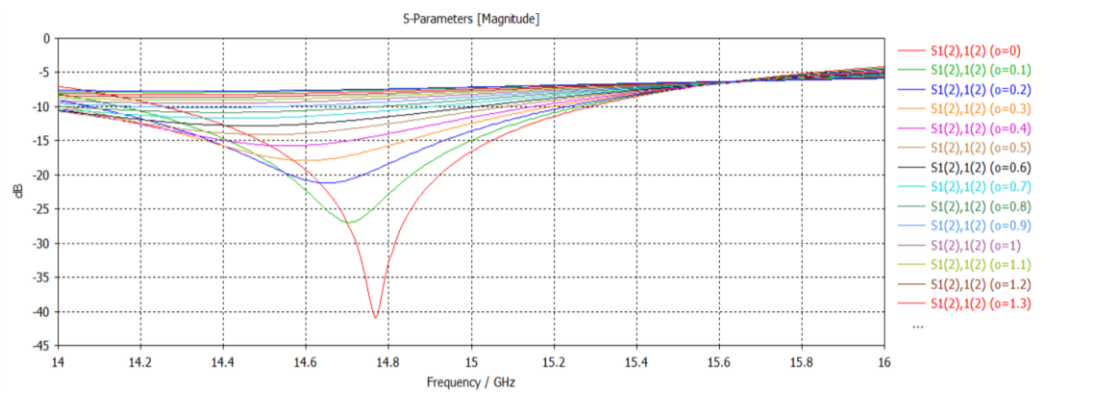


Figura 34

Barrido h_{t1} con h_t y l_t fijo en el modo TE10

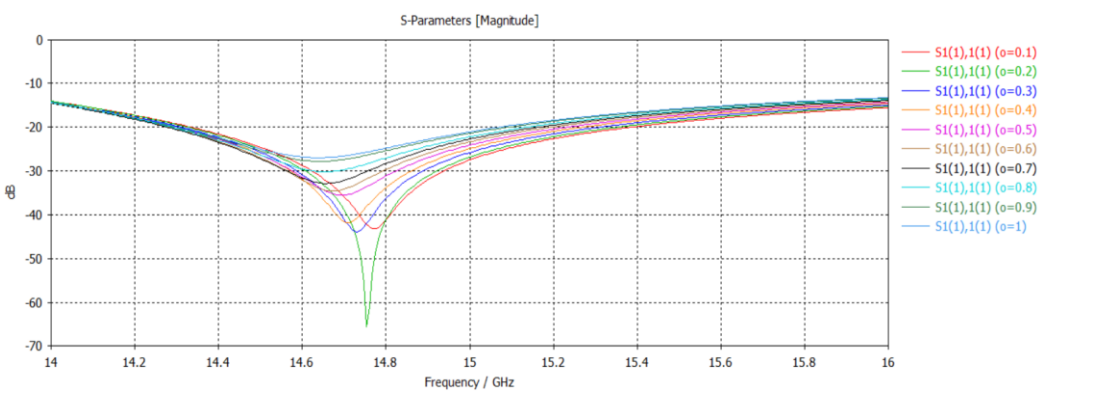
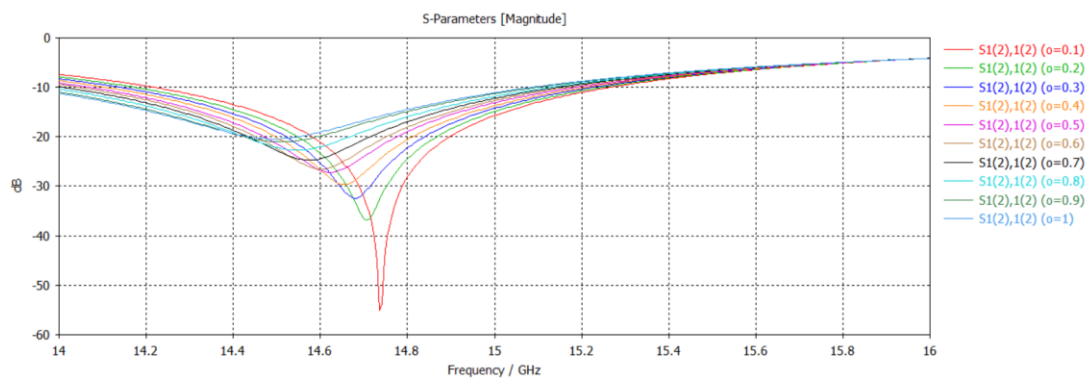


Figura 35

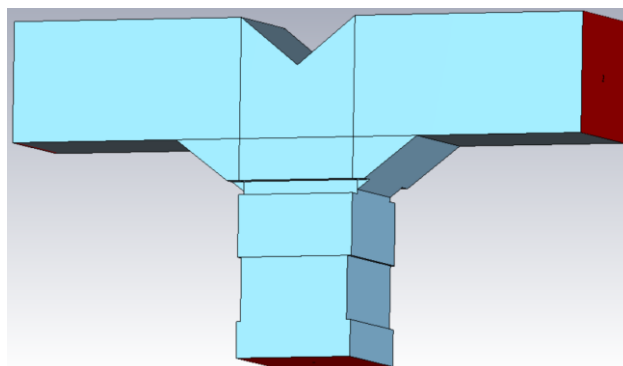
Barrido $ht1$ con ht y lt fijo en el modo TE01



A continuación, en la Figura 36, se muestra el diseño final para el divisor de 3 puertos en guía de onda cuadrada y en la Tabla 3 se presentan los valores óptimos para cada parámetro del diseño.

Figura 36

Diseño final divisor tipo T de 3 puertos

**Tabla 3**

Parámetros del divisor tipo T de 3 puertos

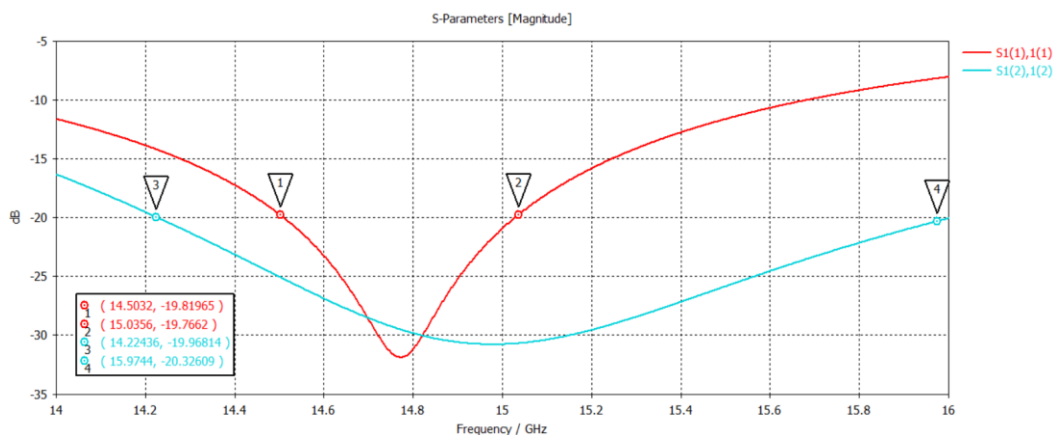
Parámetro	Dimensión (mm)
a	12.5 mm
St	5 mm

Parámetro	Dimensión (mm)
t	5.5 mm
at	5.3 mm
d	12.5 mm
ht	0.575 mm
ht1	1.2 mm
lt	1.35 mm
pt	9.95 mm
bt	0.42 mm
ct	5.8 mm

Ahora en la Figura 37, se muestra la gráfica de los coeficientes de reflexión $S_{1(1),1(1)}$ (rojo) y $S_{1(2),1(2)}$ (celeste) de los modos TE_{10} y TE_{01} respectivamente, como se puede observar las gráficas se encuentran por debajo de -20dB , se observa un ancho de banda de 0.54 GHz para el modo TE_{10} y 1.75 GHz en el modo T_{01} , esto nos permite determinar que el diseño es adecuado, por lo tanto, se procedo con el diseño del codo de 90° achafnado.

Figura 37

Respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión del divisor tipo T de 3 puertos



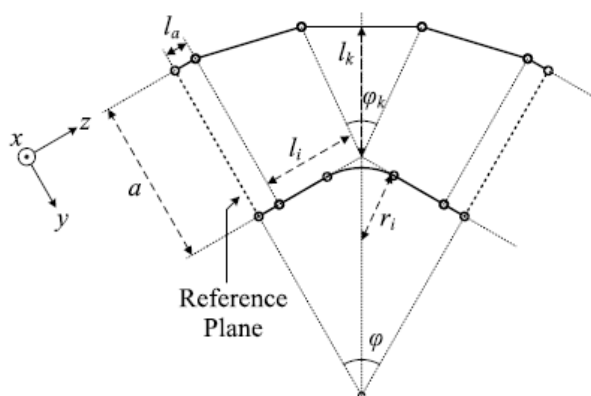
Diseño del Codo de 90° achanflado

El diseño del codo de 90°, se lo realiza siguiendo algunas consideraciones desarrolladas en el artículo científico Wideband Dual-Mode Waveguide Bends (Cano & Mediavilla, 2017), se realizan ciertas modificaciones con la finalidad de optimizar el diseño y el tiempo de simulación.

Las consideraciones de Cano y Mediavilla para el diseño del codo es una curvatura con tendencia circular, a partir de arcos de circunferencia, esto permite tener secciones curvas, que al unirlas dan como resultado un codo de 90° achanflado o redondeado, como se muestra en la Figura 38 (Cano & Mediavilla, 2017).

Figura 38

Esquema codo a 90° achanflado o redondeado



Nota. Imagen obtenida de (Cano & Mediavilla, 2017).

A continuación, en la Tabla 4, se presenta los valores de los diferentes parámetros definidos en la Figura 38 que dan lugar al diseño del codo a 90° achanflado.

Tabla 4

Valores de los parámetros del codo a 90° achaflado.

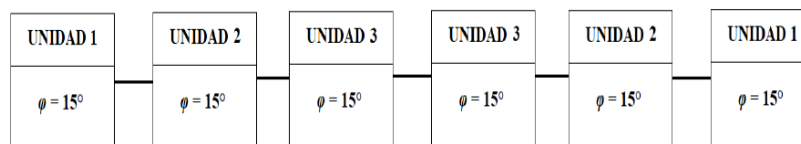
Unidad	$\varphi(^{\circ})$	$\varphi_k (^{\circ})$	r_i	l_i	l_a	l_k
1	15°	19.59°	0.199	0.014	0.108	0.595
2	15°	18.34°	0.063	0.027	0.07	0.596
3	15°	18.11°	0.0885	0.123	0.078	0.596

Nota. Contenido parcial de la tabla presentada por (Cano & Mediavilla, 2017).

Ahora, siguiendo las consideraciones mencionadas anteriormente, se procede a establecer el orden de la disposición de las secciones del codo, como se indica en la Figura 39.

Figura 39

Secciones del codo a 90° achaflado

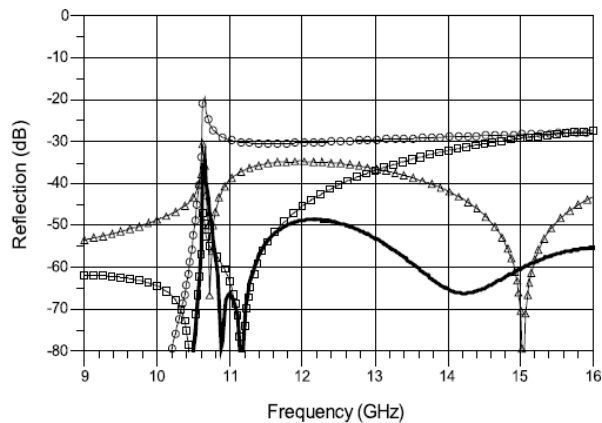


Nota. Imagen obtenida de (Cano & Mediavilla, 2017).

Al realizar la simulación del codo bajo las condiciones anteriores, la Figura 40 muestra la respuesta en frecuencia codo en el modo TE₁₀(línea continua), la Figura 41 muestra la respuesta en frecuencia del codo en modo TE₀₁.

