

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



Grado en Ingeniería de Tecnologías y  
Servicios de Telecomunicación

TRABAJO FIN DE GRADO

**PROTOTIPADO 3D DE GUÍAS DE ONDA  
POCO CONVENCIONALES Y ESTUDIO  
DE SU USO EN DISPOSITIVOS DE  
POLARIZACIÓN PARA  
COMUNICACIONES POR SATÉLITE**

Autor: Patricia Cea Torralba

Tutor: Ana Morán López

Ponente: Jorge Alfonso Ruiz Cruz

Julio 2020



# PROTOTIPADO 3D DE GUÍAS DE ONDA POCO CONVENCIONALES Y ESTUDIO DE SU USO EN DISPOSITIVOS DE POLARIZACIÓN PARA COMUNICACIONES POR SATÉLITE

Autor: Patricia Cea Torralba

Tutor: Ana Morán López

Ponente: Jorge Alfonso Ruiz Cruz



Grupo RFCAS (RadioFrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas)

Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio 2020



# Resumen

## Resumen

Este documento recoge el estudio del diseño de un polarizador para guía de onda triangular equilátera, añadiendo como novedad el uso de corrugaciones en la guía de onda, ya utilizado anteriormente en modelos como la guía de onda rectangular, para obtener los resultados deseados.

Se iniciará exponiendo la necesidad de estos dispositivos en los sistemas de comunicación, explicando la función del polarizador, el medio de transmisión utilizado para el desarrollo del mismo, los tipos de polarización existentes y los que deseamos obtener, indicando cuáles son los parámetros que se deberán conseguir.

Una vez hayan quedado claros los conceptos básicos, se comenzará con el diseño del polarizador. Para ello, se calcularán los valores del mismo, estableciendo el ancho de frecuencias en el que se trabajará, el tipo de corte que se utilizará para conseguir el desfase y explicando cuál será el método utilizado para simular el polarizador.

Una vez establecido el método que se va a utilizar, se comenzarán a desarrollar los primeros modelos del polarizador, haciendo los ajustes oportunos. Finalmente, se mostrarán los resultados obtenidos en la simulación en CST Studio Suite donde se tendrán que hacer algunos ajustes con el fin de optimizar el polarizador.

## Palabras Clave

Ancho de banda, frecuencia de corte, modo fundamental, desfase, parámetros S, relación axial, polarización circular, polarización lineal, corrugación, guía de onda triangular equilátera, CST Studio Suite, Matlab.

## **Abstract**

This document presents a study of the design of a polarizer for an equilateral triangular waveguide, adding as a novelty the use of corrugations in the waveguide, already used previously in other models such as the rectangular waveguide, to obtain the wanted results.

It will begin by explaining the need for these devices in communication systems, explaining the function of the polarizer, the transmission media used for its development, the types of polarization that exist and those that we wish to obtain, indicating the parameters that must be achieved.

Once the basic concepts are clear, we will start with the design of the polarizer. To do this, the values of the polarizer will be calculated, establishing the bandwidth to be worked on, the type of corrugation that will be used to achieve the phase difference and explaining what method will be used to simulate the polarizer.

Then, with the method to follow for its development established, the first models of the polarizer will be developed, making the appropriate adjustments. Finally, the results obtained in the simulation will be shown in CST Studio Suite where some adjustments will be made in order to optimize the polarizer.

## **Keywords**

Bandwidth, cut-off frequency, fundamental mode, phase difference, S param, axial rate, circular polarization, linear polarization, corrugation, equilateral triangular waveguide, CST Studio Suite, Matlab.

# Agradecimientos

Me gustaría comenzar agradeciendo a mi tutora, Ana Morán López, por haberme propuesto este tema, y por haberme guiado en los primeros pasos de la realización del trabajo. También me gustaría agradecer el esfuerzo que ha realizado el ponente, Jorge A. Ruiz Cruz, para continuar con la tutorización del proyecto. Gracias también a Juan Córcoles Ortega y José Luis Masa Campos por ofrecerse a ayudarme cuando lo necesité para poder continuar con este trabajo. Todos ellos han hecho que se despierte en mí un gran interés en los sistemas de comunicaciones.

También me gustaría agradecer a mis padres, mis hermanos, mis tíos y mis abuelos por todo el apoyo que me han dado, no sólo durante la realización del trabajo, sino desde que nací, de no ser por ellos no podría haber llegado hasta aquí.

Me gustaría poder agradecer también a todos mis compañeros de la carrera, en especial a Ferchu, Adri, Víctor, David, Raúl, Edu, Juanjo, Álex, Belén y María, por aguantarme estos años. Con ellos he vivido grandes momentos y he pasado gran parte de mi tiempo junto a ellos, en ocasiones les veía más que a mi propia familia por tener que terminar prácticas o por preparar los exámenes de alguna asignatura que teníamos atravesada. Gracias por hacer que estos cuatro años hayan sido tan especiales, por acompañarme durante horas y días en la biblioteca, en los laboratorios y por todas las horas que nos habremos pasado esperando las largas colas de los microondas. Me llevo muy buenos recuerdos y unas amistades que espero que duren para siempre.

Agradecer también todo su apoyo a Andrea y Jorge, mis amigos de siempre, por estar ahí siempre que lo he necesitado, por animarme cuando no todo salía como esperaba y por ayudarme a abrir los ojos cuando no iba por buen camino. Siempre ocuparéis un lugar muy especial en mi vida.

Finalmente, me gustaría agradecer a mi novio, Gonzalo, todo el apoyo que me ha brindado durante la recta final del trabajo, por animarme a continuar cuando estaba atascada y no encontraba ninguna solución y por hacerme ver cuándo debía parar y descansar un rato para poder ver el trabajo con otra perspectiva. Ahora sí, puedo decir que soy ingeniera.

*Patricia Cea Torralba*

*Julio 2020*



# Índice general

<b>Índice de Figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.3. Organización de la memoria . . . . .	2
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>3</b>
2.1. Guía de onda triangular . . . . .	3
2.2. Concepto de polarización y tipos . . . . .	6
2.2.1. Polarización lineal . . . . .	7
2.2.2. Polarización circular . . . . .	9
2.2.3. Polarización elíptica . . . . .	10
2.3. Relación axial . . . . .	11
<b>3. Diseño</b>	<b>13</b>
3.1. Introducción . . . . .	13
3.2. Dimensiones de la guía de entrada . . . . .	13
3.3. Elección del corte para la corrugación . . . . .	14
3.3.1. Corte de una porción del lado del triángulo . . . . .	14
3.3.2. Corrugación formada por un triángulo de menor lado . . . . .	15
3.4. Sección del polarizador . . . . .	16
<b>4. Desarrollo</b>	<b>19</b>
4.1. Introducción . . . . .	19
4.2. Determinación del número de corrugaciones . . . . .	19
4.2.1. Dimensiones y especificaciones del polarizador . . . . .	19

4.2.2. Número de corrugaciones . . . . .	23
4.3. Nuevo diseño de la corrugación . . . . .	24
4.3.1. Dimensiones del polarizador . . . . .	24
4.3.2. Número de corrugaciones . . . . .	30
<b>5. Integración, pruebas y resultados</b>	<b>31</b>
5.1. Introducción . . . . .	31
5.2. Simulación en CST con 5 corrugaciones . . . . .	31
5.3. Simulación en CST con 6 corrugaciones . . . . .	33
5.3.1. Optimización del polarizador . . . . .	35
<b>6. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>41</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	41
6.2. Trabajo futuro . . . . .	42
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>
<b>A. Simulación para el tipo de corte en la corrugación</b>	<b>45</b>
A.1. Modelo 1 . . . . .	45
A.2. Modelo 2 . . . . .	46
A.3. Modelo 3 . . . . .	47
A.4. Modelo 4 . . . . .	48
A.5. Modelo 5 . . . . .	49
<b>B. Simulaciones del modelo circuital</b>	<b>51</b>
B.1. Introducción . . . . .	51
B.2. Simulación en Matlab con 5 corrugaciones . . . . .	51
B.3. Simulación en Matlab con 6 corrugaciones . . . . .	52
B.4. Simulación en Matlab con 6 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	53
B.5. Simulación en Matlab con 5 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	54
B.6. Simulación en Matlab con 5 corrugaciones con $t = 3$ y $x = 3$ . . . . .	55

