



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



**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**

**TEMA:**

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

**Autor:**

Yozef Andre Pazmiño Rentería

**Director del Proyecto:** Ing. Raúl Vinicio Haro Báez

**Docente Evaluador:** Ing.

**Director de Carrera:** Ing. Carlos Daniel Altamirano Carrillo, PhD

**Secretaria Académica:** Abg. María Fernanda Jaramillo.

Agosto, 2022



# AGENDA

---

1. Objetivos

---

2. Marco Teórico

---

3. Diseño

---

4. Optimizaciones y Resultados

---

5. Conclusiones y recomendaciones

2

# 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.

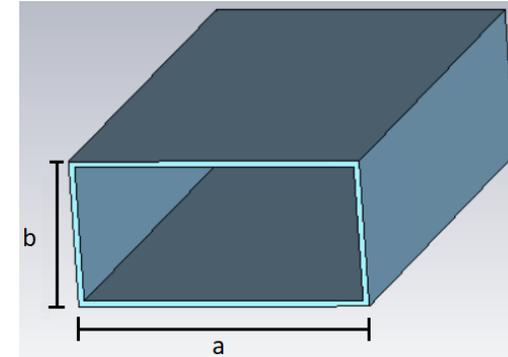
- Guía de onda rectangular

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

$$f_{c_{10}} = \frac{c}{2a}$$

$TE_{mn}$

$TE_{10}$

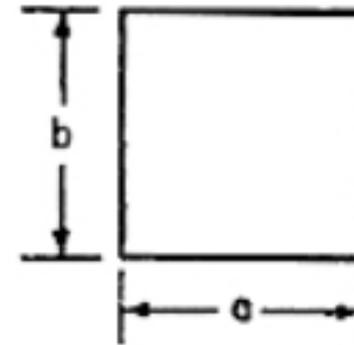


- Guía de onda cuadrada

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

$$TE_{10} = TE_{01}$$

$$f_{c_{10}} = \frac{c}{2a}$$



- Modos de Propagación

## *Transversal Electromagnético (TEM)*

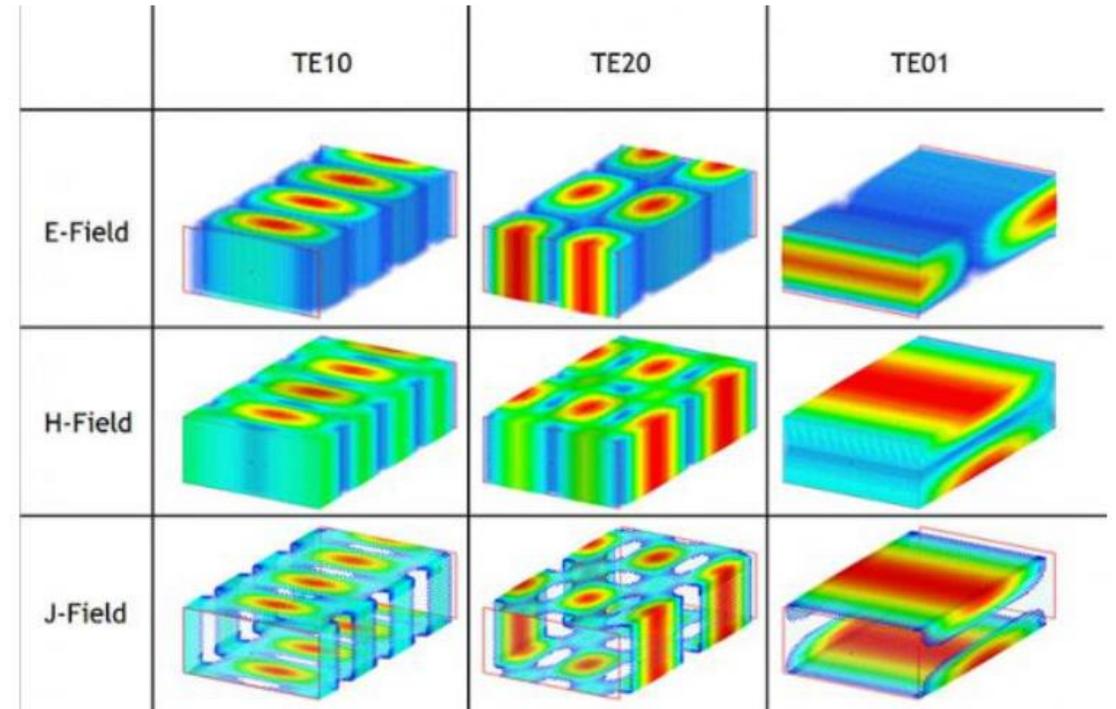
- No existencia de componentes perpendiculares en dirección del Campo E y M.

## *Transversal Eléctrico (TE)*

- Onda H, Campo E perpendicular a la dirección de propagación.

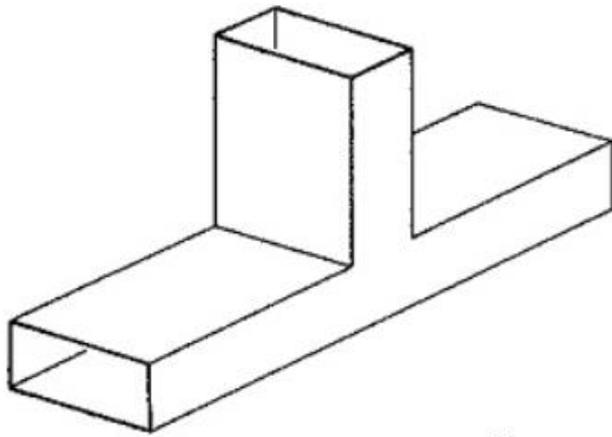
## *Transversal Magnético (TM)*

- Onda E, Campo M perpendicular a la dirección de propagación.

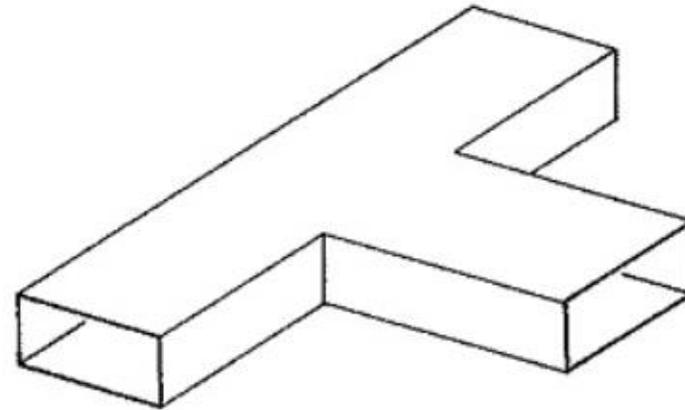


## Uniones de guía de onda tipo T

- Uniones T tipo E



- Uniones T tipo H



# DISEÑO

- Consideraciones de diseño

| Parámetros            | Valor          |
|-----------------------|----------------|
| Frecuencia de trabajo | 15,2 GHz       |
| a                     | 12,5 mm        |
| c                     | $3 * 10^8$ m/s |