Figura 40

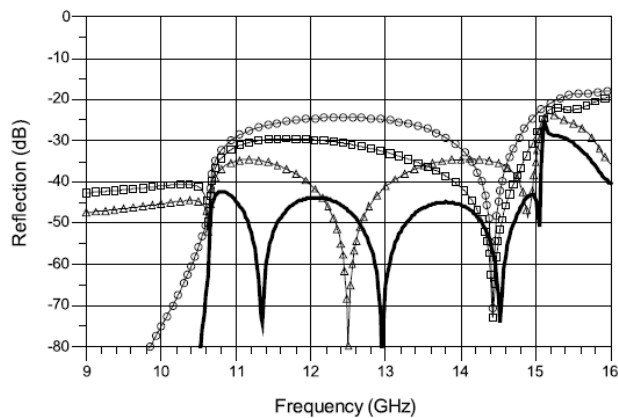
Respuesta en frecuencia del codo a 90° en el modo TE₁₀(línea continua)



Nota. Imagen obtenida de (Cano & Mediavilla, 2017).

Figura 41

Respuesta en frecuencia del codo a 90° en el modo TE₁₀(línea continua)



Nota. Imagen obtenida de (Cano & Mediavilla, 2017).

Ahora para nuestro diseño de codo a 90° achafnado, se toma en cuenta los valores mostrados en la Tabla 5, mismo que corresponden a una variación del diseño original de Cano y Mediavilla.

Tabla 5

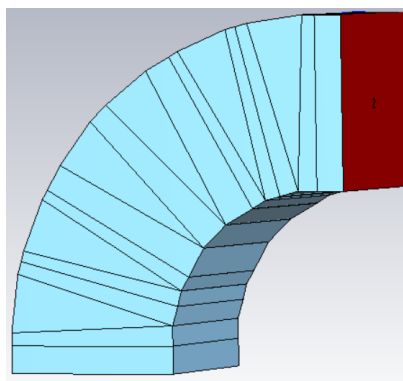
Parámetros para el diseño del codo a 90° achanflado.

Unidad	$\varphi(^{\circ})$	$\varphi_k (^{\circ})$	l_i	l_a
1	15°	19.59°	0.16575	1.2787
2	15°	18.34°	0.3197	0.8288
3	15°	18.11°	1.4563	0.92355

La Figura 42 presenta la estructura del codo a 90° achanflado tomando en cuenta las consideraciones de la Tabla 5 presentada anteriormente.

Figura 42.

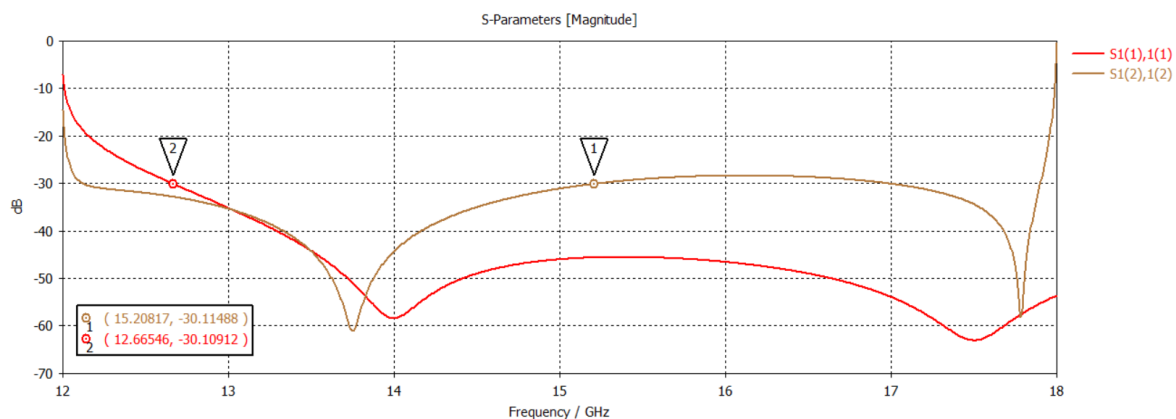
Estructura del codo a 90° achanflado



En la Figura 43, se muestra la simulación de la respuesta en frecuencia del codo a 90° achanflado para el modo TE₁₀ y TE₀₁, representados por los colores rojo y café respectivamente, donde S_{1(1),1(1)} y S_{1(2),1(2)} corresponden a los coeficientes de reflexión.

Figura 43

Respuesta en frecuencia codo a 90° achafnado para el modo TE₁₀ y TE₀₁

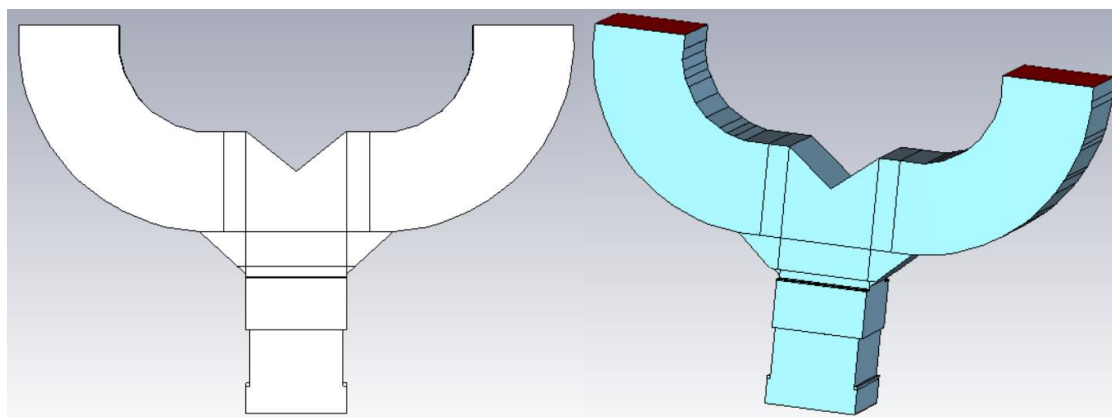


La respuesta en frecuencia del codo a 90° achafnado, presenta valores para ambos modos por debajo de -30dB, en un rango de frecuencia de 12.66546 GHz a 15.20817 GHz, dando como resultado un ancho de banda de 2.54271 GHz.

Continuando con el diseño, se procede a unir el divisor tipo T de 3 puertos con el codo a 90° achafnado, como se muestra en la Figura 44, tomando en cuenta que se debe modificar las dimensiones de la longitud los puertos 2 y 3 iniciales, para acoplarlo adecuadamente al codo de 90° achafnado.

Figura 44

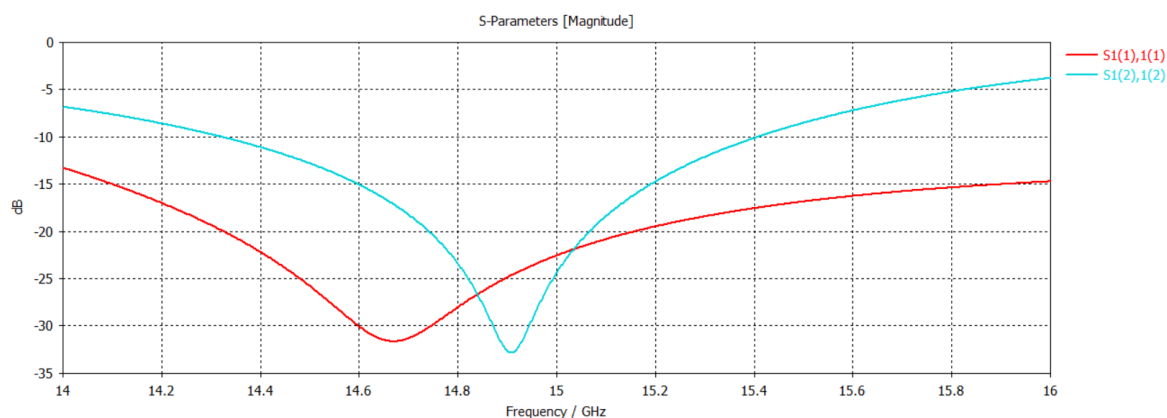
Unión del codo a 90° achafnado con el divisor tipo T de 3 puertos



En la Figura 45, se muestra la respuesta en frecuencia del codo unido al divisor tipo T, como se observa existe un desfase en la frecuencia de trabajo de cada modo TE₁₀(rojo) y TE₀₁(celeste), por ello es necesario realizar optimizaciones con la finalidad de lograr que ambas frecuencias de trabajo se encuentren en el mismo valor.

Figura 45

Respuesta en frecuencia unión del codo a 90° achanflado con el divisor tipo T de 3 puertos



A continuación, luego de realizar modificaciones en el diseño original del divisor de 3 puertos con salida en codo achanflado, en la Tabla 6 se detalla las variaciones en las dimensiones de los parámetros del divisor tipo T, para obtener una mejor respuesta en frecuencia.

Tabla 6

Parámetros en el divisor con salida en codo achanflado modificación 1

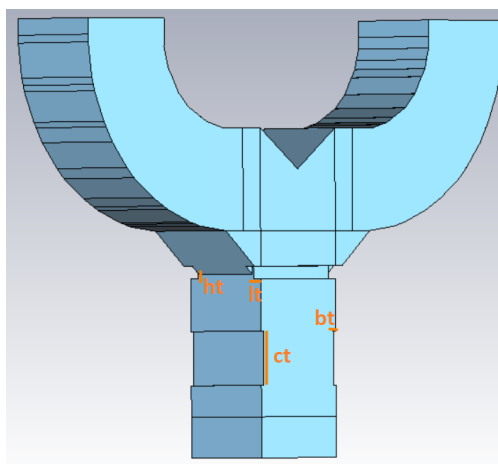
Parámetro	Diseño T Original (mm)	Modificaciones T (mm)
a	12.5 mm	12.5 mm
St	5 mm	5 mm
t	5.8 mm	5.8 mm

Parámetro	Diseño T Original (mm)	Modificaciones T (mm)
at	5.3 mm	5.3 mm
d	12.5 mm	12.5 mm
ht	0.475 mm	0.525 mm
ht1	1 mm	1 mm
lt	1.5 mm	1.3 mm
pt	12.225 mm	12.225 mm
bt	0.47 mm	0.42 mm
ct	7 mm	6.6 mm

La Figura 46 presenta la ubicación de las modificaciones indicadas en la Tabla anterior, mismas que consisten en variar los parámetros ht , lt , bt y ct .

Figura 46

Parámetros modificados en el divisor tipo T en codo achanflado modificación 1

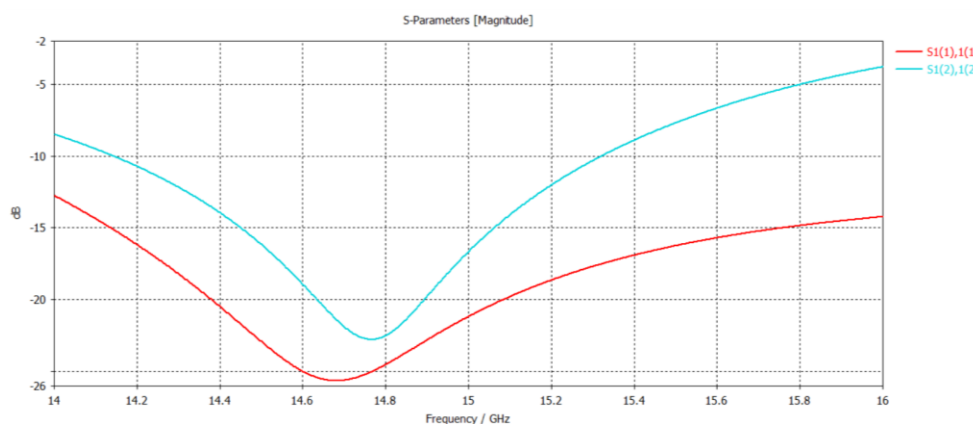


La simulación de los coeficientes de reflexión de la repuesta en frecuencia de los cambios realizados se muestra en la Figura 47, donde a simple vista observamos un cambio en la frecuencia de trabajo (pico mayor) de los modos TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) y TE₀₁ S₁(2),1(2)

(celeste), estas variaciones se deben seguir trabajando y optimizando, puesto que se tienen niveles sobre -26dB, cuando lo adecuado es obtener valores por debajo de -30dB.