# Índice de Figuras

2.1. Guía de onda triangular. . . . .	3
2.2. Campo eléctrico (en azul) y campo magnético (en verde) para los primeros modos de la guía triangular (modo $TE_{10}$ asimétrico, más adelante se le llamará modo vertical y modo $TE_{10}$ simétrico, que se le denominará modo horizontal debido a la dirección del campo eléctrico).[3] . . . . .	6
2.3. Polarización lineal . . . . .	8
2.4. Polarización lineal formada por ambas componentes . . . . .	8
2.5. Polarización circular . . . . .	9
2.6. Polarización elíptica . . . . .	10
2.7. Elipse de polarización . . . . .	11
3.1. Vista frontal del corte planteado para las corrugaciones . . . . .	15
3.2. Vista frontal del corte planteado para las corrugaciones . . . . .	15
3.3. Sección del polarizador . . . . .	16
4.1. Comportamiento de una corrugación para distintos valores de $b$ . . . . .	20
4.2. Comportamiento de una corrugación para distintos valores de $t_{seccion}$ . . . . .	21
4.3. Comportamiento de dos corrugaciones para distintos valores de $t$ . . . . .	22
4.4. Comportamiento del polarizador para diferente número de corrugaciones . . . . .	23
4.5. Vista frontal del nuevo corte planteado para las corrugaciones . . . . .	24
4.6. Sección del polarizador . . . . .	25
4.7. Comportamiento de una corrugación para distintos valores de $b$ . . . . .	26
4.8. Comportamiento de una corrugación para distintos valores de $x$ . . . . .	27
4.9. Comportamiento de una corrugación para distintos valores de $t_{seccion}$ . . . . .	28
4.10. Comportamiento de una corrugación para distintos valores de $t$ . . . . .	29
4.11. Comportamiento del polarizador para diferente número de corrugaciones . . . . .	30
5.1. Sección canónica del polarizador con 5 corrugaciones diseñada en CST. . . . .	31
5.2. Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones . . . . .	32

5.3. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones . . . . .	32
5.4. Relación axial para el polarizador de 5 corrugaciones . . . . .	33
5.5. Sección canónica del polarizador con 6 corrugaciones diseñada en CST. . . . .	33
5.6. Parámetros S del polarizador con 6 corrugaciones . . . . .	34
5.7. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 6 corrugaciones . . . . .	34
5.8. Relación axial para el polarizador de 6 corrugaciones . . . . .	35
5.9. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 6 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	35
5.10. Relación axial para el polarizador de 6 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	35
5.11. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	36
5.12. Relación axial para el polarizador de 5 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	36
5.13. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones con $t = 3$ y $x = 3$ . . . . .	37
5.14. Relación axial para el polarizador de 5 corrugaciones con $t = 3$ y $x = 3$ . . . . .	37
5.15. Parámetro $S_{11}$ del polarizador con 5 corrugaciones . . . . .	38
5.16. Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones . . . . .	39
A.1. Sección canónica del modelo 1 diseñada en CST. . . . .	45
A.2. Parámetros S del modo $TE_{10}$ simétrico para el modelo 1. . . . .	45
A.3. Parámetros S del modo $TE_{10}$ asimétrico para el modelo 1. . . . .	46
A.4. Desfase entre los modos del modelo 1 . . . . .	46
A.5. Sección canónica del modelo 2 diseñada en CST. . . . .	46
A.6. Parámetros S del modo $TE_{10}$ simétrico para el modelo 2. . . . .	46
A.7. Parámetros S del modo $TE_{10}$ asimétrico para el modelo 2. . . . .	47
A.8. Desfase entre los modos del modelo 2 . . . . .	47
A.9. Sección canónica del modelo 3 diseñada en CST. . . . .	47
A.10. Parámetros S del modo $TE_{10}$ simétrico para el modelo 3. . . . .	47
A.11. Parámetros S del modo $TE_{10}$ asimétrico para el modelo 3. . . . .	48
A.12. Desfase entre los modos del modelo 3 . . . . .	48
A.13. Sección canónica del modelo 4 diseñada en CST. . . . .	48
A.14. Parámetros S del modo $TE_{10}$ simétrico para el modelo 4. . . . .	48
A.15. Parámetros S del modo $TE_{10}$ asimétrico para el modelo 4. . . . .	49
A.16. Desfase entre los modos del modelo 4 . . . . .	49
A.17. Sección canónica del modelo 5 diseñada en CST. . . . .	49

A.18. Parámetros S del modo $TE_{10}$ simétrico para el modelo 5. . . . .	49
A.19. Parámetros S del modo $TE_{10}$ asimétrico para el modelo 5. . . . .	50
A.20. Desfase entre los modos del modelo 5 . . . . .	50
B.1. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones . . . . .	51
B.2. Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones . . . . .	52
B.3. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 6 corrugaciones . . . . .	52
B.4. Parámetros S del polarizador con 6 corrugaciones . . . . .	53
B.5. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 6 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	53
B.6. Parámetros S del polarizador con 6 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	54
B.7. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	54
B.8. Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones con $t = 3$ . . . . .	55
B.9. Desfase entre los modos $TE_{10}$ asimétrico y $TE_{10}$ simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones con $t = 3$ y $x = 3$ . . . . .	55
B.10. Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones con $t = 3$ y $x = 3$ . . . . .	56



# Índice de Tablas

4.1. Dimensiones y especificaciones del polarizador . . . . .	19
4.2. Dimensiones de las corrugaciones del polarizador . . . . .	23
4.3. Dimensiones y especificaciones del polarizador final . . . . .	29



# 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

---

El uso de polarizadores en un sistema de comunicaciones es fundamental ya que es el que permite, junto con el resto del alimentador de la antena, que la información transmitida llegue correctamente a su destino. La función del polarizador es transformar la polarización de la onda, de una polarización lineal a una polarización circular. Esto se hace porque si se transmite una onda con polarización lineal, se tendrían que colocar las antenas del sistema totalmente alineadas, sino se perdería parte de la señal. En cambio, al utilizarse una polarización circular, el margen de error a la hora de colocar las antenas es mayor.

Al hacer uso de un ancho de banda comprendido en el rango de frecuencias de la banda Ka, rango muy utilizado en las comunicaciones por satélite, una de las posibles aplicaciones para el polarizador diseñado en este trabajo será el poder incorporarlo en un sistema de comunicación vía satélite.

El fin de este trabajo, es investigar la forma de guía de onda triangular y ver qué posibilidades nos puede proporcionar este tipo de guía tan poco conocida hasta ahora y qué ventajas puede darnos frente a la guía de onda rectangular, modelo que ya está muy estudiado a día de hoy.

### 1.2. Objetivos

---

El objetivo fundamental de este trabajo consiste en mostrar el proceso de diseño de un polarizador, exponiendo las técnicas que pueden ser utilizadas. Una vez familiarizados con este proceso, se pasarán a aplicar las técnicas usadas para el desarrollo del polarizador.

Otro de los objetivos de este proyecto, será la familiarización con herramientas de simulación electromagnética, tal como CST Studio Suite, y la profundización en el manejo

de la herramienta Matlab para la resolución de cálculos, simulaciones previas al diseño y para el procesado de datos obtenidos con CST Studio Suite.

Este trabajo se dará por terminado cuando se consiga un desfase de  $90^\circ$ , una adaptación de impedancias inferior a 20 [dB], una transmisión de potencia aproximada a 0 [dB] y una relación axial igual a 0 [dB]. Todo esto en un ancho de banda que esté comprendido entre 22 [GHz] y 34 [GHz] para trabajar en un ancho de banda monomodo.

### **1.3. Organización de la memoria**

---

Este documento se ha organizado de la siguiente manera:

- **Capítulo 1: Motivación, objetivos y estructura de la memoria.**  
Se trata de una introducción completa al trabajo, donde se expone la necesidad de investigar la realización de un polarizador de guía de onda triangular y qué objetivos debe cumplir el mismo para dar por finalizado el estudio.
- **Capítulo 2: Estado del arte.**  
En este capítulo se explicará de forma teórica cómo es una guía de onda triangular, qué es la polarización y qué tipos existen, y qué es la relación axial. Con todos estos conceptos aclarados, se podrá entender mejor el resto del trabajo.
- **Capítulo 3: Diseño.**  
Se hablará de cómo se modificará la estructura de la guía de onda para conseguir el desfase necesario para conseguir que se comporte como un polarizador. Para ello, se presentarán varios modelos con sus respectivas simulaciones, que nos permitirá elegir el diseño más óptimo para llegar al objetivo final.
- **Capítulo 4: Desarrollo.**  
A lo largo de este capítulo se establecerán las dimensiones y las especificaciones del polarizador y se establecerá el diseño final del polarizador, a falta de comprobar sus resultados y las posibles mejoras que pudiera necesitar.
- **Capítulo 5: Integración, pruebas y resultados.**  
Se muestran los resultados obtenidos del desarrollo del trabajo, encontrando posibles mejoras que se optimizarán hasta conseguir los resultados deseados y cumpliendo los objetivos fijados al principio de este documento.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro.**  
Se reflexionará sobre el trabajo realizado y cuáles podrían ser vías de mejora para posibles trabajos futuros, o cuáles podrían ser otras ramas de estudio partiendo de los resultados obtenidos con este trabajo.
- Para finalizar con esta memoria, se añadirán algunos anexos y referencias consultadas para su realización.

# 2

## Estado del Arte

### 2.1. Guía de onda triangular

---

El medio de transmisión que se va a utilizar para realizar el diseño del polarizador, va a ser una guía de onda triangular, más concretamente una guía de onda triangular equilátera, como la que se muestra en la **Figura 2.1**. La elección de este tipo de guía viene motivado por la reciente tesis doctoral de la tutora del trabajo, Ana Morán, en la cual se estudiaba el modelado y diseño eficientes de dispositivos de guía de onda [1]. En esta tesis, se explicaba que la motivación para estudiar el uso de este tipo de guía de onda para los polarizadores venía por la creciente utilización del 5G y los exigentes requisitos que debe cumplir un sistema de comunicaciones por satélite. También indicaba la utilización de las guías de onda para los dispositivos pasivos, que típicamente se han desarrollado con secciones canónicas rectangulares, circulares o elípticas, y cómo con la revolución de las impresoras 3D se abre un nuevo abanico de posibilidades de diseño.