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

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

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

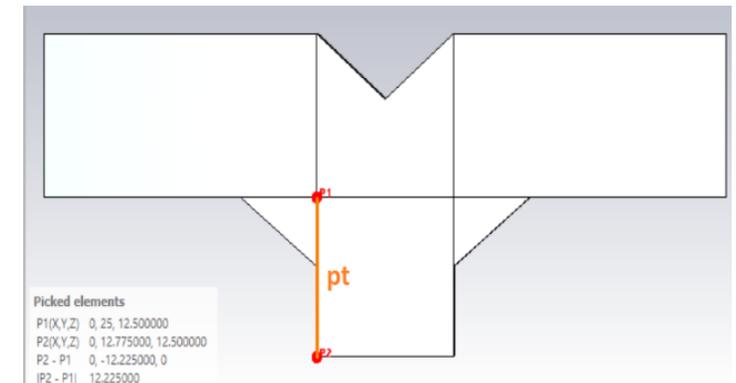
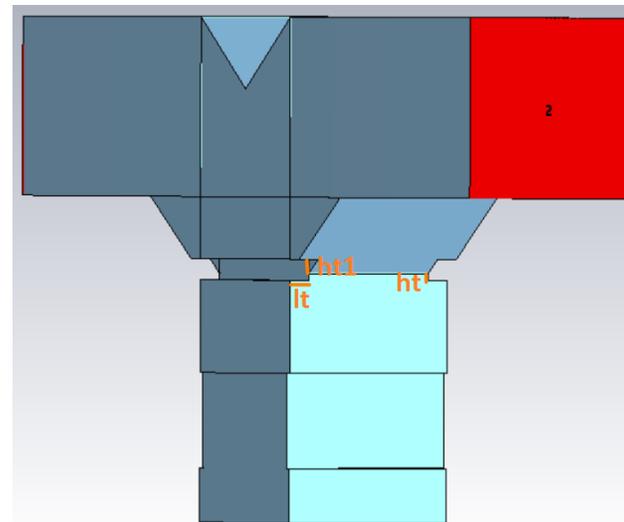
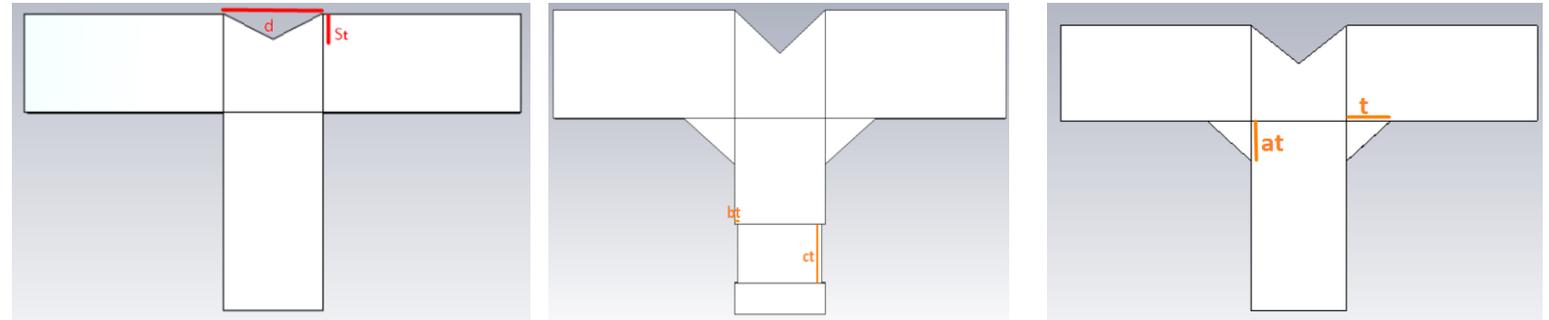
$$f_{c_{TE01}} = f_{c_{TE10}}$$

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

# DISEÑO

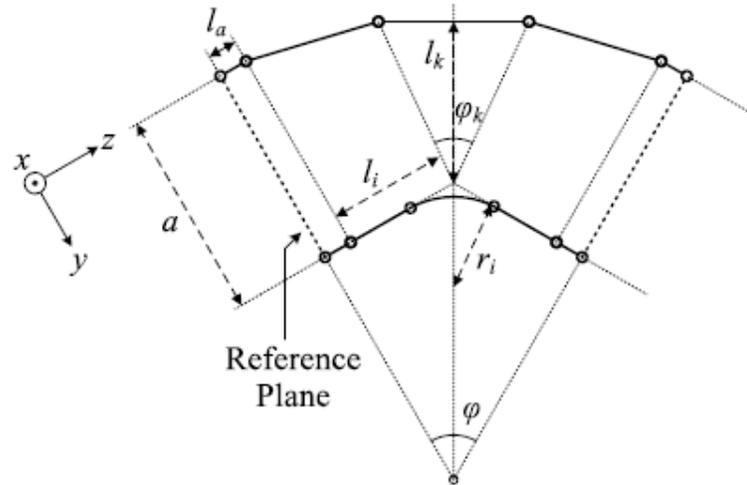
- Diseños individuales
- Divisor tipo T de 3 puertos

| Parámetro | Dimensión (mm) |
|-----------|----------------|
| a         | 12.5 mm        |
| St        | 5 mm           |
| t         | 5.8 mm         |
| at        | 5.3 mm         |
| d         | 12.5 mm        |
| ht        | 0.475 mm       |
| ht1       | 1 mm           |
| lt        | 1.5 mm         |
| pt        | 12.225 mm      |
| bt        | 0.47 mm        |
| ct        | 7 mm           |

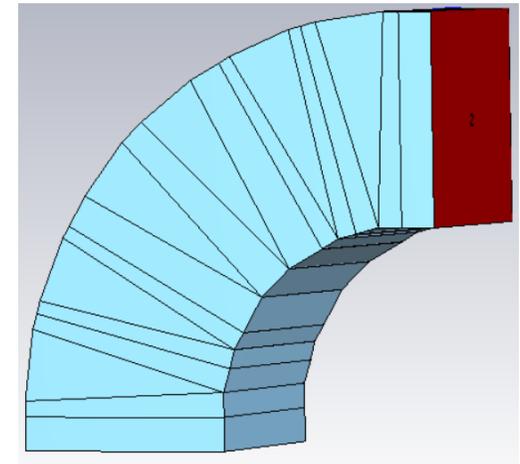
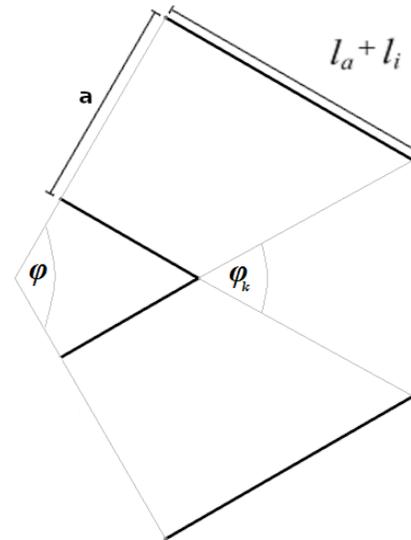
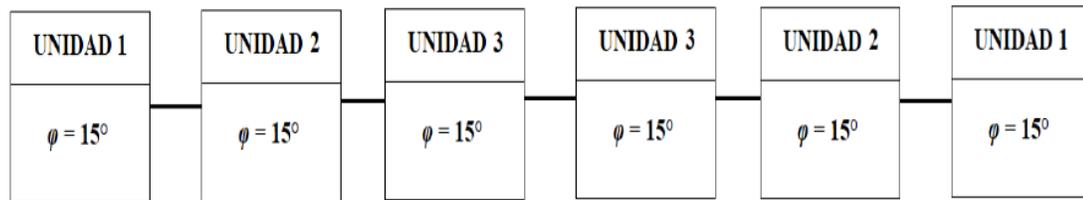