Figura 47

Respuesta en frecuencia modificación 1



La Tabla 7 contiene los valores de la segunda modificación respecto al diseño original del divisor tipo T, con esto se busca que los niveles de los coeficientes de reflexión tanto en el modo TE₁₀ como TE₀₁ se encuentren por debajo de -30dB.

Tabla 7

Parámetros modificados en la mejora 2

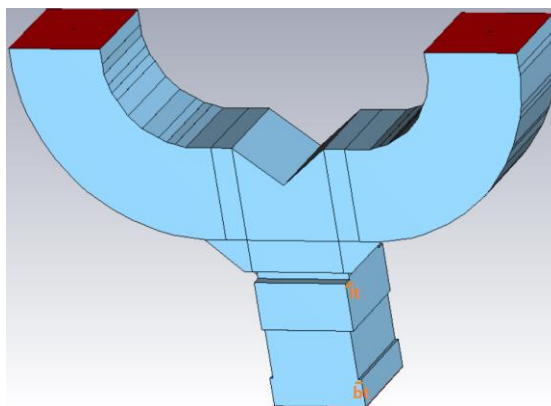
Parámetro	Diseño T Original (mm)	Modificaciones 2 T (mm)
a	12.5 mm	12.5 mm
St	5 mm	5 mm
t	5.8 mm	5.8 mm
at	5.3 mm	5.3 mm
d	12.5 mm	12.5 mm
ht	0.475 mm	1.025 mm
ht1	1 mm	1 mm

Parámetro	Diseño T Original (mm)	Modificaciones 2 T (mm)
lt	1.5 mm	1.3 mm
pt	12.225 mm	12.225 mm
bt	0.47 mm	0.42 mm
ct	7 mm	6.2 mm

La Figura 48 presenta los sitios donde se realiza las variaciones de los parámetros presentados en la Tabla 7.

Figura 48

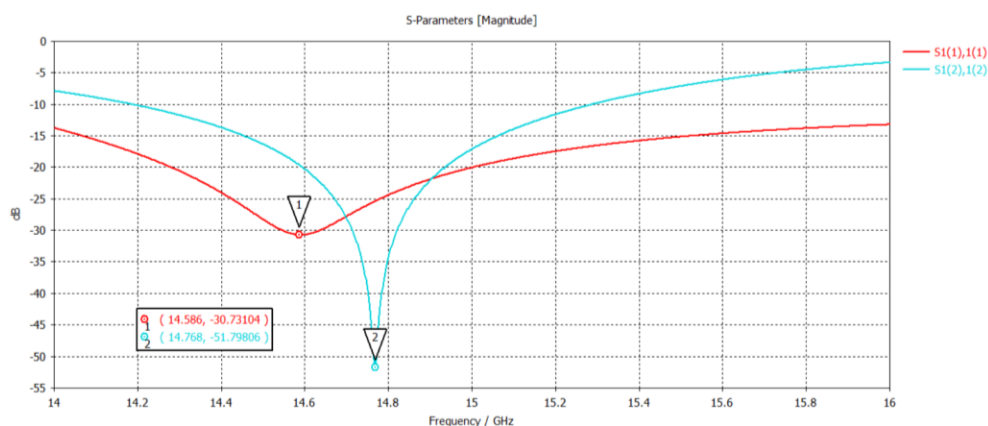
Posición de las modificaciones en la mejora 2



La respuesta en frecuencia de la segunda modificación se presenta en la Figura 49, como se aprecia los valores de los coeficientes de reflexión del modo TE₁₀ y TE₀₁, se desfasan en comparación a la mejora anterior, por ende, la frecuencia de trabajo de cada modo es diferente; lo importante de la presente mejora es lograr niveles por debajo de los -30dB.

Figura 49

Respuesta en frecuencia de la mejora 2



Finalmente, luego de realizar varias simulaciones variando los diferentes parámetros, se llegó a obtener la mejor respuesta en frecuencia para los coeficientes de reflexión en el divisor tipo T con codos achanflados, los valores indican en la Tabla 8, este diseño final tiene por objetivo que tanto el modo TE₁₀ como el TE₀₁, se encuentren en niveles por debajo de -30dB y con la misma frecuencia de trabajo en ambos modos.

Tabla 8

Parámetros de la mejora 3

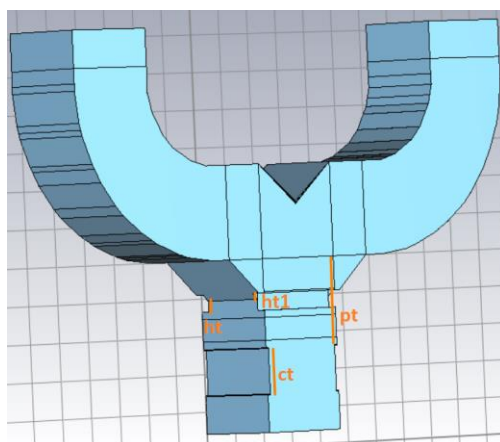
Parámetro	Diseño T Original (mm)	Modificaciones 2 T (mm)
a	12.5 mm	12.5 mm
St	5 mm	5 mm
t	5.8 mm	5.8 mm
at	5.3 mm	5.3 mm
d	12.5 mm	12.5 mm
ht	0.475 mm	1.475 mm
ht1	1 mm	0.8 mm

Parámetro	Diseño T Original (mm)	Modificaciones 2 T (mm)
lt	1.5 mm	1.3 mm
pt	12.225 mm	11.825 mm
bt	0.47 mm	0.42 mm
ct	7 mm	6 mm

La Figura 50 presenta el esquemático con la ubicación de las mejoras realizadas al diseño del divisor tipo T con codos achanflados.

Figura 50

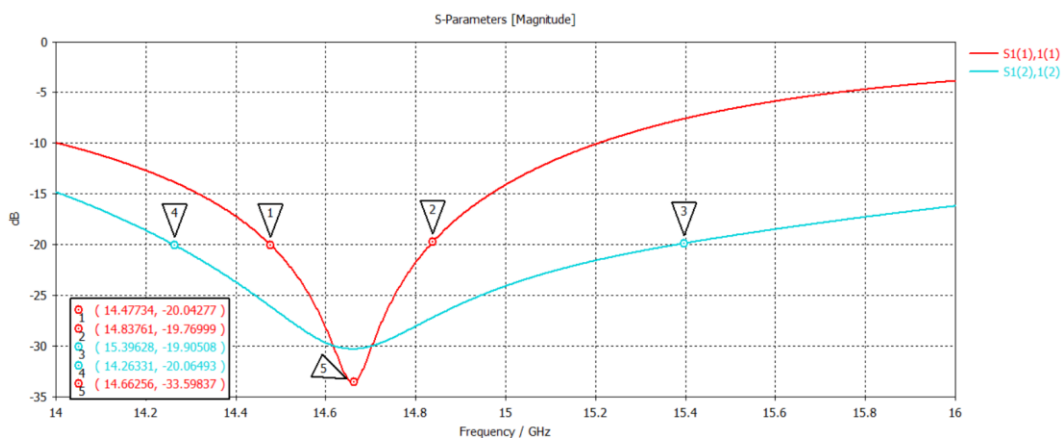
Mejora 3 del divisor tipo T con codos achanflados.



En la Figura 51 se muestra la respuesta en frecuencia de la mejora 3 realizada en el diseño, aquí se observa que los coeficientes de reflexión de los modos TE₁₀ y TE₀₁ se encuentran trabajando en la misma frecuencia de 14.662GHz, así como también se observa que presenta niveles por debajo de -30dB, con lo cual el diseño es adecuado para los requerimientos necesarios para el diseño final del divisor tipo T de cinco puertos.

Figura 51

Respuesta en frecuencia de la mejora 3



Diseño del divisor tipo T modificado con terminación en Y

Continuando con el diseño se procede a realizar cambios en la estructura inicial del divisor de 3 puertos desarrollado en secciones anteriores, esto con la finalidad de obtener un divisor tipo T modificado con terminación en Y, llamado en adelante Divisor tipo Y, el cual se lo empleará para mejorar el acople del divisor tipo T de 3 puertos con codos achanflados y obtener un divisor de tipo T de 5 puertos.

La Tabla 9 contiene los valores del diseño del divisor tipo T modificado con terminación en Y, mismo que es una variante del divisor tipo T normal, por lo tanto, algunos valores de los parámetros se mantienen, mientras que otros desaparecen.

Tabla 9

Parámetros divisor tipo modificado

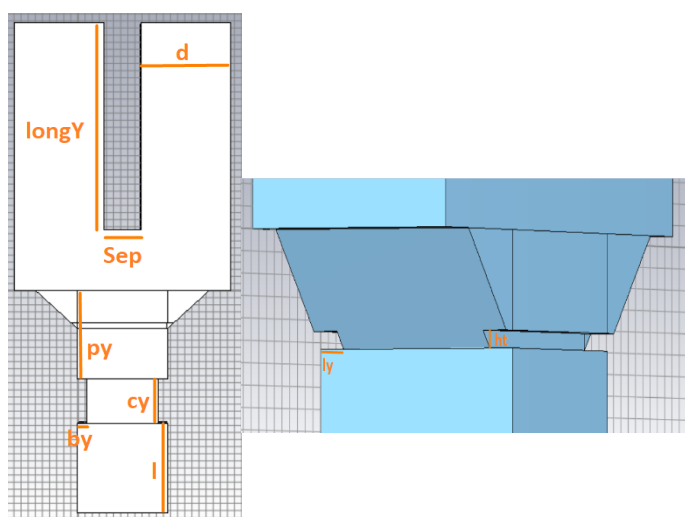
Parámetro	Dimensión (mm)
a	12.5 mm
Sep	5.1 mm
IonY	29 mm

Parámetro	Dimensión (mm)
d	12.5 mm
ay	5.3 mm
ty	5.8 mm
hy	0.8 mm
ly	1.5 mm
py	12.309 mm
by	0.3 mm
cy	6.2 mm
l	12.5 mm

En la Figura 52 se muestra la ubicación de cada parámetro descrito en la Tabla 9, como se puede apreciar el diseño es similar al del divisor tipo T, es importante recalcar que las modificaciones realizadas servirán para obtener una mejor respuesta en frecuencia en el diseño final del divisor tipo T de 5 puertos.

Figura 52

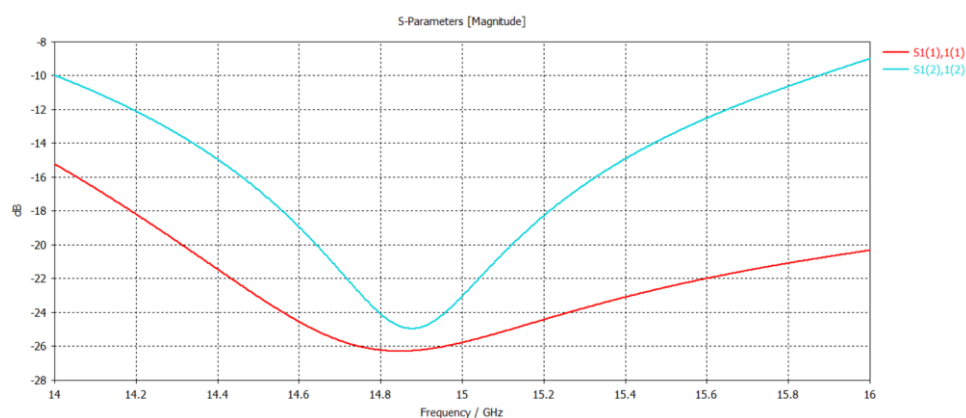
Divisor tipo T modificado con terminación en Y



La respuesta en frecuencia del divisor tipo Y se presenta según la Figura 53, como se aprecia los coeficientes de reflexión $s_{1(1),1(1)}$ (rojo) y $S_{1(2),1(2)}$ (celeste), de los modos TE₁₀ y TE₀₁ respectivamente, se encuentra trabajando a la misma frecuencia, por ende, el diseño es adecuado para los requerimientos del trabajo.