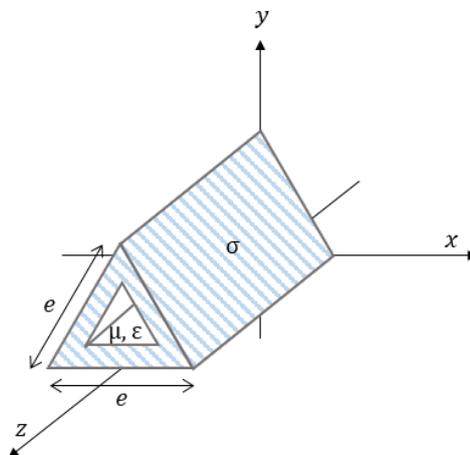


Figura 2.1: Guía de onda triangular.

Los campos eléctrico y magnético que se propagan por el interior de la guía triangular según el eje  $+z$  pueden describirse como una serie de modos ortogonales: [2]

$$\vec{E} = \sum_{p=1}^{\infty} (a_p e^{-\gamma_p z} + b_p e^{\gamma_p z}) \vec{e}_p + (a_p e^{-\gamma_p z} - b_p e^{\gamma_p z}) e_{zp} \hat{z}, \quad (2.1)$$

$$\vec{H} = \sum_{p=1}^{\infty} (a_p e^{-\gamma_p z} - b_p e^{\gamma_p z}) \vec{h}_p + (a_p e^{-\gamma_p z} + b_p e^{\gamma_p z}) h_{zp} \hat{z}, \quad (2.2)$$

donde  $a_p e^{-\gamma_p z}$  y  $b_p e^{\gamma_p z}$  se conocen como las amplitudes modales en el plano arbitrario  $z$ , y en el que las variables complejas  $a_p$  y  $b_p$  están determinadas por la excitación y la carga de la guía de onda. La constante de propagación  $\gamma_p$  y los campos transversales de cada modo  $\vec{e}_p$  y  $\vec{h}_p$  dependen de la geometría de la guía considerada.

Este tipo de guía de onda tiene cuatro funciones para generar los campos TE y TM dependiendo del modo y de la simetría de la misma. Esas funciones son las siguientes: [3]

$$\phi_{TE}^S = \cos(\tilde{k}_{y1}(y-b)) \cos(\tilde{k}_{x1}x) + \cos(\tilde{k}_{y2}(y-b)) \cos(\tilde{k}_{x2}x) + \cos(\tilde{k}_{y3}(y-b)) \cos(\tilde{k}_{x3}x), \quad (2.3)$$

$$\phi_{TE}^A = \cos(\tilde{k}_{y1}(y-b)) \sin(\tilde{k}_{x1}x) + \cos(\tilde{k}_{y2}(y-b)) \sin(\tilde{k}_{x2}x) + \cos(\tilde{k}_{y3}(y-b)) \sin(\tilde{k}_{x3}x), \quad (2.4)$$

$$\phi_{TM}^S = \sin(\tilde{k}_{y1}(y-b)) \cos(\tilde{k}_{x1}x) + \sin(\tilde{k}_{y2}(y-b)) \cos(\tilde{k}_{x2}x) + \sin(\tilde{k}_{y3}(y-b)) \cos(\tilde{k}_{x3}x), \quad (2.5)$$

$$\phi_{TM}^A = \sin(\tilde{k}_{y1}(y-b)) \sin(\tilde{k}_{x1}x) + \sin(\tilde{k}_{y2}(y-b)) \sin(\tilde{k}_{x2}x) + \sin(\tilde{k}_{y3}(y-b)) \sin(\tilde{k}_{x3}x), \quad (2.6)$$

donde

$$\tilde{k}_{y1} = \frac{(-m-n)\pi}{b}, \quad (2.7)$$

$$\tilde{k}_{y2} = \frac{m\pi}{b}, \quad (2.8)$$

$$\tilde{k}_{y3} = \frac{n\pi}{b}, \quad (2.9)$$

$$\tilde{k}_{x1} = \frac{(m-n)\pi}{\sqrt{3}b}, \quad (2.10)$$

$$\tilde{k}_{x2} = \frac{(m + 2n)\pi}{\sqrt{3}b}, \quad (2.11)$$

$$\tilde{k}_{x3} = \frac{(-2m - n)\pi}{\sqrt{3}b} \quad (2.12)$$

La frecuencia de corte indica la frecuencia a partir de la cual tendremos propagación en el interior de la guía, La frecuencia de corte del modo  $mn$  será

$$f_c = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}, \quad (2.13)$$

donde la constante permitividad eléctrica  $\varepsilon$  y la constante de permeabilidad magnética  $\mu$  utilizadas para el interior de la guía de onda serán las utilizadas en el vacío, es decir,  $\varepsilon_0 = 8,85418781 \cdot 10^{-12}[F(m)]$  y  $\mu_0 = 1,25663706 \cdot 10^{-6}[H/m]$ . Se van a utilizar las constantes en el vacío porque se parte del supuesto de que la guía de onda diseñada no tendrá pérdidas. El número de onda  $k_c$  puede ser calculado para cada modo utilizando (2.14).

$$k_c = \frac{4\pi}{3e} \sqrt{m^2 + n^2 + mn} = \sqrt{\tilde{k}_{xi}^2 + \tilde{k}_{yi}^2}, \quad \text{con } i = 1, 2, 3. \quad (2.14)$$

La constante de propagación del medio viene definida por la constante de atenuación y la constante de fase de la siguiente forma

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.15)$$

Para el caso de estudio, se ha supuesto que el medio de transmisión carece de pérdidas por lo que la constante de fase, que se corresponde con la parte imaginaria de la constante propagación, podrá definirse por la longitud de onda de la guía tal y como se indica en (2.16).

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (2.16)$$

La longitud de onda de la guía está definida por

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}, \quad (2.17)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda definida como el cociente entre la constante de velocidad del aire ( $c_0 = 3 \cdot 10^8[m/s]$ ) y la frecuencia  $f$ , y  $f_c$  es la frecuencia de corte. [2]

Para el caso de la guía triangular, nos fijaremos en el modo  $TE_{10}$  tanto el asimétrico, como el simétrico, que serán los primeros modos en propagarse por la guía. La forma del campo para este modo será como el representado en la **Figura 2.2**.

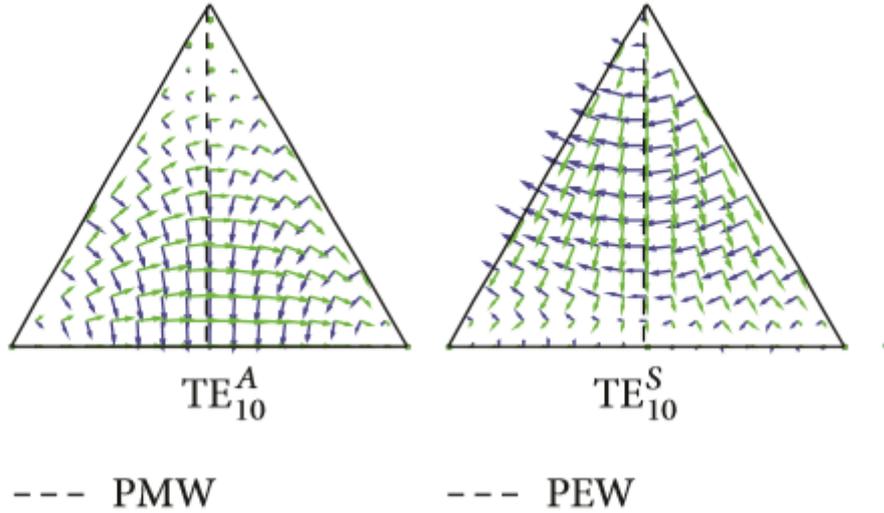


Figura 2.2: Campo eléctrico (en azul) y campo magnético (en verde) para los primeros modos de la guía triangular (modo  $TE_{10}$  asimétrico, más adelante se le llamará modo vertical y modo  $TE_{10}$  simétrico, que se le denominará modo horizontal debido a la dirección del campo eléctrico).[3]

A continuación, se va a particularizar el campo  $TE$  para el caso de los modos mostrados en la **Figura 2.2**. Para el modo simétrico corresponderá la formulación (2.18).

$$\phi_{TE_{10}}^S = \cos\left(\frac{-\pi}{b}(y-b)\right) \cos\left(\frac{\pi}{\sqrt{3}b}x\right) + \cos\left(\frac{\pi}{b}(y-b)\right) \cos\left(\frac{\pi}{\sqrt{3}b}x\right) + \cos\left(\frac{-2\pi}{\sqrt{3}b}x\right) \quad (2.18)$$