# DISEÑO

- Diseños individuales
- Codo a 90° Achanflado



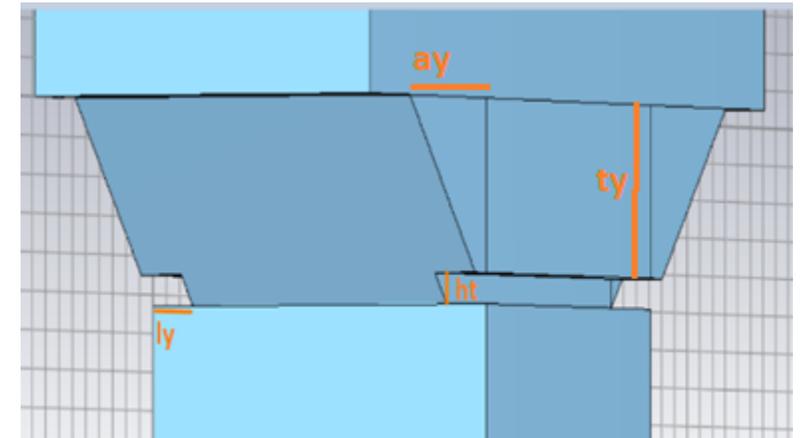
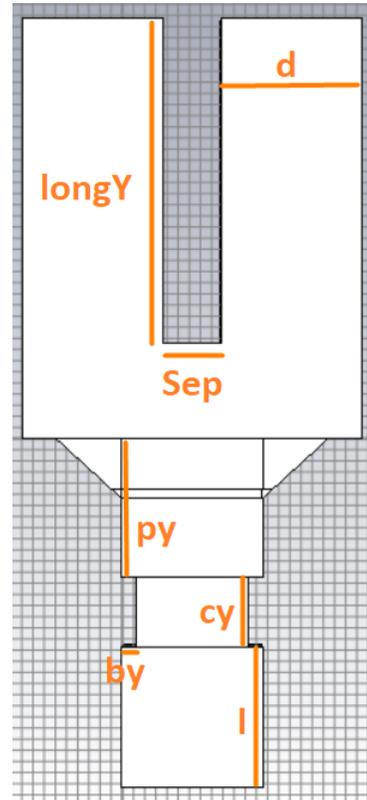
| Unidad | $\varphi(^{\circ})$ | $\varphi_k(^{\circ})$ | $l_i$   | $l_a$   |
|--------|---------------------|-----------------------|---------|---------|
| 1      | 15°                 | 19.59°                | 0.16575 | 1.2787  |
| 2      | 15°                 | 18.34°                | 0.3197  | 0.8288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



# DISEÑO

- Diseños individuales
- Divisor tipo Y de 3 puertos

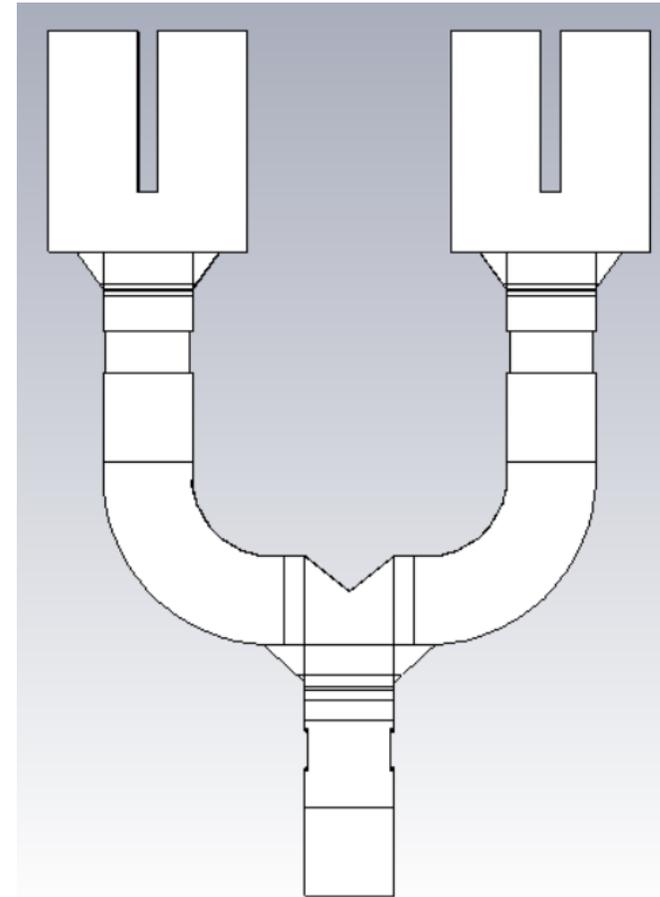
| Parámetro | Dimensión (mm) |
|-----------|----------------|
| a         | 12.5 mm        |
| Sep       | 5.1 mm         |
| lonY      | 29 mm          |
| d         | 12.5 mm        |
| ay        | 5.3 mm         |
| ty        | 5.8 mm         |
| hy        | 0.8 mm         |
| ly        | 1.5 mm         |
| py        | 12.309 mm      |
| by        | 0.3 mm         |
| cy        | 6.2 mm         |
| l         | 12.5 mm        |



# DISEÑO

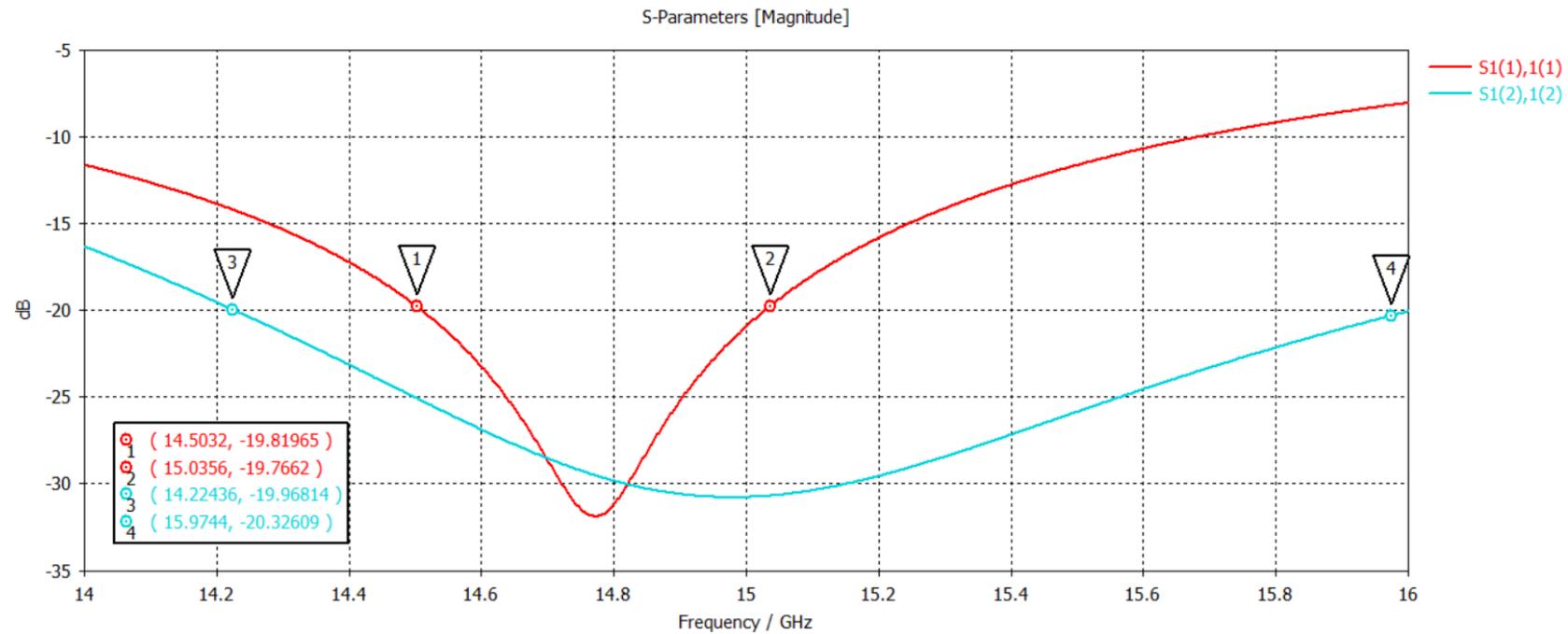
- Diseños individuales
- Divisor tipo T de 5 puertos