Figura 53

Respuesta en frecuencia divisor tipo Y



Con el fin de obtener mejores resultados se procede a realizar una mejora en el divisor tipo Y, en la Tabla 10 se presenta los detalles de las modificaciones efectuadas, para lograr obtener niveles por debajo de -30dB.

Tabla 10

Variación de parámetros en la mejora del divisor tipo Y

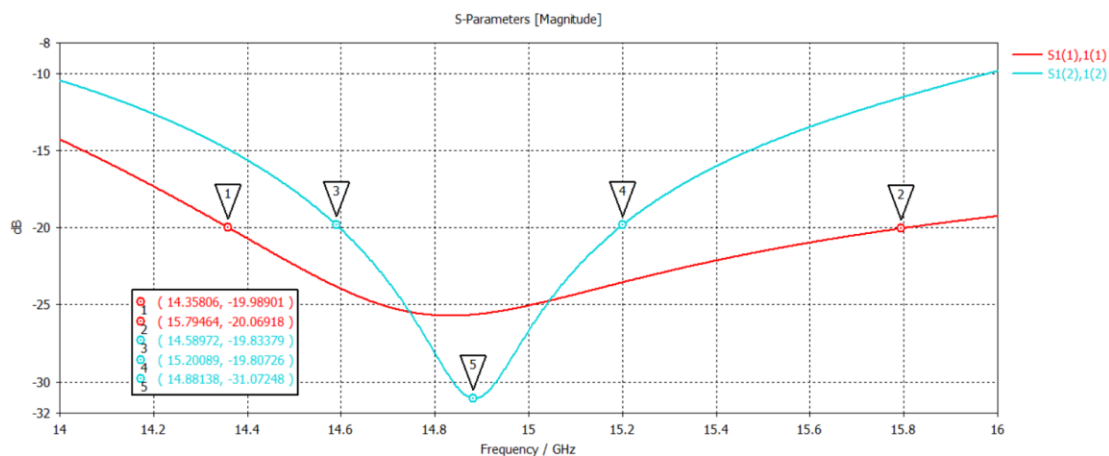
Parámetro	Dimensión Original (mm)	Dimensión mejorada (mm)
a	12.5 mm	12.5 mm
Sep	5.1 mm	5.1 mm
lonY	29 mm	29.1 mm
d	12.5 mm	12.5 mm
ay	5.3 mm	5.3 mm

Parámetro	Dimensión Original (mm)	Dimensión mejorada (mm)
ty	5.8 mm	5.8 mm
hy	0.8 mm	0.5 mm
ly	1.5 mm	1.5 mm
py	12.309 mm	12.309 mm
by	0.3 mm	0.35 mm
cy	6.2 mm	6.4 mm
l	12.5 mm	12.5 mm

En la Figura 54 se muestra la respuesta en frecuencia de las modificaciones realizadas al diseño original, como se observa los coeficientes de reflexión del modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) y TE₀₁ S₁(2),1(2) (celeste), se encuentran operando en la misma frecuencia de trabajo, además los niveles se encuentran por debajo de -30dB, requerimiento indispensable para continuar con el diseño. De esta manera se concluye con el diseño por separado de cada elemento necesario para el diseño final del Divisor de 5 puertos.

Figura 54

Respuesta en frecuencia mejora del divisor tipo Y

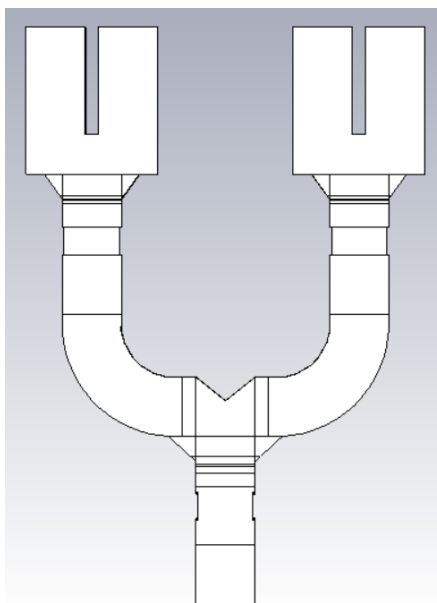


Diseño del divisor tipo T de 5 puertos

La siguiente sección corresponde al diseño del divisor tipo T de 5 puertos, el cual se genera a partir de los diseños explicados anteriormente. El diseño final se efectúa a través de la importación en un nuevo proyecto de los diseños ya realizados, CST Studio nos facilita esta opción para agilizar el diseño. Una vez realizada la importación de los subproyectos necesarios, se procede con la unión de todos estos, partiendo del divisor tipo T con codo achanflado, en cuyas salidas se conecta el divisor tipo T para de esta manera aumentar el número de puertos del dispositivo, en la Figura 55 se muestra el esquema del nuevo divisor tipo T de 5 puertos.

Figura 55

Diseño final del divisor tipo T de 5 puertos



En la siguiente Tabla 11 se presenta las dimensiones de cada elemento necesario para el diseño del divisor tipo T de 5 puertos, cabe resaltar que las tablas de aquí en adelante no llevan los valores de los codos, ya que el codo a 90° diseñado inicialmente no varía.

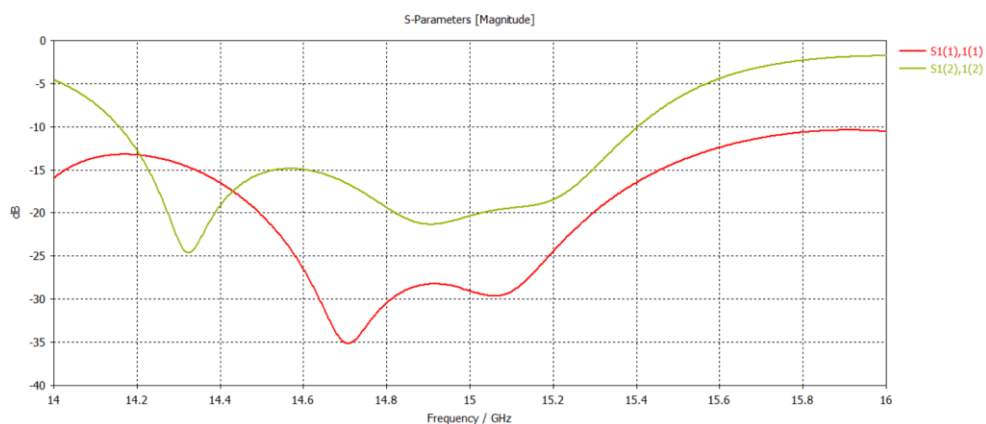
Tabla 11*Dimensiones de los parámetros del divisor de 5 puertos*

Parámetro	Diseño T (mm)	Parámetro	Diseño Y(mm)
a	12.5 mm	a	12.5 mm
St	5 mm	Sep	5.1 mm
t	5.8 mm	lonY	29 mm
at	5.3 mm	d	12.5 mm
d	12.5 mm	ay	5.3 mm
ht	0.475 mm	ty	5.8 mm
ht1	1 mm	hy	0.6 mm
lt	1.5 mm	ly	1.5 mm
pt	12.225 mm	py	12.309 mm
bt	0.47 mm	by	0.3 mm
ct	7 mm	cy	6.2 mm
lb	5.5 mm	l	12.5 mm

La Figura 56 muestra la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión del divisor de 5 puertos, la unión del diseño final requiere optimizaciones debido a que las curvas no están dentro de los niveles requeridos, se observa que el modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) tiene niveles por debajo de -30dB, mientras que el modo TE₀₁ S₁(2),1(2) (verde) el nivel más bajo es de -25dB. La idea del divisor es obtener en el mejor de los casos que TE₁₀ S₁(1)1(1) y TE₀₁ S₁(2),1(2) se superpongan o se aproximen lo máximo posible, así como también llegar a un ancho de banda de 1GHz para ambos modos.

Figura 56

Respuesta en frecuencia divisor de 5 puertos



Optimización 1

Los valores modificados se indican en la Tabla 12, se debe realizar las optimizaciones necesarias hasta obtener en la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión valores de TE₁₀ S1(1),1(1) y TE₀₁ S1(2),1(2) similares con tendencia a niveles fijos a lo largo del ancho de banda.

Tabla 12

Valores de los parámetros modificados en la optimización 1

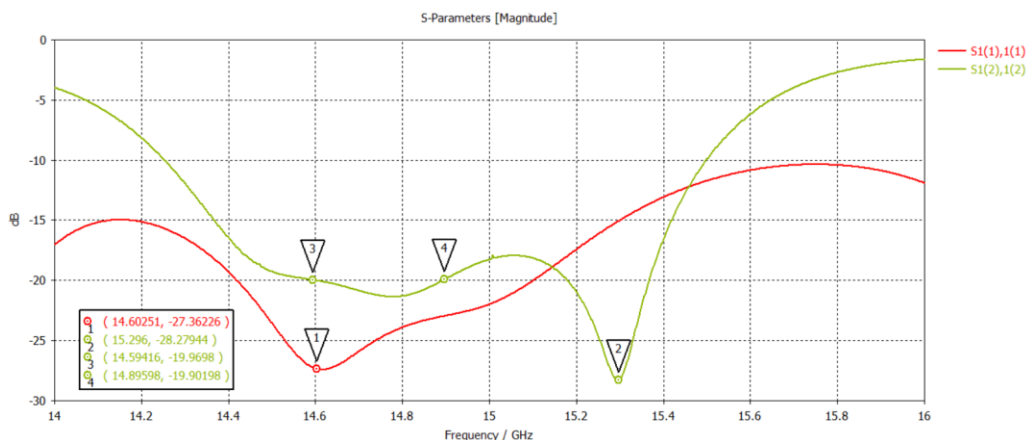
Diseño Original				Optimización 1			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
tro	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
St	5	Sep	5.1	St	5	Sep	2.9
t	5.8	lonY	29	t	5.8	lonY	22.45
at	5.3	d	12.5	at	5.3	d	12.5
d	12.5	ay	5.3	d	12.5	ay	5.3
ht	0.475	ty	5.8	ht	0.575	ty	3.8

Diseño Original				Optimización 1			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
tro	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
ht1	1	hy	0.6	ht1	1	hy	0.8
lt	1.5	ly	1.5	lt	1.5	ly	1.5
pt	12.225	py	12.309	pt	12.225	py	11.25
bt	0.47	by	0.3	bt	0.42	by	0.4
ct	7	cy	6.2	ct	5.2	cy	5.8
lb	5.5	l	12.5	lb	18	l	12.7

En la Figura 57 se visualiza la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión de la optimización 1, donde el modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) tiene el pico más bajo en -27.23226dB a una frecuencia de 14.60251 GHz (punto 1), el modo TE₀₁ S₁(2),1(2) (verde) a 15.296 GHz presenta el pico más bajo en -28.2794dB (punto 2), en comparación al diseño final sin optimizar se logra una tendencia recta entre los puntos 3 y 4 alrededor del -20dB.

Figura 57

Respuesta en frecuencia optimización 1



Optimización 2

A continuación, en la Tabla 13 se presenta los valores modificados de la optimización 2, misma que contiene también los valores iniciales del diseño, con esto se busca obtener una mejor respuesta en frecuencia del divisor de 5 puertos.