Y para el modo asimétrico será (2.19).

$$\phi_{TE_{10}}^A = \cos\left(\frac{-\pi}{b}(y-b)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\sqrt{3}b}x\right) + \cos\left(\frac{\pi}{b}(y-b)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\sqrt{3}b}x\right) + \sin\left(\frac{-2\pi}{\sqrt{3}b}x\right) \quad (2.19)$$

## 2.2. Concepto de polarización y tipos

---

Con este trabajo se desea obtener una polarización circular partiendo de una polarización lineal a la entrada. Para ello se debe explicar qué es la polarización y qué tipos de polarización existen. [2]

La polarización de una onda electromagnética consiste en la forma geométrica que proyecta el vector del campo eléctrico a lo largo del tiempo la onda. El vector de campo eléctrico para una onda plana homogénea que se propaga en el según  $+\hat{z}$  se define como:

$$\vec{E}(z, t) = E_x(z, t) \hat{x} + E_y(z, t) \hat{y} \quad (2.20)$$

donde las componentes en  $x$  y en  $y$  particularizando para el caso sin pérdidas, serán:

$$E_x(z, t) = \text{Re}\{E_x e^{j\omega t} e^{-\gamma z}\} = \text{Re}\{E_{xo} e^{j(\omega t - \beta z + \varphi_x)}\} = E_{xo} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_x), \quad (2.21)$$

$$E_y(z, t) = \text{Re}\{E_y e^{j\omega t} e^{-\gamma z}\} = \text{Re}\{E_{yo} e^{j(\omega t - \beta z + \varphi_y)}\} = E_{yo} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_y), \quad (2.22)$$

donde  $E_x$  y  $E_y$  son los fasores que corresponden a las componentes  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  respectivamente. Estos fasores están formados por su módulo ( $E_{xo}$  y  $E_{yo}$ , respectivamente) y su fase ( $\varphi_x$  y  $\varphi_y$ , respectivamente).

Existen tres tipos de polarización según la forma que adapte el campo eléctrico en el tiempo, estos son: polarización lineal, polarización circular y polarización elíptica. A continuación, se explicará con más detalle las particularidades de cada una de ellas y cuáles son los requisitos que deben presentarse para que se dé una polarización de cada tipo.

### 2.2.1. Polarización lineal

El vector del campo eléctrico oscila sobre una línea recta que es única en el plano  $XY$ , a su vez será perpendicular a la dirección de propagación [4]. La polarización horizontal y vertical se pueden transmitir independientemente debido al desacoplamiento por ortogonalidad. Esto es que, la ortogonalidad modal permite desacoplar el sistema obteniendo como resultado dos sistemas independientes.

Si el campo eléctrico  $\vec{E}(z, t)$  posee componentes  $E_x$  y  $E_y$  que están en fase, la polarización seguirá siendo lineal. La amplitud del campo eléctrico resultante de la superposición será:

$$|E| = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2}, \quad (2.23)$$

y la orientación con respecto al plano  $XY$  será:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{E_y}{E_x} \right) \quad (2.24)$$

Este tipo de polarización se puede dar de dos formas.

Una de ellas es si el vector de campo eléctrico  $\vec{E}(z, t)$  está formado únicamente por una de las dos componentes mencionadas anteriormente en (2.21) y en (2.22), es decir,

$$\vec{E}(z, t) = E_x(z, t) \hat{x}, \quad \text{conocida como polarización lineal horizontal.} \quad (2.25)$$

$$\vec{E}(z, t) = E_y(z, t) \hat{y}, \quad \text{conocida como polarización lineal vertical.} \quad (2.26)$$

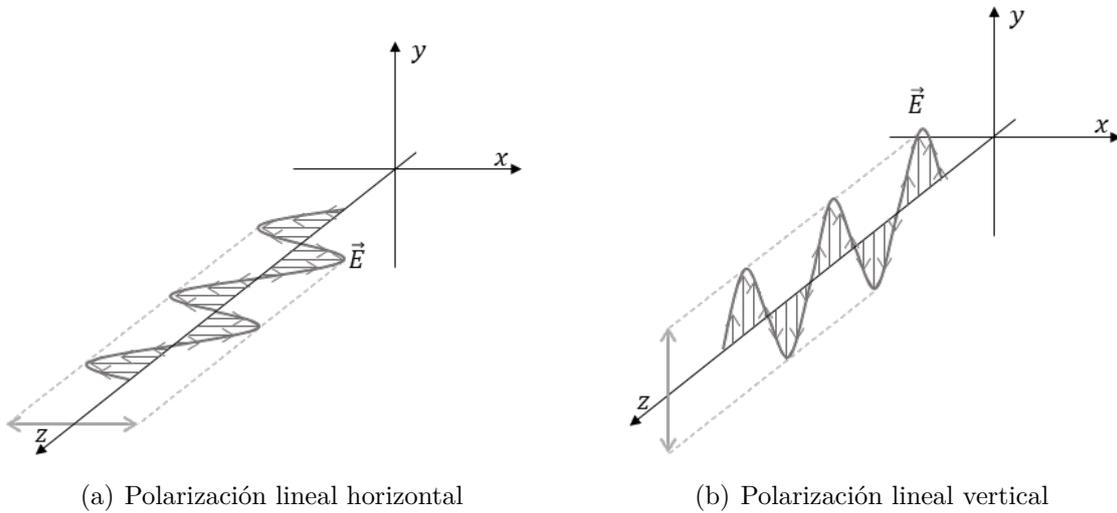


Figura 2.3: Polarización lineal

En las figuras **(2.3(a))** y **(2.3(b))** se puede observar la representación gráfica de cada una de las polarizaciones.

La otra forma para que se dé este tipo de polarización es teniendo un campo eléctrico formado por ambas componentes  $E_x$  y  $E_y$  pero con una diferencia de fase entre ellas de  $180^\circ$  ( $\pi$  radianes) o cualquier múltiplo entero del mismo, es decir,

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y = n\pi, \quad \text{donde } n = 1, 2, 3\dots \quad (2.27)$$

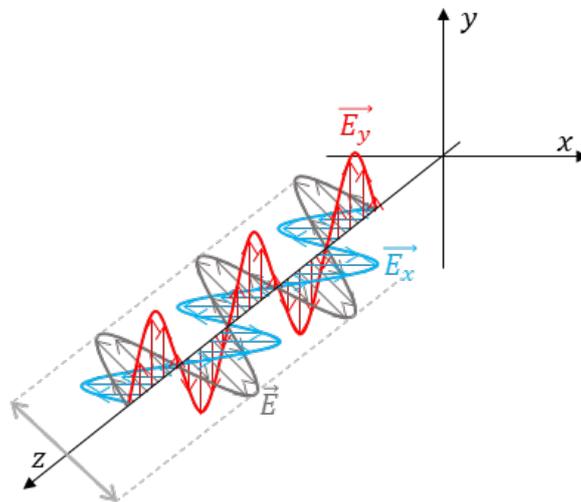


Figura 2.4: Polarización lineal formada por ambas componentes

Esto ocurre porque, tal y como se observa en la **Figura 2.4** al tener un desfase de  $180^\circ$  se conseguirá un campo resultante final lineal.

## 2.2.2. Polarización circular

El vector de campo eléctrico de una onda polarizada circularmente se propaga a lo largo de una circunferencia en la dirección del eje  $z$ , es decir, en el plano  $XY$  el campo eléctrico rotará según va variando el tiempo. [2]

La polarización circular puede darse de dos formas dependiendo del sentido del giro que siga el campo. Estos tipos de polarización son: polarización circular a derechas (*RHCP*, Right-Hand Circular Polarization) cuando la rotación se hace en el sentido de las agujas del reloj, o polarización circular a izquierdas (*LHCP*, Left-Hand Circular Polarization) cuando la rotación se hace en sentido contrario a las agujas del reloj.

Para tener este tipo de polarización necesitamos que se cumplan las siguientes condiciones:

- El campo eléctrico  $\vec{E}(z, t)$  estará formado por dos componentes lineales ortogonales  $E_x$  y  $E_y$  con la misma amplitud.

$$|E| = |E_x| = |E_y| \quad (2.28)$$

- Estas componentes deberán estar desfasadas  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  radianes) o un múltiplo impar del mismo, es decir,

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y = \left(2n + \frac{1}{2}\right)\pi, \text{ donde } n = 1, 2, 3... \quad (2.29)$$

Si este desfase es positivo, entonces será *RHCP*, por el contrario si es negativo será *LHCP*.

A continuación, se muestra la polarización circular en la **Figura 2.5**.