| 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      |



# RESULTADOS

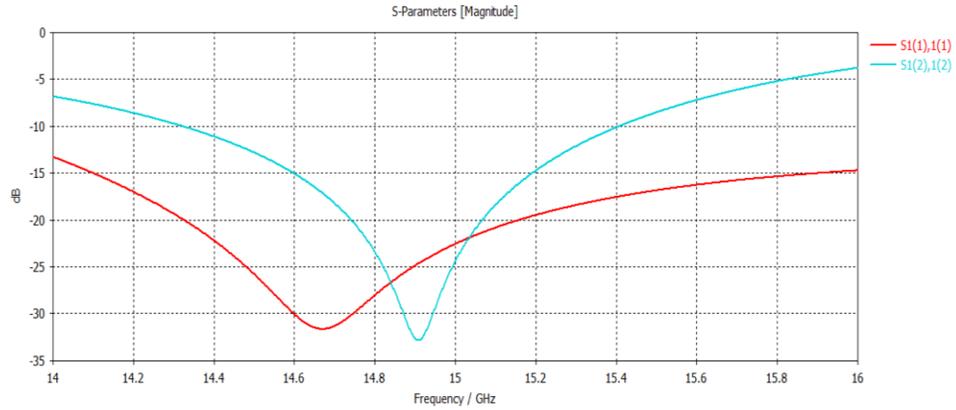
- **Divisor tipo T de 3 puertos**



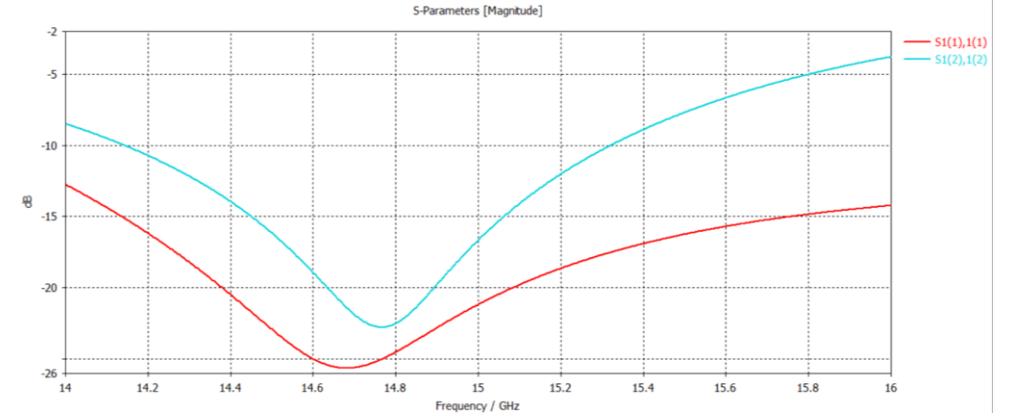
12

# RESULTADOS

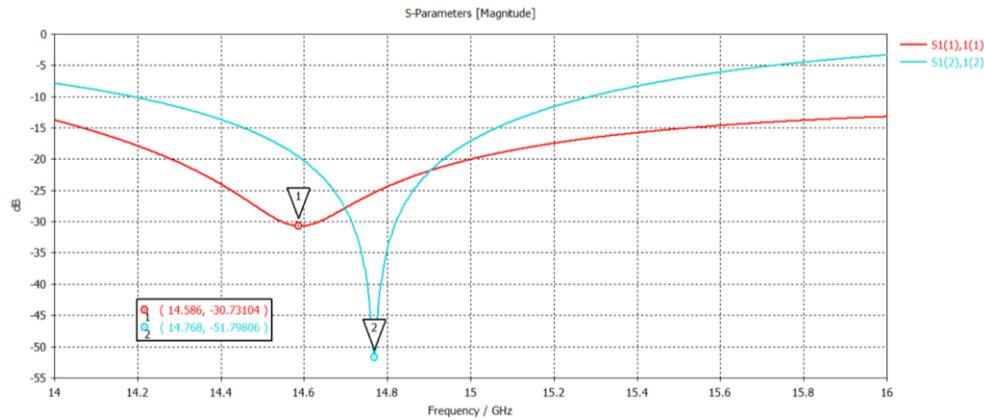
- Divisor tipo T de 3 puertos con codo a 90° achanflado