Tabla 13

Valores de los parámetros modificados en la optimización 2

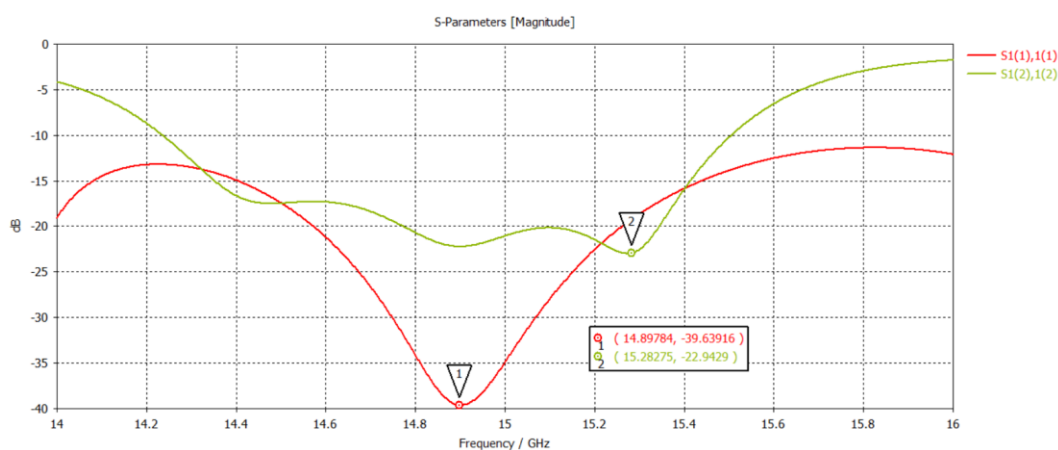
Diseño Original				Optimización 2			
Paráme	Divisor	Paráme	Diseño	Paráme	Divisor	Paráme	Divisor
tro	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
St	5	Sep	5.1	St	5	Sep	2.7
t	5.8	lonY	29	t	5.8	lonY	32.85
at	5.3	d	12.5	at	5.3	d	12.5
d	12.5	ay	5.3	d	12.5	ay	5.3
ht	0.475	ty	5.8	ht	0.575	ty	3.8
ht1	1	hy	0.6	ht1	1	hy	0.6
lt	1.5	ly	1.5	lt	1.5	ly	1.5
pt	12.225	py	12.309	pt	12.225	py	11.25
bt	0.47	by	0.3	bt	0.42	by	0.4
ct	7	cy	6.2	ct	5.2	cy	5.8
lb	5.5	l	12.5	lb	18	l	12.7

La respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión de la optimización 2 realizada se muestra en la Figura 58, aquí se observa que el modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) presenta niveles que llegan hasta los -39.6391dB, mientras que el modo TE₀₁ S₁(2),1(2)

(verde) llega a -22.9429dB, la optimización es adecuada para el modo TE₁₀, más no para el modo TE₀₁, por lo tanto, es necesario seguir optimizando el diseño.

Figura 58

Respuesta en frecuencia optimización 2



Optimización 3

Para mejorar la respuesta en frecuencia del modo TE₀₁, se realizan los cambios mostrados en la Tabla 14. Los cambios realizados corresponden a *Sep*, *lonY*, *ty*, *hy*, *py*, *by*, *cy*, *ly*, *ht*, *bt*, *ct* y *lb* como se muestra a continuación.

Tabla 14

Valores de los parámetros modificados en la optimización 3

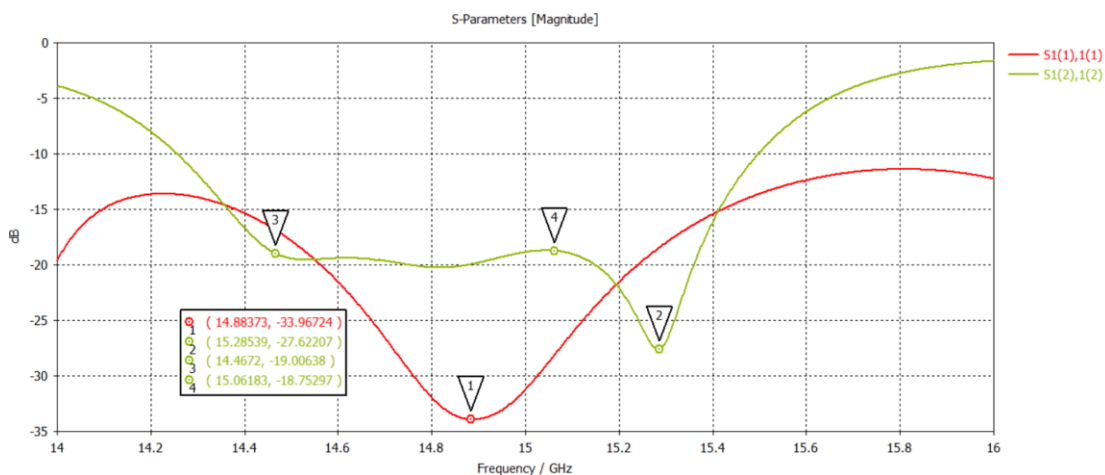
Diseño Original				Optimización 3			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
tro	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
St	5	Sep	5.1	St	5	Sep	2.9
t	5.8	lonY	29	t	5.8	lonY	22.85
at	5.3	d	12.5	at	5.3	d	12.5
d	12.5	ay	5.3	d	12.5	ay	5.3

Diseño Original				Optimización 3			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
ht	0.475	ty	5.8	ht	0.6	ty	3.8
ht1	1	hy	0.6	ht1	1	hy	0.8
lt	1.5	ly	1.5	lt	1.5	ly	1.5
pt	12.225	py	12.309	pt	12.225	py	11.25
bt	0.47	by	0.3	bt	0.42	by	0.4
ct	7	cy	6.2	ct	5.2	cy	5.8
lb	5.5	l	12.5	lb	18	l	12.7

La Figura 59 presenta la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión de la optimización 3, donde el modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) permanece igual al anterior con un nivel de -33.9677dB, mientras que el modo TE₀₁ S₁(2),1(2) varía y toma tendencia recta de 14.4672 GHz (punto 3) a 15.06183 GHz (punto 4) con niveles alrededor de -20dB, teniendo el nivel más bajo en -27.6207dB (punto 2) y una frecuencia de 15.2853 GHz; se aprecia cierta mejoría en la respuesta en frecuencia en comparación a la optimización 1, por ende, se requiere mejorar el pico más bajo (punto 2) y llevarlo a niveles cercanos al punto 4.

Figura 59

Respuesta en frecuencia optimización 3



Optimización 4

En la optimización 4 se busca mejorar la respuesta en frecuencia del pico más bajo para el modo TE₀₁ S1(2),1(2) presentado en la optimización 3, según la Tabla 15. Los parámetros modificados son: *Sep*, *lonY*, *ty*, *hy*, *py*, *by*, *cy*, *l*, *ht*, *bt*, *ct* y *lb*.

Tabla 15

Valores de los parámetros modificados en la optimización 4

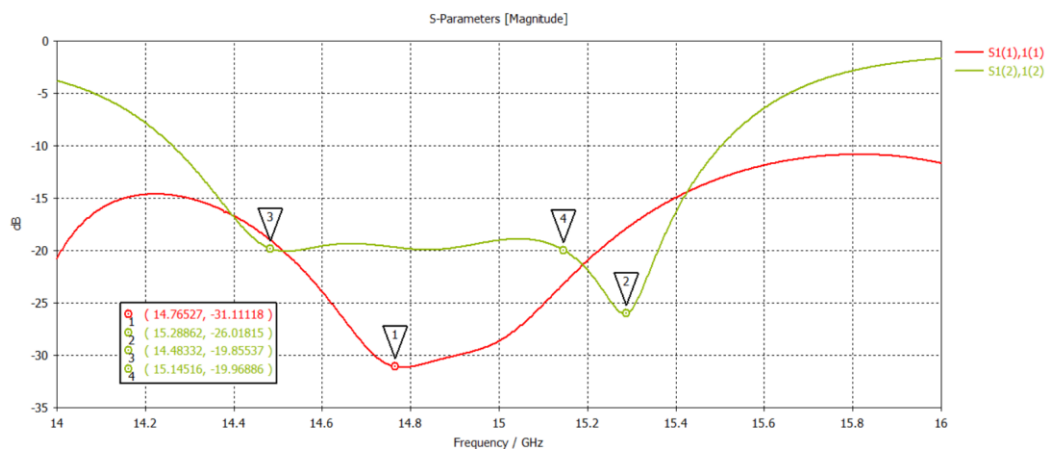
Diseño Original				Optimización 4			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
tro	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
St	5	Sep	5.1	St	5	Sep	2.7
t	5.8	lonY	29	t	5.8	lonY	32.85
at	5.3	d	12.5	at	5.3	d	12.5
d	12.5	ay	5.3	d	12.5	ay	5.3
ht	0.475	ty	5.8	ht	0.575	ty	3.8

Diseño Original				Optimización 4			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
tro	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
ht1	1	hy	0.6	ht1	1	hy	0.8
lt	1.5	ly	1.5	lt	1.5	ly	1.5
pt	12.225	py	12.309	pt	12.225	py	11.25
bt	0.47	by	0.3	bt	0.42	by	0.4
ct	7	cy	6.2	ct	5.2	cy	6.4
lb	5.5	l	12.5	lb	18	l	12.1

La respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión en la optimización 4, para el modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) brinda un nivel de -31.1118dB a una frecuencia de 14.76527 GHz (punto 1), el modo TE₀₁ S₁(2),1(2) (verde) mejorar en la tendencia a recta alrededor de -20dB entre las frecuencias de 14.4833 GHz (punto 3) a 15.1451 GHz (punto 4), mientras que el pico más bajo sube a un nivel de -26.0181dB a una frecuencia de 15.286GHz (punto 2), como se muestra en la Figura 60.

Figura 60

Respuesta en frecuencia optimización 4



Optimización 5

La Tabla 16 contiene los valores de la optimización 5, la cual consiste en mejorar los puntos 3 y 4 de la optimización anterior y acercarlos a valores cercanos a los niveles del punto 2, es decir niveles alrededor de -25dB para aprovechar el mayor ancho de banda posible, es importante mencionar que a mayor ancho de banda los niveles de los coeficientes de reflexión disminuyen, por ende, a partir de ahora los valores a los que se trata de llegar son niveles de -25dB en ambos modos TE₁₀ y TE₀₁ y para en ancho de banda de 1GHz niveles de -15dB. Para aproximarnos a los nuevos requerimientos se optimiza el divisor tipo Y, haciendo recortes en las esquinas que van a los puertos de salidas con los parámetros indicados en la Tabla 17.

Tabla 16

Valores de los parámetros modificados en la optimización 5

Parámetro	Diseño Original			Optimización 5			
	Divisor T (mm)	Parámetro	Diseño Y(mm)	Parámetro	Divisor T (mm)	Parámetro	Divisor Y (mm)
St	5	Sep	5.1	St	5	Sep	2.7
t	5.8	lonY	29	t	5.8	lonY	32.85
at	5.3	d	12.5	at	5.3	d	12.5
d	12.5	ay	5.3	d	12.5	ay	5.3
ht	0.475	ty	5.8	ht	0.575	ty	3.8
ht1	1	hy	0.6	ht1	1	hy	0.8
lt	1.5	ly	1.5	lt	1.5	ly	1.5
pt	12.225	py	12.309	pt	12.225	py	11.25
bt	0.47	by	0.3	bt	0.42	by	0.4
ct	7	cy	6.2	ct	5.2	cy	6.4

Diseño Original				Optimización 5			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
tro	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
lb	5.5	l	12.5	lb	18	l	12.1

Tabla 17.