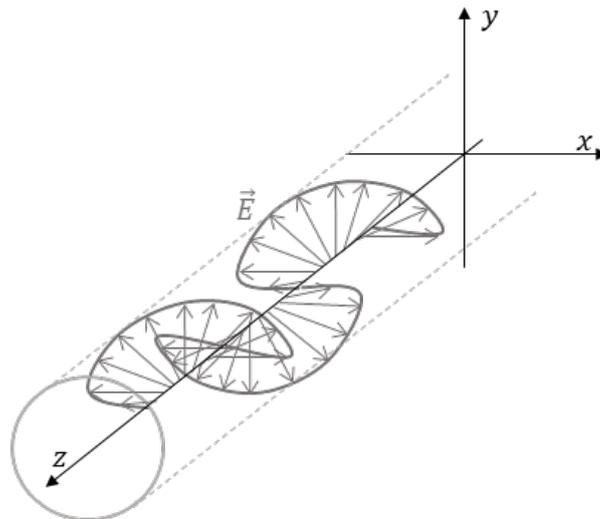


Figura 2.5: Polarización circular

### 2.2.3. Polarización elíptica

El vector de campo eléctrico que se propaga en la dirección del eje  $z$ , es decir, a lo largo del plano  $XY$ , y que no cumpla con las condiciones necesarias para que se diera una polarización lineal o una polarización circular, rotará en forma de elipse a medida que el tiempo va variando. [2]

La polarización elíptica, al igual que la polarización circular, tiene dos sentidos de giro a derechas (*RHCP*) o a izquierdas (*LHCP*), dependiendo si el campo rota en la dirección de las agujas del reloj o si lo hace en el sentido contrario.

En la **Figura 2.6** se representa la forma que seguirá un campo eléctrico  $\vec{E} = (z, t)$  si está polarizado elípticamente.

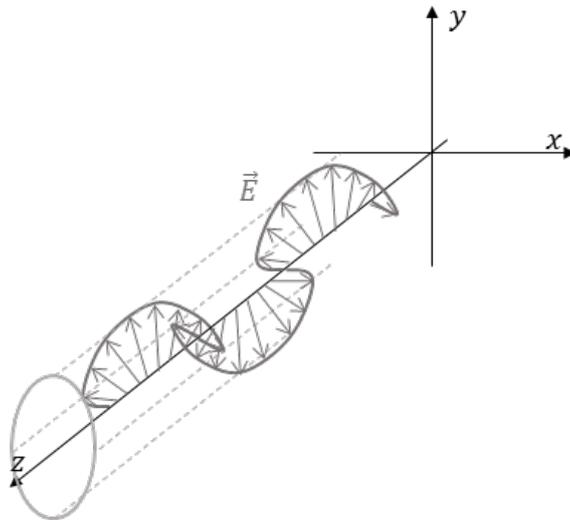


Figura 2.6: Polarización elíptica

### 2.3. Relación axial

---

La relación axial tiene la función de comprobar la pureza de la polarización de un campo eléctrico  $\vec{E} = (z, t)$  y se define como la relación entre el eje mayor y menor de la elipse de polarización (2.30). [5]

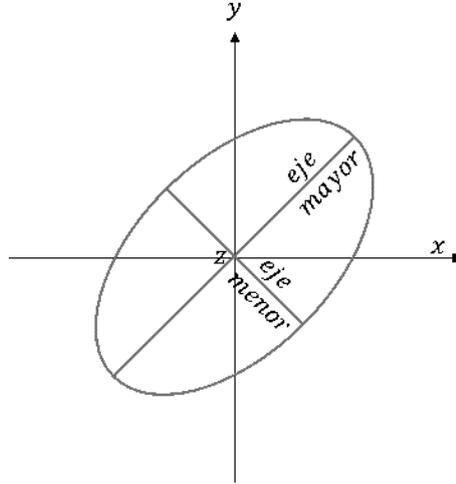


Figura 2.7: Elipse de polarización

$$AR = \frac{\text{Eje mayor}}{\text{Eje menor}} \quad (2.30)$$

El valor que tiene este parámetro puede variar entre  $1 \leq AR \leq \infty$ , dependiendo del valor que adquiera, nos indicará el tipo de polarización de nuestro campo.

- Si se trata de una polarización lineal, el valor de la relación axial será  $AR = \infty$ .
- Si nos encontramos con una polarización circular, el valor de la relación axial será  $AR = 1$ .
- Finalmente, si se trata de una polarización elíptica, el valor de la relación axial variará entre  $1 < AR < \infty$ .

Otra forma de calcular la relación axial, y la que se ha utilizado en este trabajo, es utilizando las componentes vertical y horizontal del campo eléctrico a derechas y a izquierdas.

$$E_{RHCP}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_x(x, y, z) - jE_y(x, y, z)) e^{-j\phi}, \quad (2.31)$$

$$E_{LHCP}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_x(x, y, z) + jE_y(x, y, z)) e^{j\phi}, \quad (2.32)$$

donde  $E_x$  y  $E_y$  se refieren a las componentes horizontal y vertical del campo eléctrico  $\vec{E} = (z, t)$  respectivamente, y  $\phi$  es el desfase que tenemos entre ambas componentes.

$$\phi = \frac{E_y}{E_x} \quad (2.33)$$

Por lo que la relación axial quedaría definida como **(2.34)**.

$$AR(x, y, z) = \left| \frac{|E_{RHCP}(x, y, z)| + |E_{LHCP}(x, y, z)|}{|E_{RHCP}(x, y, z)| - |E_{LHCP}(x, y, z)|} \right| \quad (2.34)$$

# 3

## Diseño

### 3.1. Introducción

---

Se expondrán los conceptos más importantes del diseño del polarizador, explicando únicamente las dimensiones de la guía, el corte que se le realizará a la guía y cómo se van a iterar esos cortes para conseguir el objetivo. El resto del diseño del polarizador se mostrará en el Capítulo 4: Desarrollo.

Para conseguir el desfase de  $90^\circ$  se tendrá que realizar una serie de cortes o modificaciones sobre el dispositivo, a estos cortes se los conoce como corrugaciones. La función de las corrugaciones será el desfasar de forma gradual un modo ( $TE_{10}^S$ ) con respecto al otro ( $TE_{10}^A$ ) con el fin de conseguir el desfase con la mejor adaptación posible y sin tener transmisión de potencias entre ambos modos. Este esquema ya ha sido utilizado para otros modelos de guía de onda, como en la guía de onda rectangular [6], por lo que uno de los objetivos del trabajo será comprobar si este tipo de diseño se puede utilizar en la implementación de un polarizador en guía de onda triangular equilátera. Anteriormente, se han utilizado otros métodos como el que desarrollaron Björn Deutschmann y Arne F. Jacob en "Broadband Septum Polarizer With Triangular Common Port"[7].

En este capítulo, se va a explicar cómo se planteó la elección del corte necesario para las corrugaciones y las dimensiones que tendrán tanto la guía como las corrugaciones. Así mismo, se expondrá cómo se van a disponer las corrugaciones y cómo se van a unir las mismas con la guía de onda de la entrada.

### 3.2. Dimensiones de la guía de entrada

---

Se trabajará con una frecuencia de corte para los modos fundamentales ( $TE_{10}^S$  y  $TE_{10}^A$ ) de  $f_c = 20$  GHz y con un ancho de banda comprendido dentro del rango de frecuencias de  $f_{min} = 22$  GHz y  $f_{max} = 34$  GHz, con una frecuencia central de  $f_0 = 28$  GHz.

Las dimensiones de la guía de onda deberán elegirse para que cumplan **(3.1)** y de esta forma asegurar que se está trabajando en un ancho de banda monomodo, es decir, que la onda se propagará en los modos fundamentales y no en ningún otro modo de orden superior.

$$f_{c,TE_{10}^S/TE_{10}^A} < f_{min} \quad f_{c,TE_{11}^S/TM_{11}^S} > f_{max}, \quad (3.1)$$

donde  $TE_{10}^S$  y  $TE_{10}^A$  son los modos fundamentales de la guía de onda triangular, y  $TE_{11}^S$  y  $TM_{11}^S$  son los primeros modos de orden superior.

Con la formulación que se mostró en **(2.13)** y en **(2.14)** se puede calcular el lado del triángulo equilátero de la guía de onda que formará parte del polarizador.

$$e = \frac{4\pi \sqrt{m^2 + n^2 + mn}}{3 k_c} = 0,01 [m] \quad (3.2)$$

Por lo tanto, si se utiliza una longitud de 10 [mm] para el lado del triángulo, quedaría comprobado que la frecuencia de corte de los modos fundamentales  $TE_{10}^S$  y  $TE_{10}^A$  estará en 20 [GHz], inferior a los 22 [GHz] que se establecieron de frecuencia mínima. Y la frecuencia de corte de los primeros modos superiores  $TE_{11}^S$  y  $TM_{11}^S$  será de 34,641 [GHz], siendo mayor que la frecuencia máxima establecida de 34 [GHz]. Con esto queda demostrado que se trabajará en un ancho de banda monomodo.

Partiendo del supuesto de que la guía de onda con la que se va a trabajar no tiene pérdidas, los puertos de entrada tendrán una longitud de  $l_{puerto} = 6 [mm]$ .

### 3.3. Elección del corte para la corrugación

---

En primer momento, se plantearon diferentes tipos de corte que se podrían hacer sobre las corrugaciones de la guía de onda triangular para conseguir desfase un modo con respecto al otro. La idea era elegir el corte que mayor desfase proporcionase sin deteriorar la adaptación de los modos, o si esto no era realizable, que la variación en la adaptación fuera lo menor posible para poder solucionarlo posteriormente con la ayuda de un adaptador si fuera necesario. También habrá que fijarse en la transmisión de potencias.