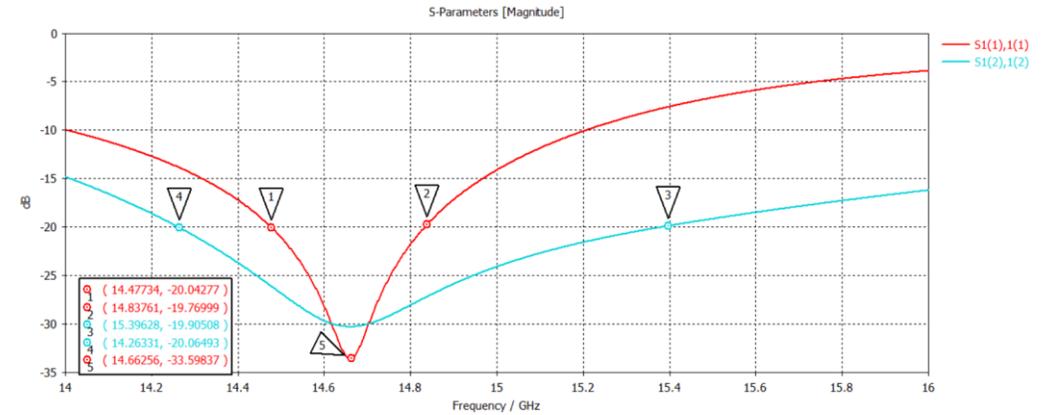
Diseño inicial



Mejora 1



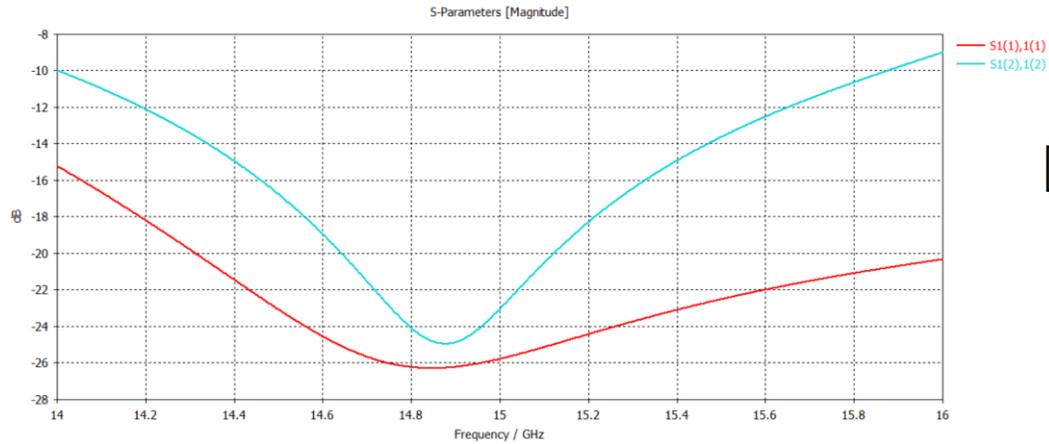
Mejora 2



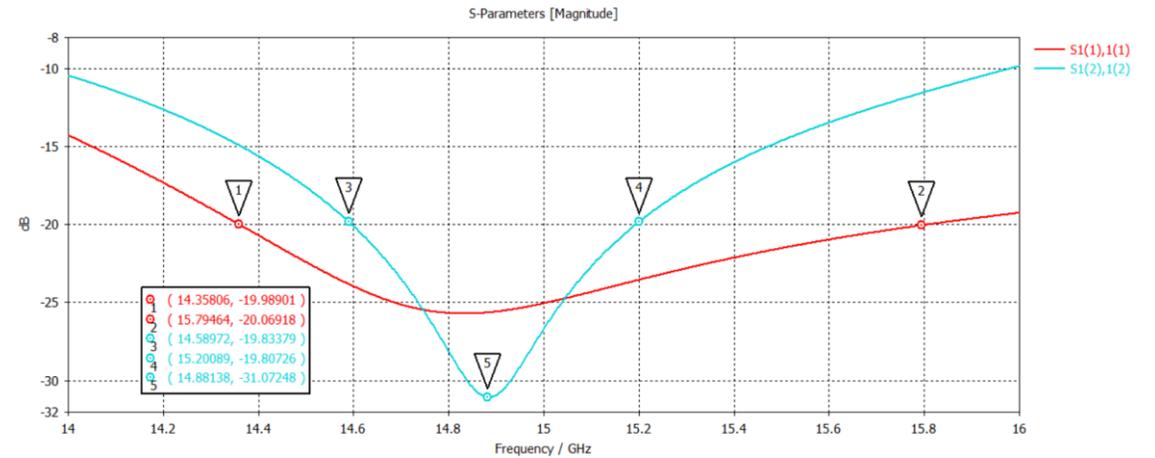
Mejora 3

# RESULTADOS

- **Divisor tipo Y de 3 puertos**



Diseño inicial

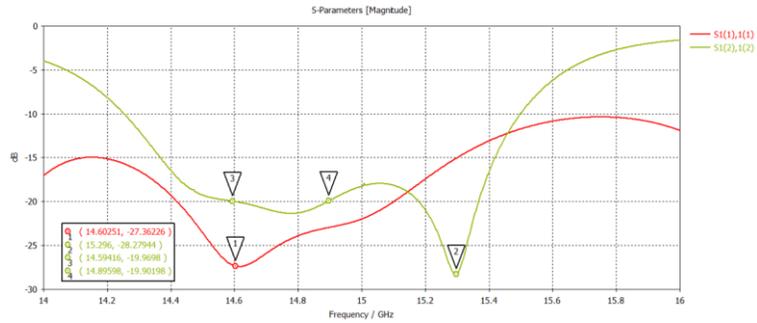


Diseño final

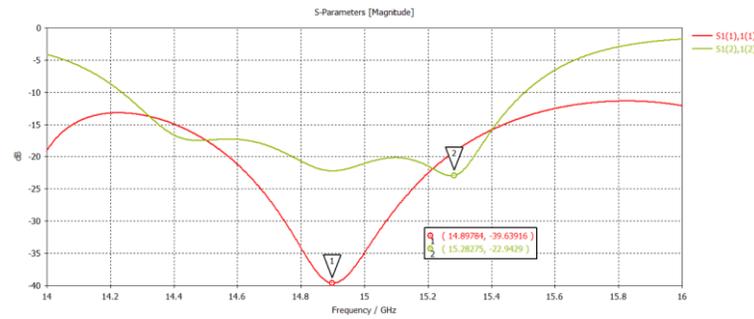