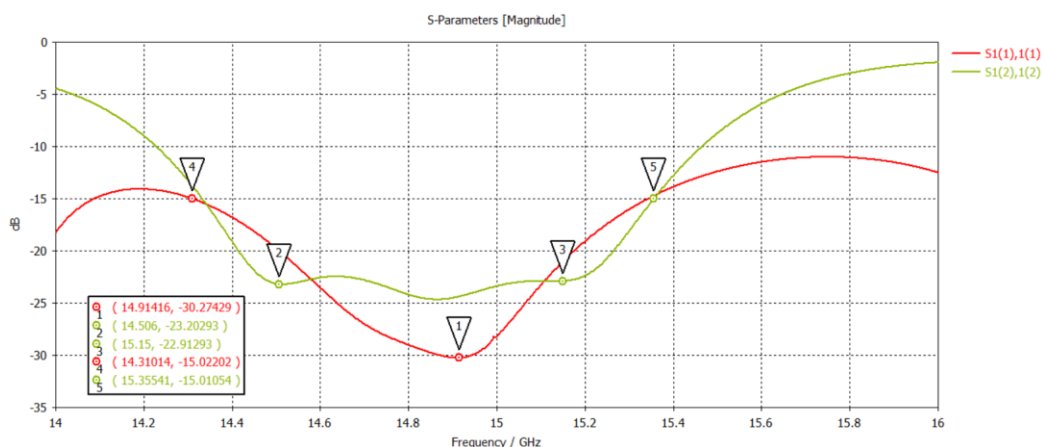
Valores de los recortes en divisor tipo Y

Recortes Divisor Y	
Ángulo	Valor (mm)
60	1
30	0.5
15	0.5

La respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión mostrada en la Figura 61, brindan información del modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo), mismo que se mantiene en niveles -30.2742dB a una frecuencia de 14.9141GHz (punto 1), en cambio en el modo TE₀₁ S₁(2),1(2) (verde), se observa que los niveles bajan alrededor de -25dB en el rango de frecuencia de 14.506 GHz (punto 2) a 15.15 GHz (punto 3), es decir para el modo TE₀₁ se presenta un ancho de banda de 0.644 GHz en -25dB, mientras que para el nuevo nivel de referencia -15dB en todos los modos se tiene un ancho de banda de 1.0453 GHz como indican los puntos 4 y 5 respectivamente.

Figura 61

Respuesta en frecuencia optimización 5



Optimización 6

Ahora con los valores mostrados en la Tabla 18 se trata de optimizar la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión TE₁₀ S₁(1),1(1) y TE₀₁ S₁(2),1(2) haciendo que los niveles de la respuesta S₁(2),1(2) y S₁(2),1(2) lleguen a -25dB y permanezcan constantes, además de obtener un ancho de banda de 1GHz en -15dB. La Tabla 19 presenta las modificaciones realizadas en los valores de los recortes.

Tabla 18

Valores de los parámetros modificados en la optimización 6

Diseño Original				Optimización 6			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
	T (mm)	tro	Y(mm)	tro	T (mm)	tro	Y (mm)
St	5	Sep	5.1	St	5	Sep	2.7
t	5.8	lonY	29	t	5.8	lonY	27.85
at	5.3	d	12.5	at	5.3	d	12.5
d	12.5	ay	5.3	d	12.5	ay	5.3

Diseño Original				Optimización 6			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
	T (mm)	tro	Y(mm)		T (mm)	tro	Y (mm)
ht	0.475	ty	5.8	ht	0.425	ty	3.8
ht1	1	hy	0.6	ht1	1	hy	0.6
lt	1.5	ly	1.5	lt	1.45	ly	1.5
pt	12.225	py	12.309	pt	12.225	py	11.35
bt	0.47	by	0.3	bt	0.42	by	0.4
ct	7	cy	6.2	ct	6.4	cy	5.7
lb	5.5	l	12.5	lb	16.5	l	12.7

Tabla 19

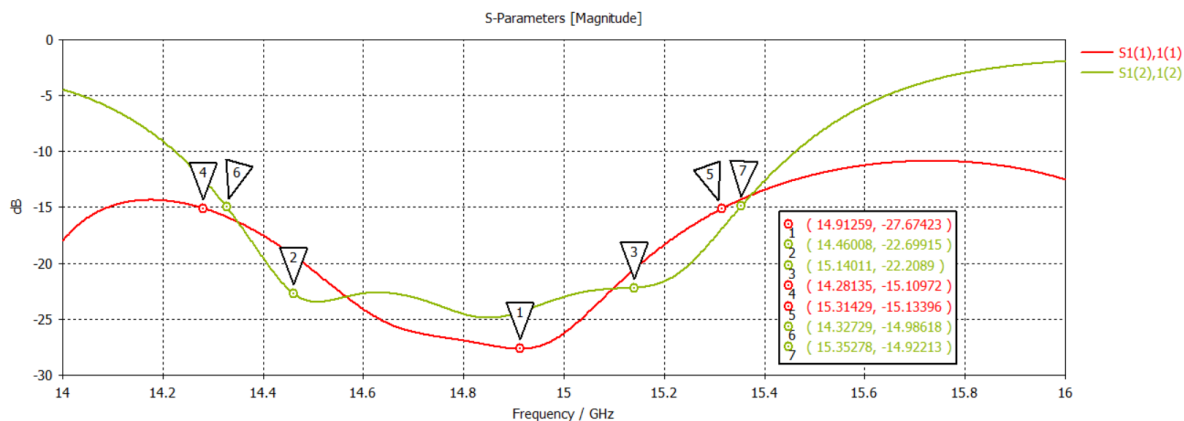
Valores de los recortes en divisor tipo Y

Recortes Divisor Y	
Ángulo	Valor (mm)
60	1
20	0.75
15	0.5

La Figura 62, muestra la respuesta en frecuencia de la optimización 6, donde la respuesta de los coeficientes de reflexión para el modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) tiende a una respuesta lineal alrededor de -27.642dB y frecuencia de 14.91259 GHz (punto 1); en el modo TE₀₁ S₁(2),1(2) (verde) se aproxima alrededor de -25dB con un trazo de tendencia recta entre 14.46008 GHz y 15.14011 GHz (punto 2 y 3), mientras que el ancho de banda para ambos modos es de aproximadamente 1.07GHz según los puntos 4 y 7 respectivamente.

Figura 62

Respuesta en frecuencia optimización 6



Optimización 7

Finalmente, con los valores de los parámetros mostrados en la Tabla 20 se consigue que la respuesta en frecuencia en los modos TE₁₀ y TE₀₁ del dispositivo llegue a valores de -25dB y se mantenga constante en un rango de frecuencia, así como también se logra un ancho mayor a 1GHz en -15dB; mientras que en la Tabla 21 se muestra los valores que toman los recortes realizados para optimizar el diseño.

Tabla 20

Valores de los parámetros modificados en la optimización 7

Diseño Original				Optimización 7			
Parámetro	Divisor	Parámetro	Diseño	Parámetro	Divisor	Parámetro	Divisor
	T (mm)		Y(mm)		T (mm)		Y (mm)
St	5	Sep	5.1	St	5	Sep	2.7
t	5.8	lonY	29	t	5.8	lonY	27.85
at	5.3	d	12.5	at	5.3	d	12.5
d	12.5	ay	5.3	d	12.5	ay	5.3

Diseño Original				Optimización 7			
Parámetro	Divisor T (mm)	Parámetro	Diseño Y(mm)	Parámetro	Divisor T (mm)	Parámetro	Divisor Y (mm)
ht	0.475	ty	5.8	ht	0.425	ty	3.8
ht1	1	hy	0.6	ht1	1	hy	0.6
lt	1.5	ly	1.5	lt	1.45	ly	1.5
pt	12.225	py	12.309	pt	12.225	py	11.35
bt	0.47	by	0.3	bt	0.42	by	0.4
ct	7	cy	6.2	ct	6.8	cy	5.7
lb	5.5	l	12.5	lb	16.5	l	12.7

Tabla 21

Valores de los recortes en divisor tipo Y

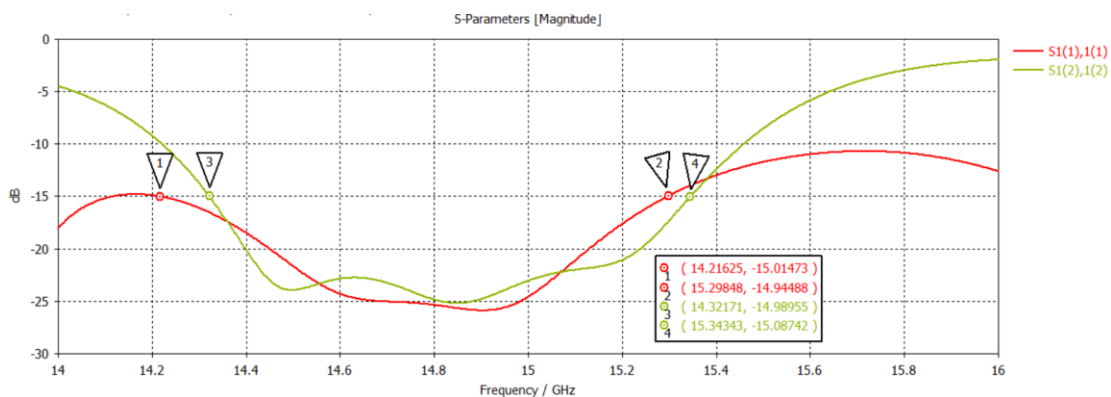
Recortes Divisor Y	
Ángulo	Valor (mm)
60	1
15	1
11	0.5

La respuesta en frecuencia mostrada en la Figura 63 corresponde a los coeficientes reflexión de la optimización 7, se observa que el modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) presenta una respuesta cuyos niveles se encuentran aproximadamente en -25dB; el modo TE₀₁ S₁(2),1(2) (verde) presenta una respuesta similar al modo TE₀₁ llegando a niveles de -25dB, mientras que el ancho de banda en -15dB para el modo TE₁₀ y TE₀₁ es de 1.082 GHz y 1.021 GHz

respectivamente, con la obtención de estos valores se demuestra que el diseño de divisor tipo T de 5 puertos en guía de onda cuadrada se encuentra acoplado.

Figura 63

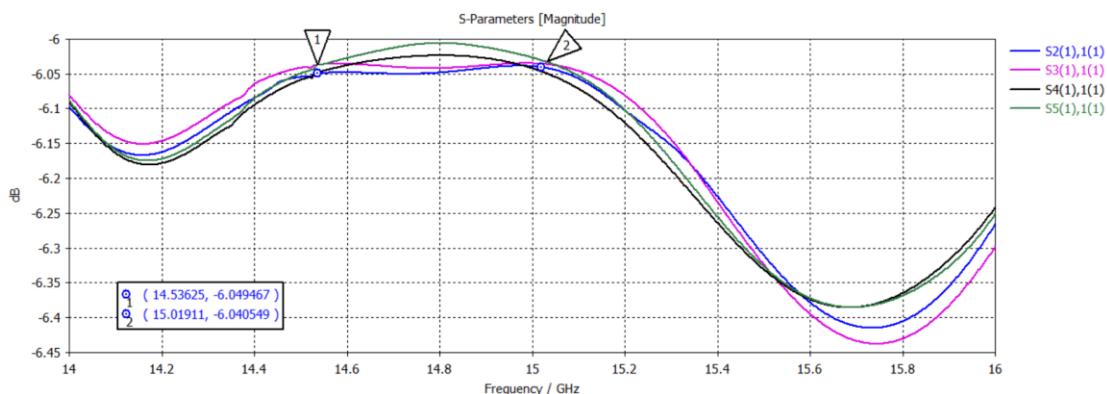
Respuesta en frecuencia optimización 7



Una vez obtenido el diseño final, se procede a realizar el análisis de los coeficientes de transmisión tanto para el modo TE₁₀ como TE₀₁, la Figura 64 presenta los coeficientes de transmisión de modo TE₁₀ para cada puerto de salida S₂(1),1(1), S₃(1),1(1), S₄(1),1(1), S₅(1),1(1), presentando un nivel alrededor de -6.049dB en el rango de frecuencia de 14.5362 GHz a 15.019 GHz.