A continuación, se van a exponer los cortes que se pensaron y los resultados que se obtuvieron al simular cada uno de ellos. Finalmente, se explicará el corte elegido.

#### 3.3.1. Corte de una porción del lado del triángulo

Estos modelos de corte (**Figura 3.1**) se descartaron porque, no sólo el desfase conseguido entre ambos modos era muy bajo, sino que la adaptación que se conseguía con este tipo de cortes era muy mala.

El desfase entre modos conseguido por cada corrugación para el primer modelo, estaba entre los 4° y los 10° (0,0698 rad y 0,1745 rad) y la adaptación conseguida con cada corrugación rondaba los 17 dB para el modo  $TE_{10}$  simétrico y en el rango de los 13 dB para el modo  $TE_{10}$  asimétrico. Cabe recalcar que la adaptación es algo que empeorará a

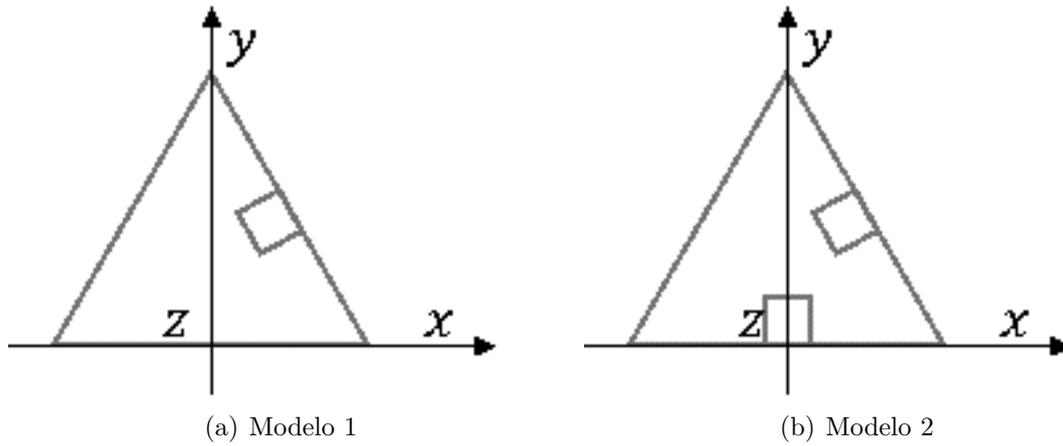


Figura 3.1: Vista frontal del corte planteado para las corrugaciones

medida que se vaya aumentando el número de corrugaciones que sufrirá la guía de onda triangular, por lo que interesa que en este primer paso la adaptación de impedancias alcanzada sea buena.

En el caso del segundo modelo, los resultados empeoraron, consiguiendo una adaptación para el modo  $TE_{10}$  simétrico en el rango de los 6 dB y alrededor de los 11 dB para el modo  $TE_{10}$  asimétrico. El desfase conseguido entre ambos modos estaba entre los  $5^\circ$  y los  $18^\circ$  (0,0873 rad y 0,3142 rad).

En el Anexo A se pueden observar los resultados obtenidos en la simulación de ambos modelos.

### 3.3.2. Corrugación formada por un triángulo de menor lado

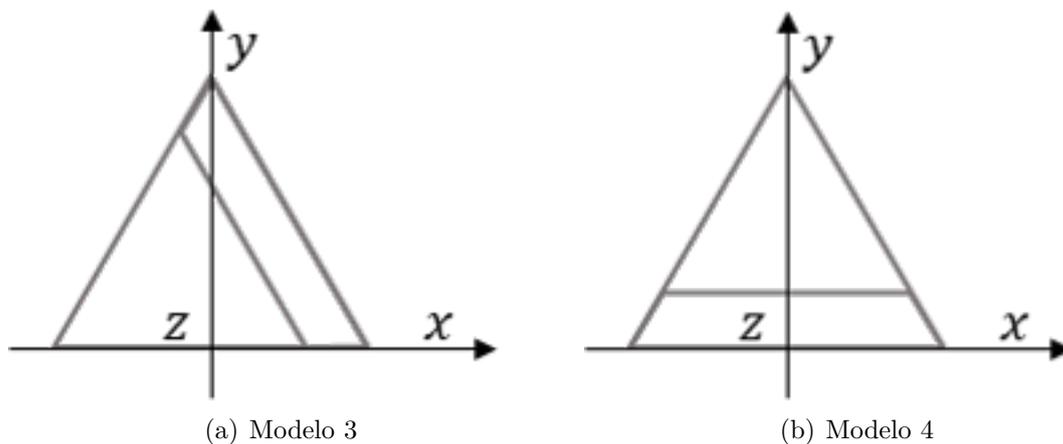


Figura 3.2: Vista frontal del corte planteado para las corrugaciones

El modelo 3, representado en la **Figura 3.2(a)**, se descartó debido a que el desfase conseguido no mejoró notablemente con respecto a los modelos anteriores, obteniendo valores comprendidos entre los  $6^\circ$  y los  $16^\circ$  (0,1047 rad y 0,2793 rad). Por otro lado, la adaptación conseguida con este modelo de corrugación fue mejor que en los modelos

analizados hasta ahora, con una adaptación superior a los 10 dB desde los 27 GHz para su modo  $TE_{10}$  simétrico, y a partir de los 25 GHz, aproximadamente, para su modo  $TE_{10}$  asimétrico.

Al analizar el modelo 4, se observó que podría tener grandes ventajas para la realización del polarizador. Estas ventajas se observaban en el amplio desfase que se conseguía con una sola corrugación, de hasta  $30^\circ$  (0,5236 rad). Se prefirió no priorizar la adaptación a la hora de elegir el modelo de corrugación, ya que es algo que podríamos buscarle una solución a posteriori haciendo uso de un dispositivo adaptador de potencias.

Los resultados obtenidos de la simulación con CST de estos modelos, pueden observarse en Anexo A.

### 3.4. Sección del polarizador

---

Como ya se adelantó anteriormente, para conseguir el desfase deseado de  $90^\circ$  se va a utilizar una serie de corrugaciones que estarán conectadas en cascada como se muestra en la **Figura 3.3**.

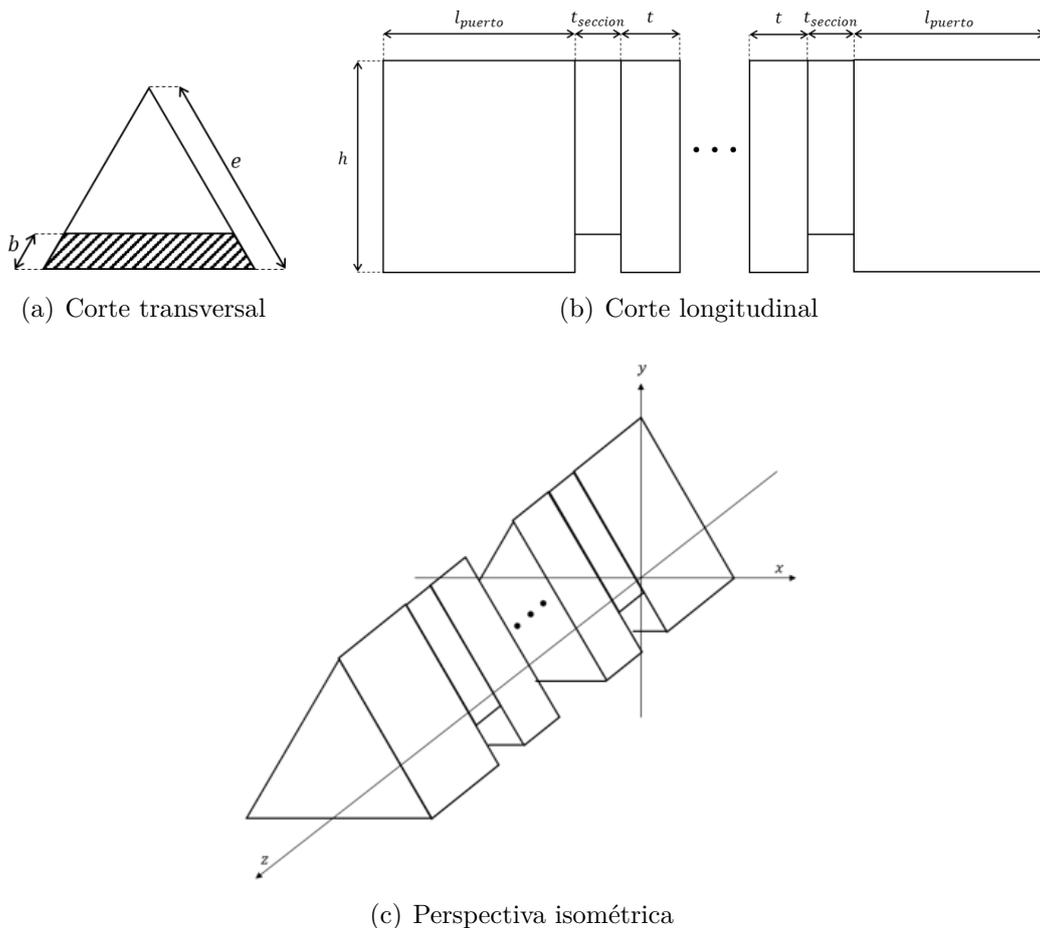


Figura 3.3: Sección del polarizador

Para simular el comportamiento de cada corrugación, se trabajará con las matrices ABCD de cada sección de la guía de onda. La matriz ABCD de la corrugación se obtendrá a partir de la matriz S extraída de la simulación realizada para una corrugación en CST y se iterará todas las veces que sea necesario para obtener el desfase deseado.