# RESULTADOS

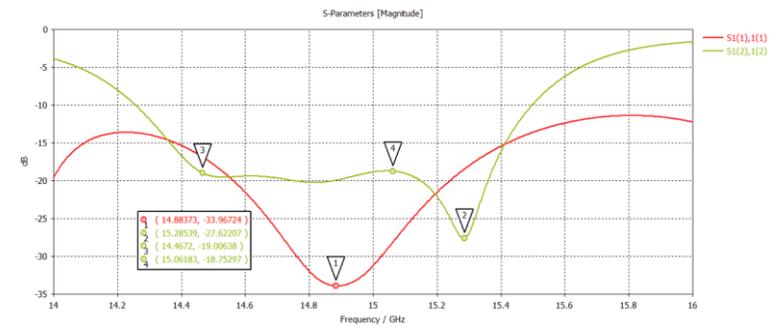
- **Divisor tipo T de 5 puertos**



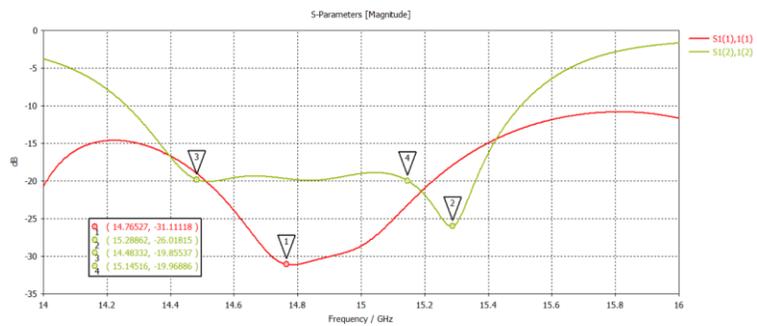
Diseño inicial



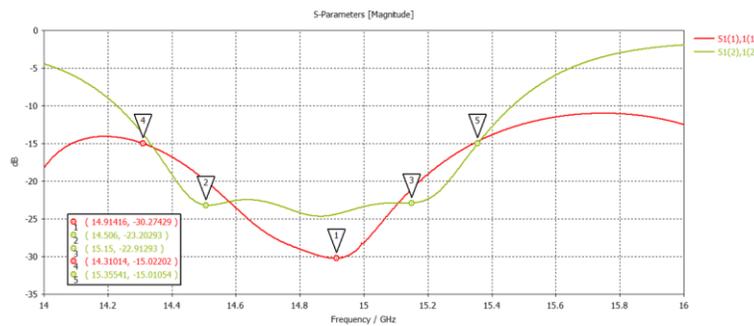
Optimización 1



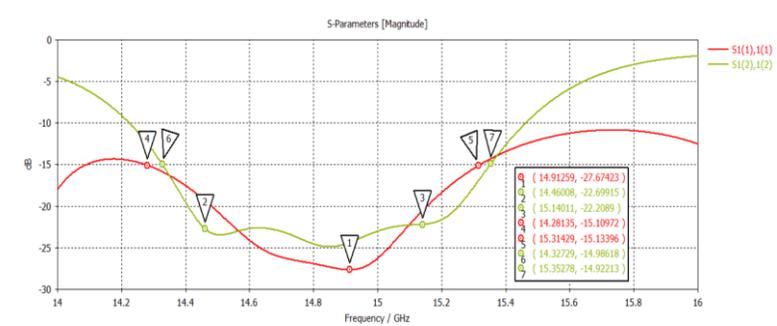
Optimización 2



Optimización 3



Optimización 4

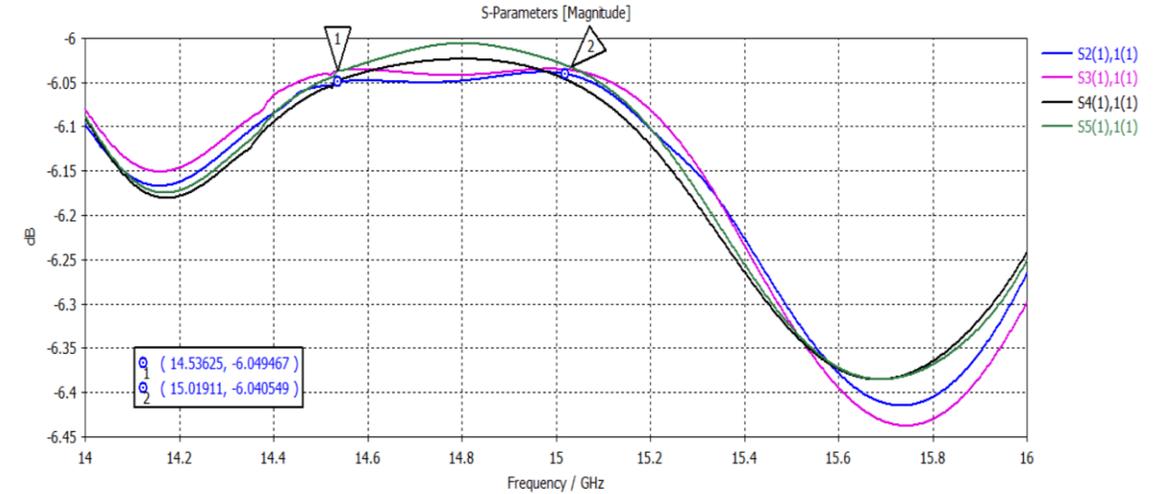
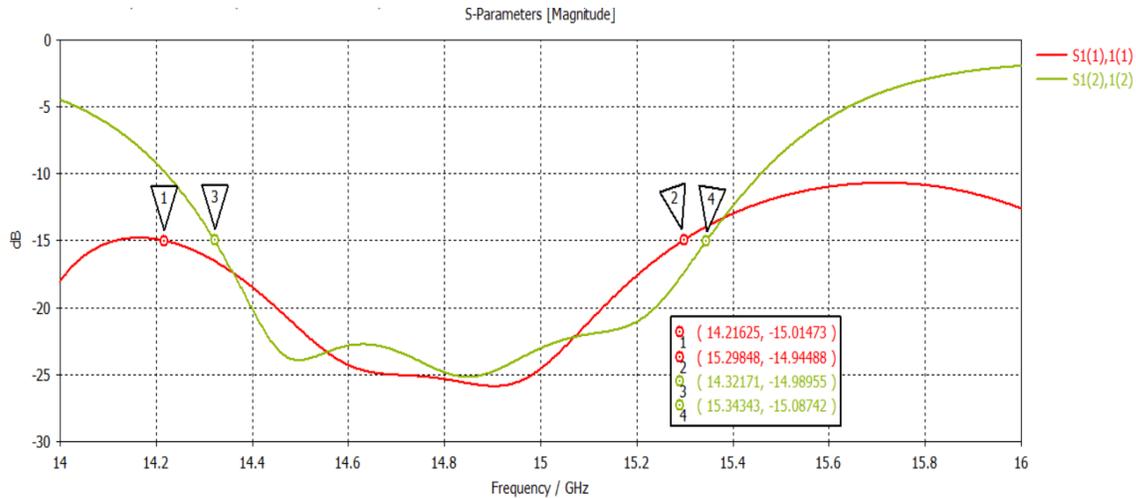