Figura 64

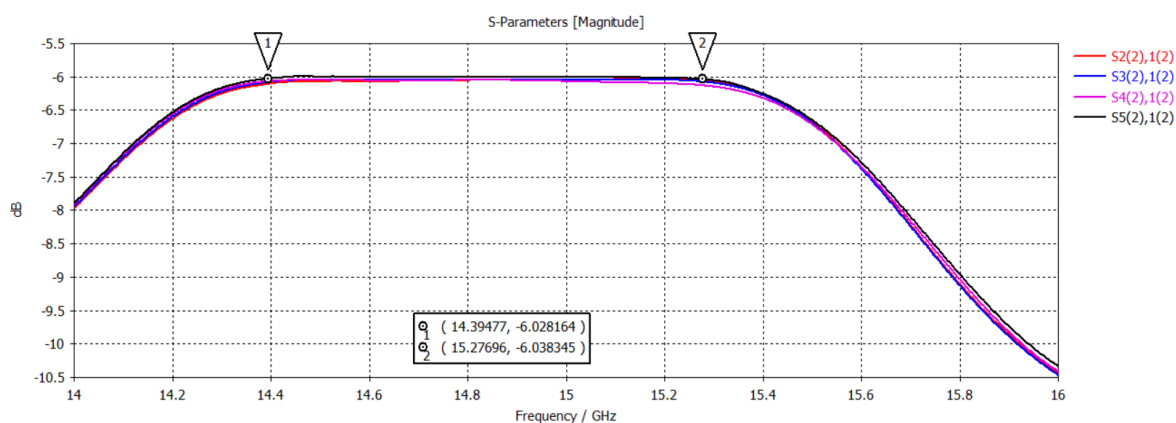
Respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión del divisor de 5 puertos optimizado en modo TE₁₀



Por otra parte, la Figura 65, muestra la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión del modo TE01 representados por $S_2(2),1(2)$, $S_3(2),1(2)$, $S_4(2),1(2)$, $S_5(2),1(2)$ mismos que llegan a un nivel de -6.0281dB , en un rango de frecuencia de 14.39477 GHz a 15.27696 GHz .

Figura 65

Respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión del divisor de 5 puertos optimizado en modo TE01

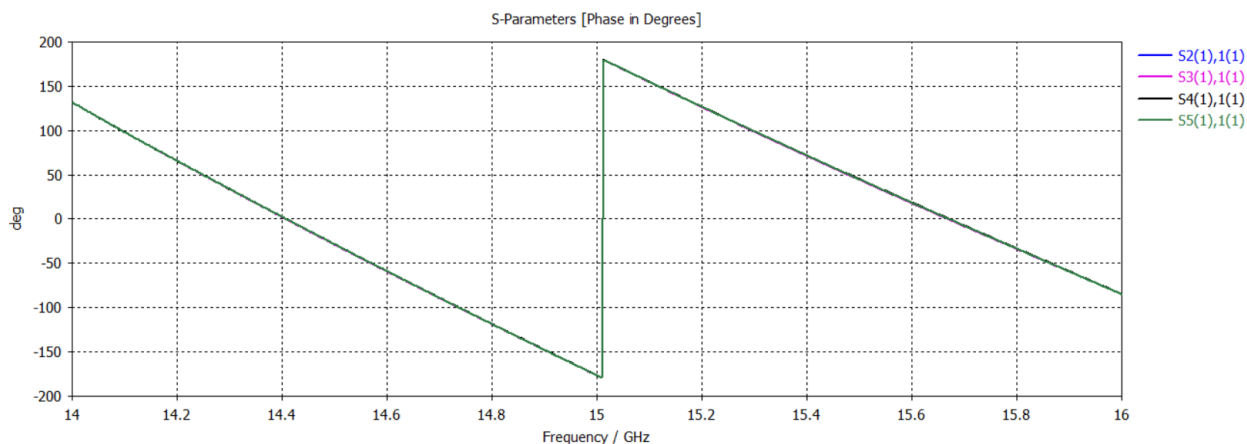


Estos valores alcanzados en simulación en los rangos indicados, son importantes puesto que validan que las optimizaciones realizadas en diseño del divisor tipo T de 5 puertos son correctas al mantener un nivel cercano a -6dB que es lo óptimo.

Ahora se realizar el análisis de fase que se muestra en la Figura 66 se observa en la gráfica que todas las fases $S_2(1),1(1)$, $S_3(1),1(1)$, $S_4(1),1(1)$ y $S_5(1),1(1)$ del modo TE10 se encuentra sobrepuestas, lo que indica que los coeficientes de transmisión en este modo se encuentran en fase.

Figura 66

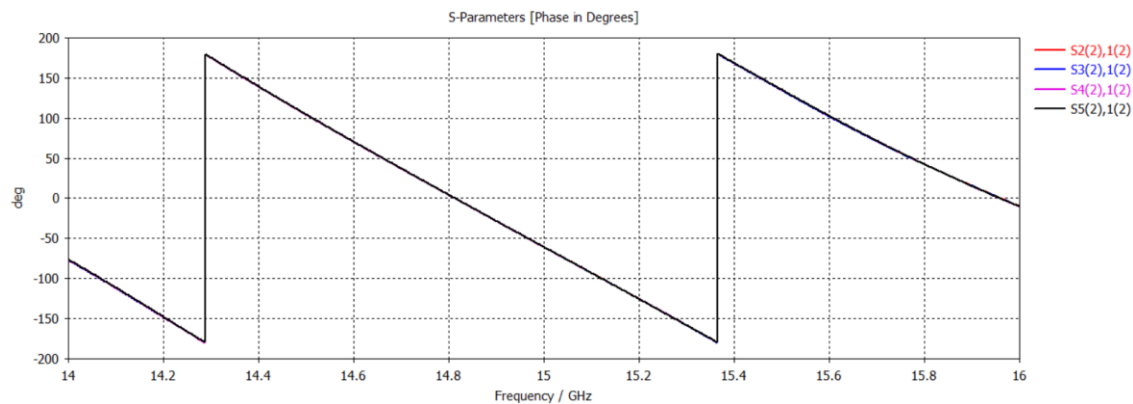
Fase de los parámetros de transmisión del modo TE₁₀



En la Figura 67 se presenta la respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión del modo TE₀₁, donde las fases S₂(2),1(2), S₃(2),1(2), S₄(2),1(2) y S₅(2),1(2) se encuentra sobrepuestas una sobre otra, lo que indica que sus respectivos coeficientes de transmisión se encuentran en fase y que el diseño del divisor tipo T de 5 puertos se encuentra totalmente acoplado.

Figura 67

Fase de los parámetros de transmisión del modo TE₀₁



Escalamiento a una frecuencia de 40GHz

Para realizar el escalamiento del dispositivo de 5 puertos, se define la frecuencia de corte del modo TE₁₀, frecuencia que al estar trabajando sobre una guía de onda cuadrada es igual al modo TE₀₁, por ende, se selecciona $f_{c_{10}} = f_{c_{01}} = 33GHz$, misma que se encuentra entre las recomendaciones de UIT (Unión Internacional de la Telecomunicaciones) para trabajar en ondas milimétricas, además esta frecuencia se encuentra dentro de rango definido para la banda Ka que va desde 26.5GHz – 40GHz. (ITU, 2015)

El proceso de escalamiento se lo realiza con la finalidad de encontrar un valor k, que resulta de la división del nuevo valor de la longitud de onda a_{33} para 40GHz dividido para la longitud a del diseño original $a_{15,2}$, como se indica a continuación:

$$f_{c_{TE10}} = 33 \text{ Ghz}$$

$$a_{33} = \frac{3 * 10^8}{2(33 * 10^9)}$$

$$a_{33} = 4.5454 \text{ mm}$$

$$k = \frac{a_{33}}{a_{15,2}}$$

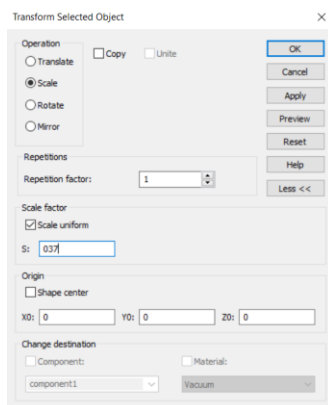
$$k = 3.675$$

$$k \approx 3.7$$

Una vez encontrado el valor a se procede a realizar el escaldado del dispositivo, lo cual consiste en seleccionar el diseño e ingresar la escala a la que lo queremos llevar, es decir a nuestro valor k, según la Figura 68.

Figura 68

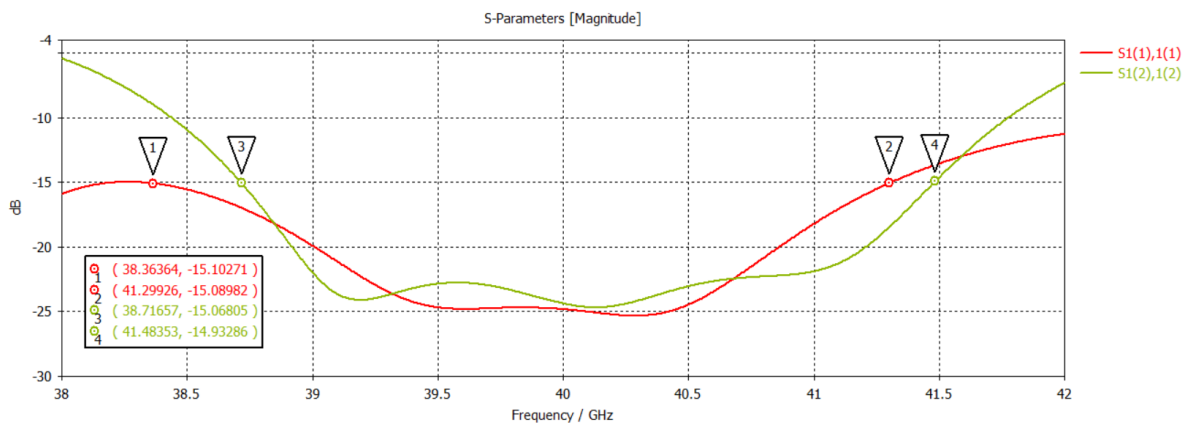
Escalado del diseño final



La respuesta en frecuencia del escalado se muestra en la Figura 69, que corresponde a los coeficientes de reflexión del modo TE₁₀ S₁(1),1(1) (rojo) y TE₀₁ S₁(2),1(2) (verde), la gráfica presenta un ancho de banda de 2.926 GHz (punto 1 a punto 2) para el modo TE₁₀ y 2.765 GHz (punto 3 a punto 4) de ancho de banda para el modo TE₀₁, los niveles se encuentran alrededor de -25dB, lo que indica que el escalado es adecuado.

Figura 69

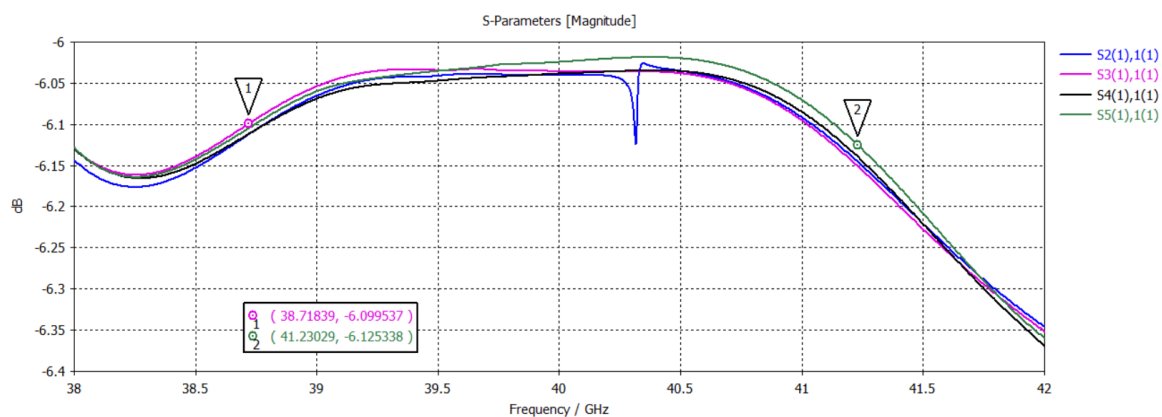
Respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión del dispositivo escalado a 40GHz



La Figura 70 presenta la respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión para el modo TE₁₀ S₂(1),1(1); S₃(1),1(1); S₄(1),1(1) y S₅(1),1(1), mismo que se encuentran en niveles cercanos a -6dB, con lo cual se valida el adecuado funcionamiento del dispositivo.