El paso de matriz S a matriz ABCD se realiza según **(3.3)**. [2]

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2 S_{21}} & Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2 S_{21}} \\ \frac{1}{Z_0} \frac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2 S_{21}} & \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2 S_{21}} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

donde  $Z_0$  representa la impedancia característica normalizada, por lo que su valor será  $1[\Omega]$ .

La matriz ABCD de la sección situada entre cada corrugación, se corresponde con la matriz ABCD de una línea de transmisión, es decir, [8]

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{tx} = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_0 \sinh(\gamma d) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma d) & \cosh(\gamma d) \end{pmatrix}_{tx} \quad (3.4)$$

donde  $\gamma$  es la constante de propagación,  $Z_0$  la impedancia característica normalizada (valor igual a  $1[\Omega]$ ), y la  $d$  es la longitud de la línea de transmisión, que según lo acordado en la **Figura 3.3**  $d = t$ .

Se están usando las matrices ABCD debido a que, cuando unos elementos están conectados en cascada, la matriz ABCD total correspondiente al conjunto de elementos, es igual al producto de las matrices ABCD de cada uno de ellos. Esto se realizará para cada modo de forma independiente, es decir, primero se calculará la matriz ABCD del modo vertical ( $TE_{10}^A$ ) y después la matriz ABCD del modo horizontal ( $TE_{10}^S$ ) **Figura 2.2**.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{tot} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{tx} \cdots \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{N-1} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{tx} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_N \quad (3.5)$$

Finalmente, una vez calculada la matriz ABCD final para cada modo, se obtendrá la matriz S de las mismas para comprobar que el desfase obtenido entre ambas es el deseado, que la adaptación de impedancias es buena y que no existe transmisión de potencias entre ambos modos.

Para obtener los parámetros S a partir de la matriz ABCD usaremos **(3.6)**. [2]

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 - D}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} & \frac{2(AD - BC)}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \\ \frac{2}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} & \frac{-A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 + D}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

El desfase se calculará como la fase del cociente entre el parámetro  $S_{21}$  del modo vertical ( $TE_{10}^A$ ) y el  $S_{21}$  del modo horizontal ( $TE_{10}^S$ ) **Figura 2.2**.

$$\Delta\varphi = \varphi \left( \frac{S_{21}^{TE_{10}^A}}{S_{21}^{TE_{10}^S}} \right) \quad (3.7)$$

En el Capítulo 4: Desarrollo se explicará en detalle el resultado obtenido de cada uno de los pasos que se han indicado a lo largo de este capítulo.

# 4

## Desarrollo

### 4.1. Introducción

---

El objetivo de este capítulo será explicar el desarrollo del polarizador, los problemas que se encontraron a la hora de implementar los pasos que se mencionaron en el Capítulo 3: Diseño, las soluciones propuestas a estos problemas, y el diseño final del polarizador.

### 4.2. Determinación del número de corrugaciones

---

Antes de empezar a calcular el número de corrugaciones que serán necesarias para conseguir los objetivos, se deben establecer una serie de parámetros del polarizador.

#### 4.2.1. Dimensiones y especificaciones del polarizador

Se partirá de las medidas y las especificaciones indicadas en el capítulo anterior y que están resumidas en la **Tabla 4.1**.

Parámetro	$e$	$l_{puerto}$	$f_{min}$	$f_{max}$	$f_c$
Valor	10 [mm]	6 [mm]	22 [GHz]	34 [GHz]	20 [GHz]

Tabla 4.1: Dimensiones y especificaciones del polarizador

Lo primero que se realizó, fue un estudio para establecer la profundidad que debe tener el corte para que el resultado sea lo mejor posible. Para ello, habrá que variar tres valores: el corte de la guía ( $b$ ), la profundidad de cada corrugación ( $t_{seccion}$ ), y la profundidad de cada línea de transmisión que separa las corrugaciones ( $t$ ). Estas dimensiones pueden observarse en la **Figura 3.3(a)** y en la **Figura 3.3(b)**.

El primer valor que se va a calcular será el corte de la guía, fijando una profundidad de  $t = 1$  [mm] para cada corrugación.

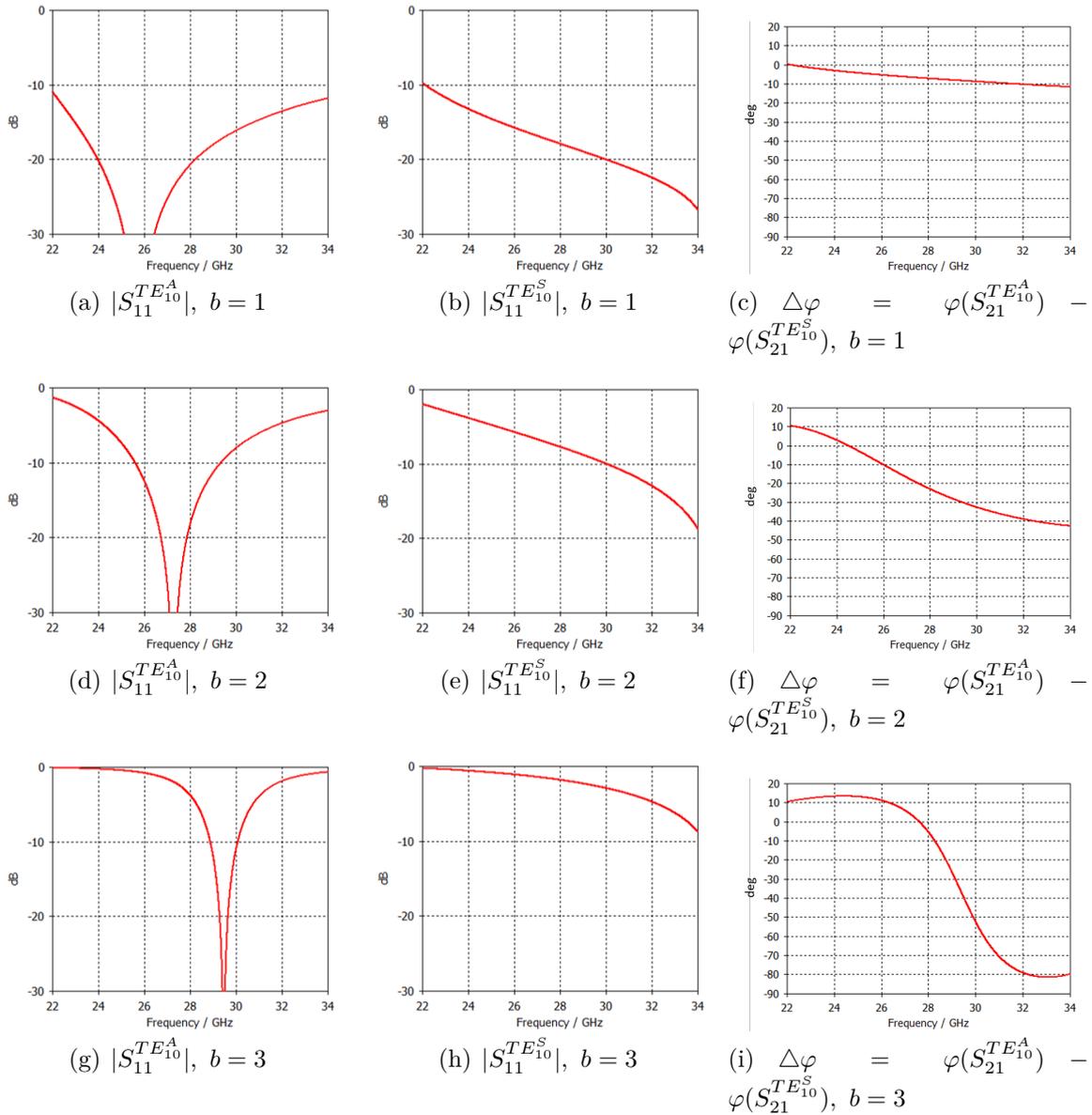


Figura 4.1: Comportamiento de una corrugación para distintos valores de  $b$

Como se puede observar en la **Figura 4.1** con un valor fijo de  $t_{seccion}$ , cuanto mayor sea  $b$  se conseguirá un mayor desfase entre modos por cada corrugación que se añada en el dispositivo. En cambio, la adaptación de impedancias empeora a medida que  $b$  crece. Debido a esto, se decidió escoger un valor de  $b = 2[mm]$  para tener un desfase alto, y no perder toda la adaptación de impedancias.