Optimización 5

15

# RESULTADOS

## • Divisor tipo T de 5 puertos



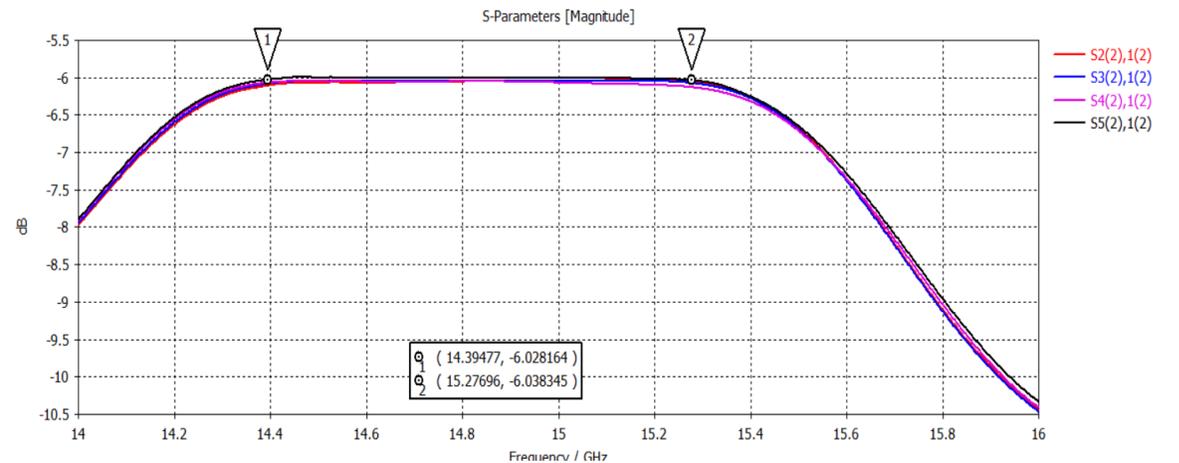
### Diseño Final

$$BW_{TE10} = 1,082 \text{ GHz}$$

$$BW_{TE01} = 1,021 \text{ GHz}$$

$$BW_{prom} = 1,051 \text{ GHz}$$

$$BW_{disp} = 6,917\%$$

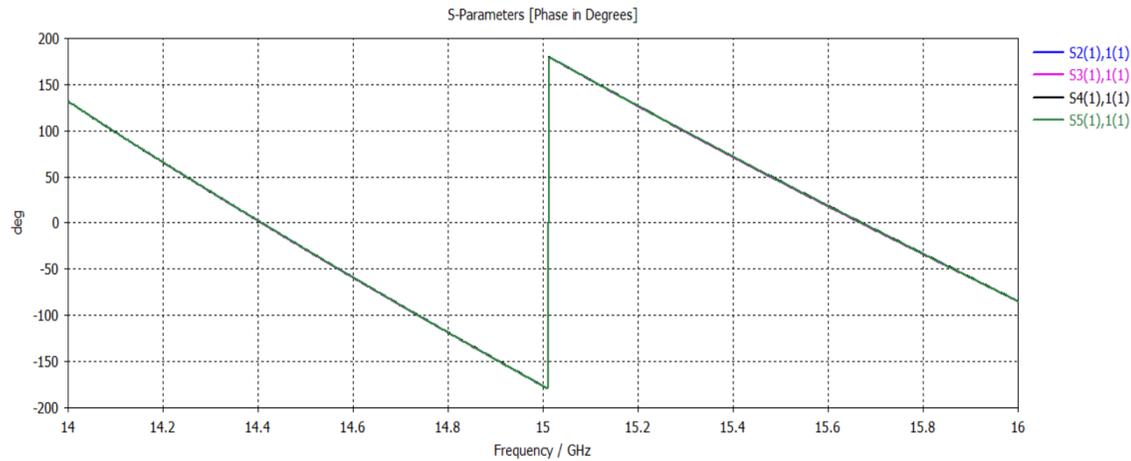


16

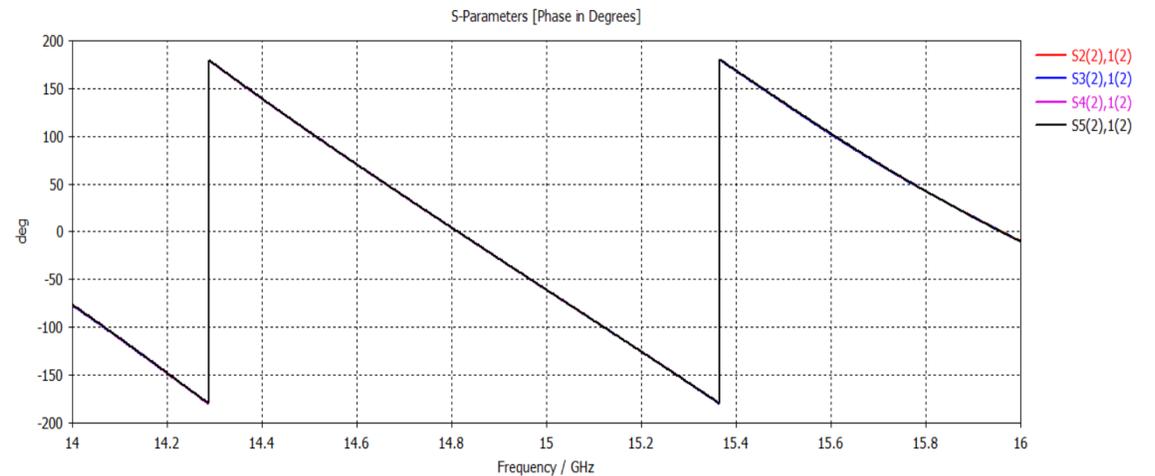


# RESULTADOS

- **Análisis de fase divisor tipo T de 5 puertos**



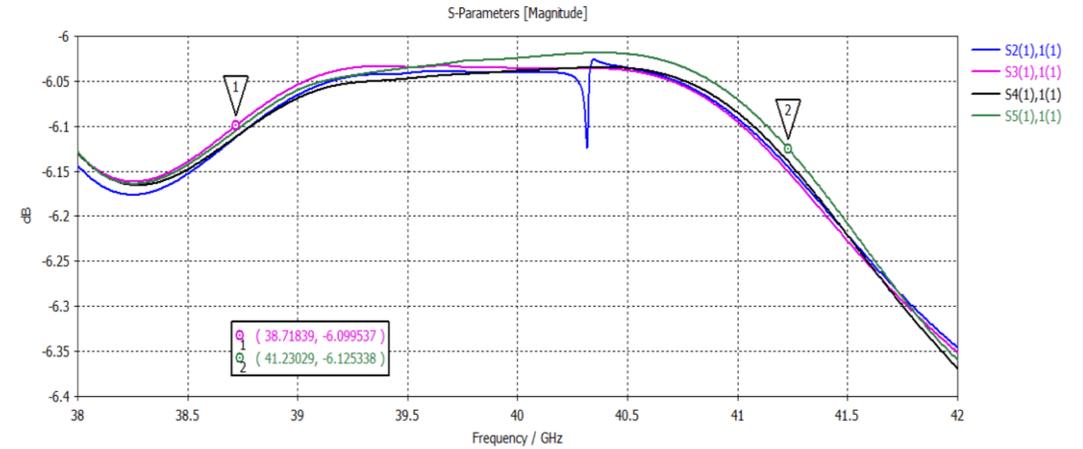
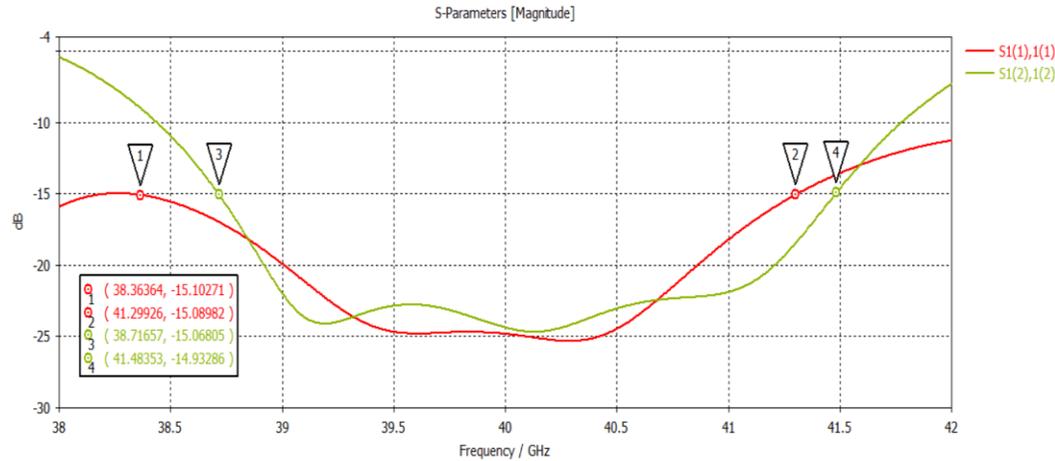
Fase TE10