Figura 70

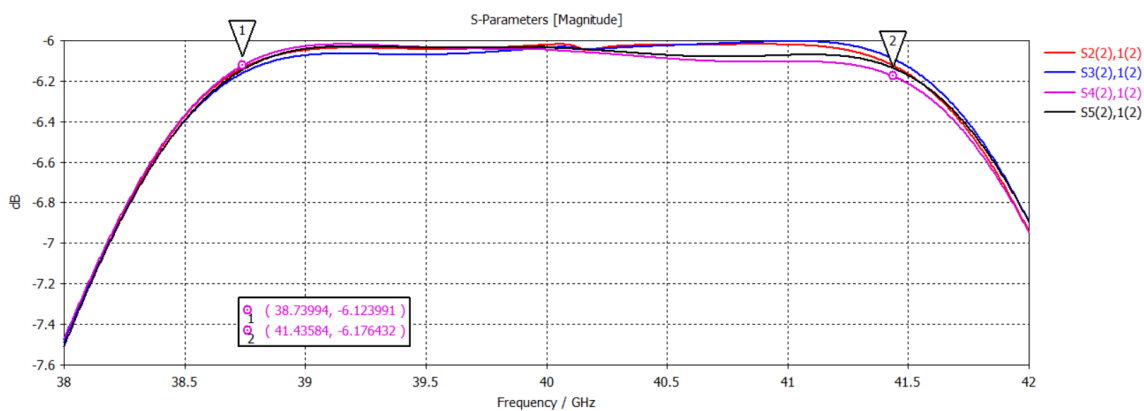
Respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión escalados a 40GHz modo TE₁₀



Ahora en la Figura 71 se observa la respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión del modo TE₀₁ S₂(2),1(2); S₃(2),1(2); S₄(2),1(2) y S₅(2),1(2), de igual forma al modo TE₁₀ los niveles de los coeficientes se encuentran alrededor de -6dB en el rango del ancho de banda de aproximadamente 2.26 GHz para el dispositivo escalado a 40 GHz.

Figura 71

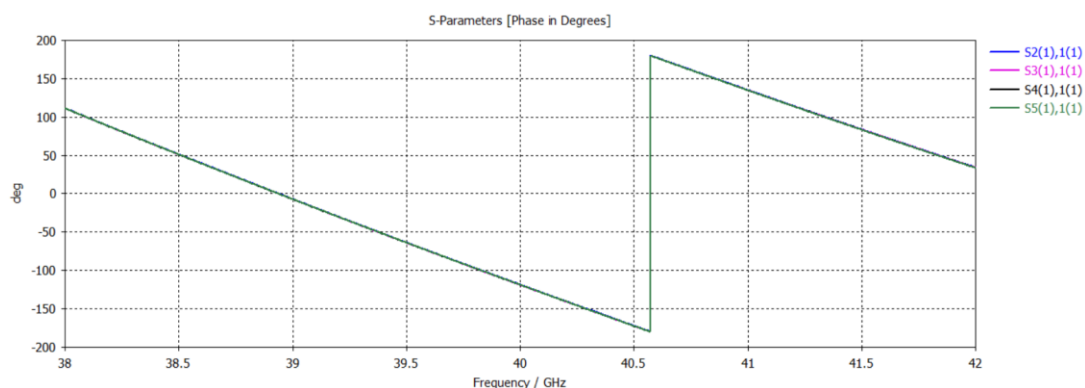
Respuesta en frecuencia de los coeficientes de transmisión escalados a 40GHz modo TE₀₁



Continuando con el análisis del escalamiento, la Figura 72 presenta el análisis de fase los coeficientes de transmisión del modo TE₁₀ S₂(1),1(1); S₃(1),1(1); S₄(1),1(1) y S₅(1),1(1), los cuales se encuentran sobrepuestos uno sobre otro, por ende, se observa una sola señal en forma diente de sierra.

Figura 72

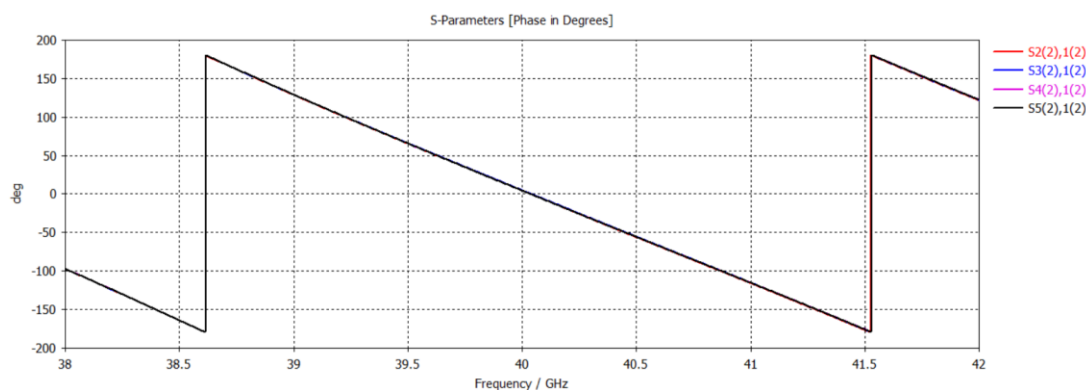
Análisis de fase de los coeficientes de transmisión en modo TE₁₀



Ahora, la Figura 73 presenta la misma respuesta en frecuencia para el modo TE₀₁ S₂(2),1(2); S₃(1),1(1); S₄(1),1(1) y S₅(1),1(1), de igual manera al modo TE₁₀, la respuesta de los coeficientes se encuentran solapados uno sobre otro, lo cual indica que el diseño se encuentra totalmente acoplado.

Figura 73

Análisis de fase de los coeficientes de transmisión en modo TE₀₁



Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En la primera parte del trabajo, se partió del diseño de un divisor de 3 puertos con guía de onda cuadrada tipo T y los puertos alargados, mismo diseño que se tuvo que optimizar para obtener una respuesta en frecuencia para los coeficientes de transmisión -3dB y reflexión niveles por debajo de -30dB , con esta respuesta se agregó un codo de 90° achaflado a la salida de los puertos manteniendo la tendencia de la respuesta en frecuencia en los mismos niveles, finalmente a cada salida de los codos se añadió un divisor tipo Y de 3 puertos con el objetivo de mejorar el acoplamiento del dispositivo, obteniendo en el diseño final del divisor de 5 puertos tipo T para el modo TE₁₀ y TE₀₁ un ancho de banda promedio de 1.051 GHz para los coeficientes de reflexión que representa una banda útil del 6.917 % de la banda Ku y un nivel alrededor de -6dB en los coeficientes de transmisión, lo cual indica que la potencia de la señal de entrada se divide homogéneamente en 4 partes iguales.

Del análisis de fase se concluye que los coeficientes de transmisión del modo TE₁₀ están totalmente en fase, de igual manera los coeficientes de transmisión de modo TE₀₁, lo que indica que la onda propagada a los puertos de salida (puerto 2,3,4 y 5) no presenta ningún cambio dentro de la banda de trabajo.

Al realizar el escalado para una frecuencia de 40 GHz, se obtuvo un incremento del ancho de banda que pasó de 1.082 GHz a 2.926 GHz para el modo TE₁₀ y de 1.021GHz a 2.765 GHz para el modo TE₀₁, en promedio un ancho de banda de 2.845 GHz representando una banda útil de 7.175% de la banda V, pese al incremento del ancho de banda el comportamiento de la respuesta en frecuencia es similar al diseño final del divisor tipo T de 5 puertos, como se evidencia en la Figura 63 y Figura 69.

Recomendaciones

Para empezar con el diseño del divisor tipo T de 5 puertos, se recomienda realizar el diseño por separado, es decir en primera instancia el divisor tipo T de 3 puertos, luego el codo de 90° achaflado y finalmente el divisor tipo Y de 3 puertos, una vez con estos diseños se procede a consolidarlos en un solo cuerpo con la finalidad de realizar la menor cantidad de cambios para obtener la mejor respuesta en frecuencia.

Al momento de la simulación, se recomienda elegir la opción de seleccionar los puertos que se requiere obtener la respuesta en frecuencia, aquí se escoge el puerto de entrada y uno de los puertos de salida, esto con el objetivo de disminuir el tiempo de simulación; una vez obtenido el diseño final realizar la simulación seleccionando todos los puertos de salida.

Trabajos Futuros

Como trabajo futuro, se plantea la construcción del presente diseño con el objetivo de medir y corroborar los resultados teóricos con los reales del comportamiento en frecuencia del dispositivo, tanto para la banda Ka como para la banda escalada V.

Como una propuesta a futuro de investigación, se propone la optimización del presente dispositivo hasta obtener un ancho de banda de 2GHz en los modos TE₁₀ y TE₀₁ de la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión.

Referencias

- Cano, J. L., & Mediavilla, A. (2017). Wideband Dual-Mode Waveguide Bends for Linear and Circular Polarizations. *IEEE*, 65(3), 831-837.
- Collin, R. (2001). *Foundations for Microwave Engineering*. Cleveland: Wiley-Interscience.
- Cronin, N. (1995). *Microwave and optical Waveguides*. Bristol: Inst of Physics Pub Inc.
- Garcia, J. (14 de 09 de 2007). *Universidad Autónoma de Barcelona*. Obtenido de https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2007/hdl_2072_9016/PFCGarciaRincon.pdf
- ITU. (08 de 2015). *Unión Internacional de las Telecomunicaciones*. Obtenido de https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-I!!PDF-S.pdf
- Liao, S. (1980). *Microwave devices and circuits*. New Jersey: PRENTICE HALL.
- MI-WAVE. (2007). *Millimeter Wave Products Inc*. Obtenido de <https://www.miww.com/millimeter-wave-resources/wiki/waveguide-dimensions/>
- Muñoz, C. (2017). *Repositorio Universidad Carlos III de Madrid*. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28692/TFG_Claudia_Munoz_Pou_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Navarro, J., & Toma, I. (06 de 04 de 2017). *Guías de onda*. Obtenido de <https://guiadeondas.wordpress.com/2017/04/06/guia-de-ondas/>
- Pantoja, K. (2019). *Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*,. Obtenido de <https://detri.epn.edu.ec/wp-content/uploads/2020/01/PRACTICA-N9-divisor-de-potencia.pdf>
- Pascual, P. (09 de 2012). *Repositorio Universidad Autónoma de Madrid*. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/10358/52576_20120920PabloPascualGarcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pini, A. (28 de 08 de 2019). *Digi-Key Electronics*. Obtenido de <https://www.digikey.com/es/articles/the-fundamentals-of-rf-power-dividers-and-combiners>
- Poole, I. (2016). *electronics notes*. Obtenido de <https://electronics-club.com/tee-junction-e-plane-tee-h-plane-tee-magic-tee/>
- Pozar, D. (2012). *Microwave Engineering*. Hoboken: NJ:WILEY.
- Salazar, G. (2017). *Repositorio Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Obtenido de <https://detri.epn.edu.ec/wp-content/uploads/2020/01/PRACTICA-N9-divisor-de-potencia.pdf>
- Sorentino, R., & Bianchi, G. (2010). *Microwave and RF Engineering*. WILEY.
- Systems, D. (16 de 08 de 2019). *SIMULA*. Obtenido de https://blogs.3ds.com/simulia/designing-ridged-waveguide-filter-cst-studio-suite/#_ga=2.92258073.2078422374.1658160948-844df220-334a-11ec-95b0-770a7d9edd4e

Tao, Y. (06 de 2015). *EEEGUIDE*. Obtenido de <https://www.eeeguide.com/waveguide-junctions/>

Tomasi. (2003). *Sistemas de*. México: PEARSON EDUCACIÓN.

Torre, J. (01 de 2016). *Repositorio Universidad Autónoma de Madrid*. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/669987/Torre_Albarsanz_JoseAntonio_tfg.pdf?sequence=1

Xinyu, X., & Bosisio, G. (11 de 07 de 2005). *IEEE Xplore* . Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1463344>

Apéndice