Fase TE01

# RESULTADOS

- **Divisor tipo T de 5 puertos Escalado a 40GHz**



Fase TE10

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

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

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

$$k = \frac{a_{33}}{a_{15.2}}$$

$$k = 3.675$$

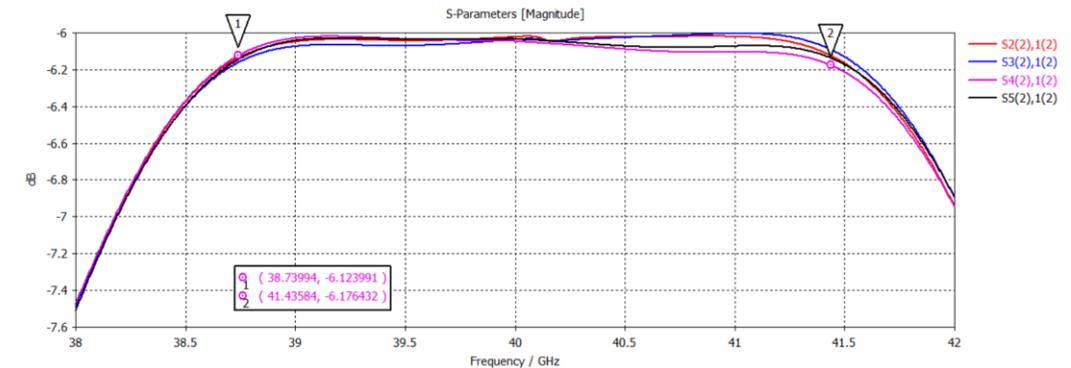
$$k \approx 3.7$$

$$BW_{TE10} = 2,926 \text{ GHz}$$

$$BW_{TE01} = 2,765 \text{ GHz}$$

$$BW_{prom} = 2,845 \text{ GHz}$$

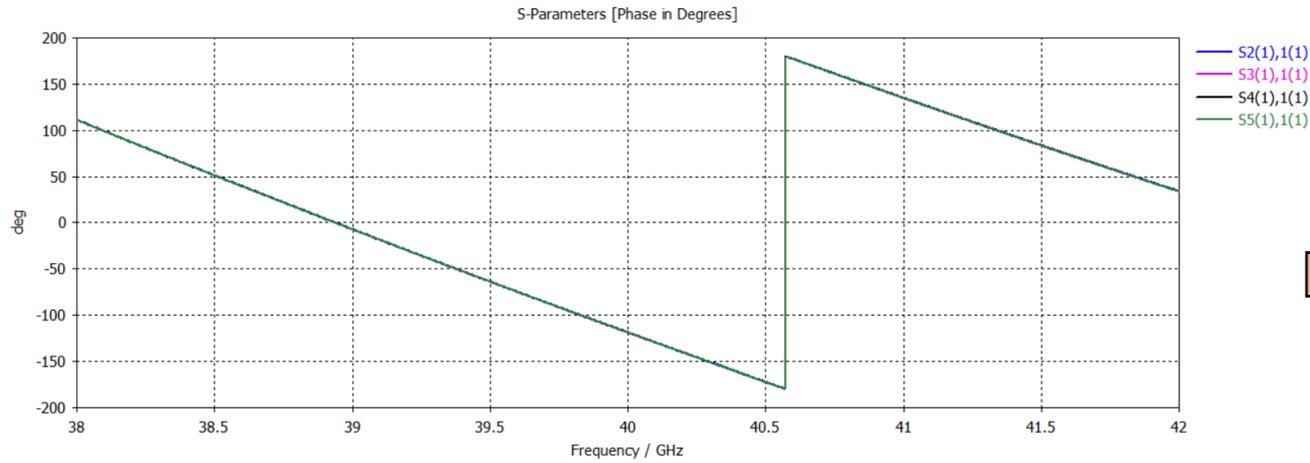
$$BW_{disp} = 7,175\%$$



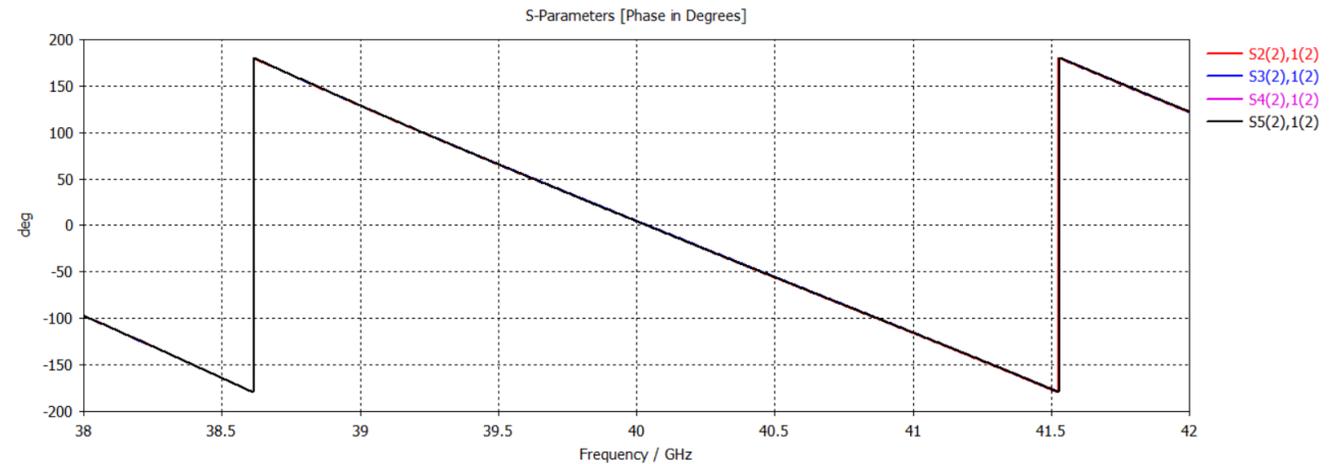
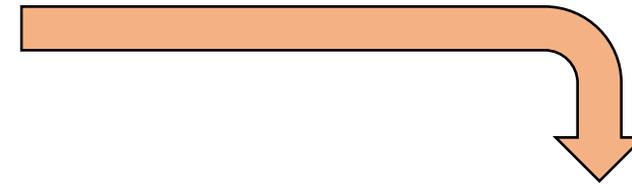
Fase TE01

# RESULTADOS

- **Análisis de fase divisor tipo T de 5 puertos Escalado**



Fase TE10



Fase TE01

# 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  $-3\text{dB}$  y reflexión niveles por debajo de  $-30\text{dB}$ , con esta respuesta se agregó un codo de  $90^\circ$  achanflado 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  $\text{TE}_{10}$  y  $\text{TE}_{01}$  un ancho de banda promedio de  $1.051\text{ GHz}$  para los coeficientes de reflexión que representa una banda útil del  $6.917\%$  de la banda Ku y un nivel alrededor de  $-6\text{dB}$  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  $\text{TE}_{10}$  están totalmente en fase, de igual manera los coeficientes de transmisión de modo  $\text{TE}_{01}$ , 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  $40\text{ GHz}$ , se obtuvo un incremento del ancho de banda que pasó de  $1.082\text{ GHz}$  a  $2.926\text{ GHz}$  para el modo  $\text{TE}_{10}$  y de  $1.021\text{GHz}$  a  $2.765\text{ GHz}$  para el modo  $\text{TE}_{01}$ , en promedio un ancho de banda de  $2.845\text{ GHz}$  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 62 y Figura 68.

## 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 TE<sub>10</sub> y TE<sub>01</sub> de la respuesta en frecuencia de los coeficientes de reflexión.

**GRACIAS  
POR SU ATENCIÓN**