Una vez se ha fijado el valor del corte de la guía, se tendrá que establecer el valor para la profundidad de cada corrugación. Para ello, se utilizará un método similar al realizado para obtener  $b$ , siendo ahora  $t_{seccion}$  el valor que se variará, y  $b$  el valor fijo.

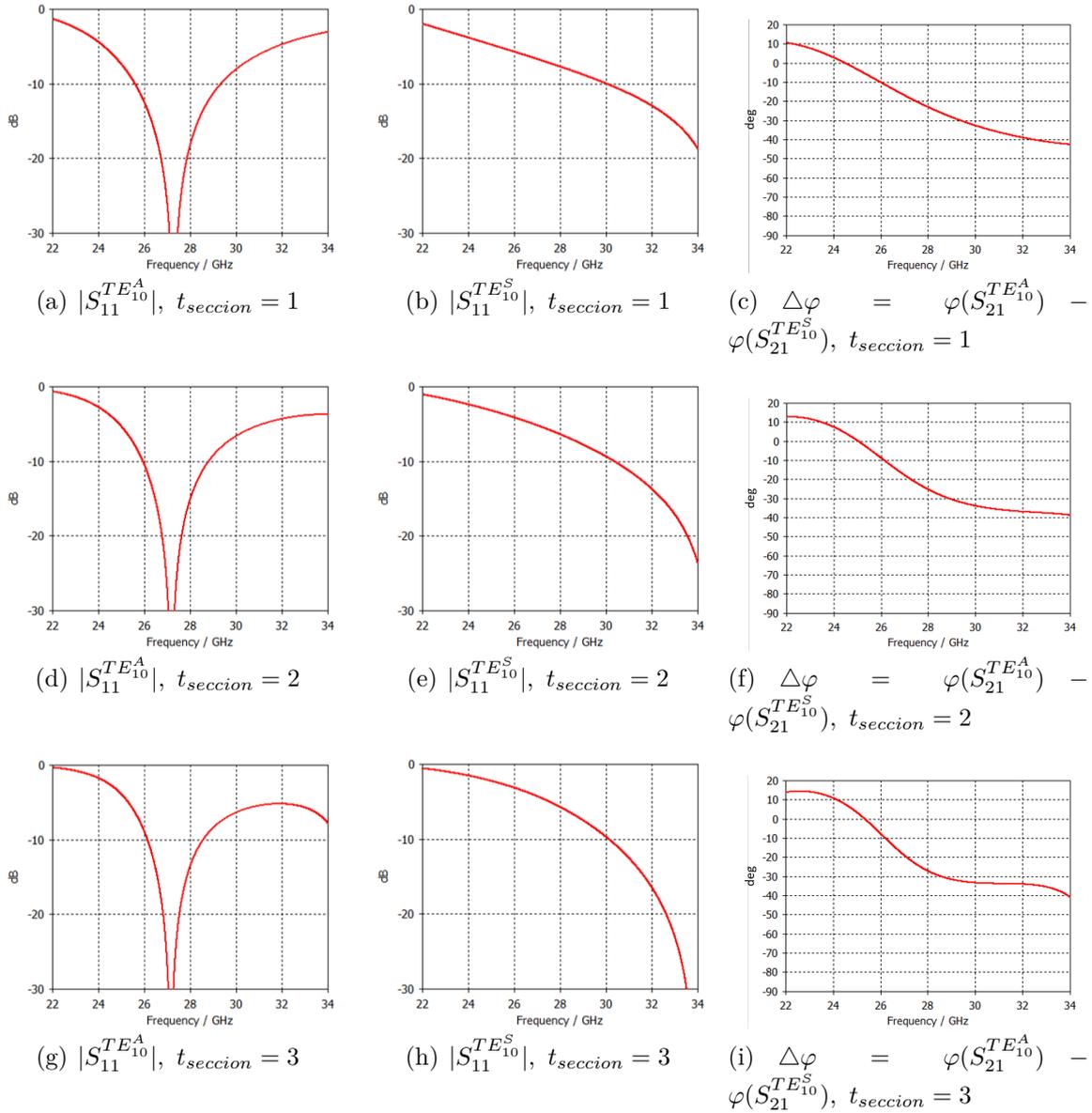


Figura 4.2: Comportamiento de una corrugación para distintos valores de  $t_{seccion}$

Tal y como se muestra en la **Figura 4.2** cuanto mayor es  $t$  mayor será su desfase y peor será su adaptación. Se decidió utilizar  $t_{seccion} = 1[mm]$  ya que, la diferencia en el desfase no es elevada, y se quería mantener la mejor adaptación posible.

Finalmente, se calculará la profundidad de cada línea de transmisión situadas como separadores de las corrugaciones. Para ello, se simulará la guía de onda con dos corrugaciones de las medidas calculadas anteriormente, es decir,  $b = 2 [mm]$  y  $t_{seccion} = 1 [mm]$ , y se irá variando el valor de  $t$  con el fin de observar cuál es la mejor medida para conseguir los objetivos del trabajo.

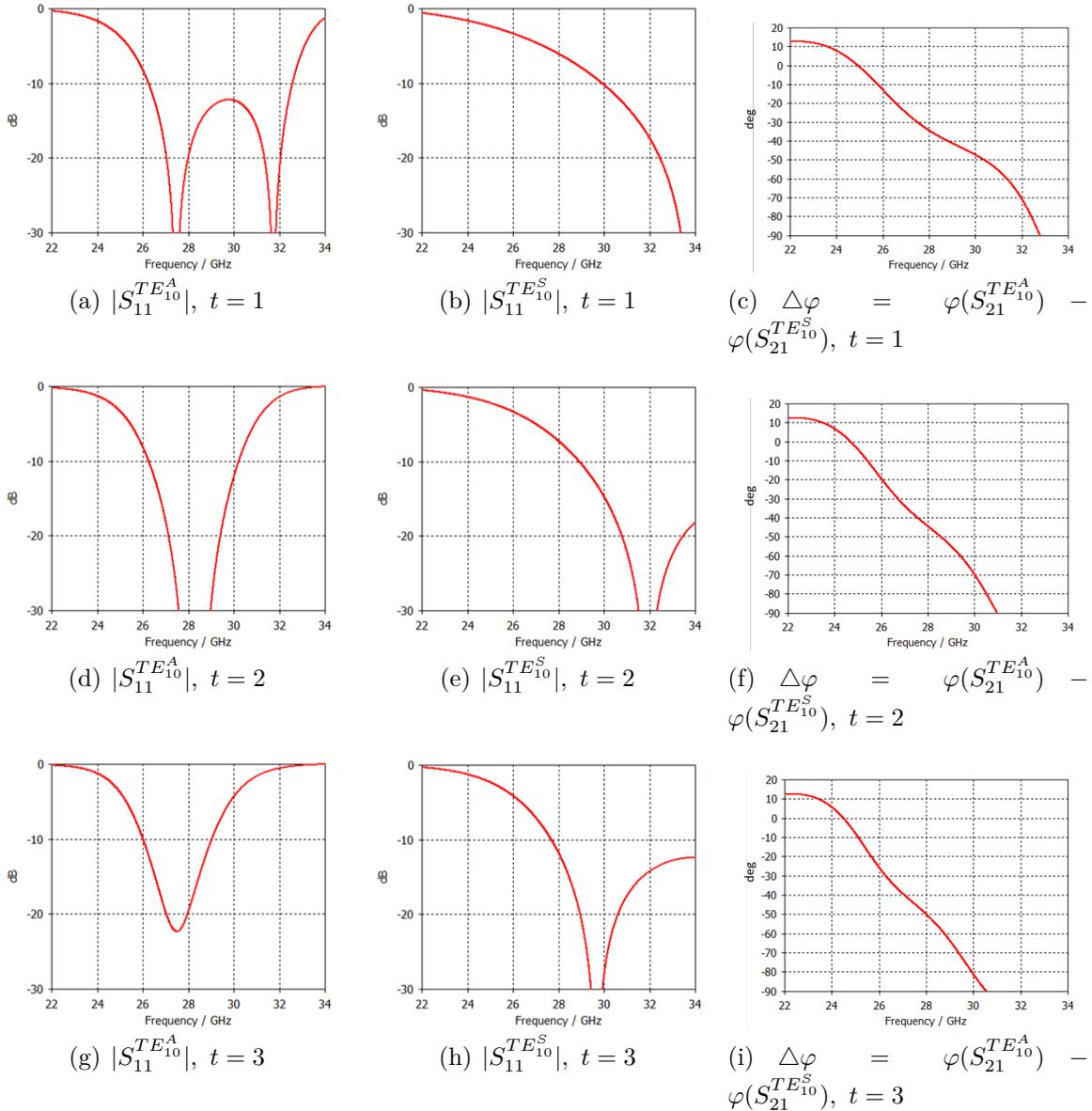


Figura 4.3: Comportamiento de dos corrugaciones para distintos valores de  $t$

Observando la **Figura 4.3** se llega a la conclusión de que cuanto mayor sea  $t$ , peor será la adaptación de impedancias. Por lo tanto, para conseguir una mejor adaptación de impedancias, se decidió utilizar  $t = 1 [mm]$ .

Los datos finales obtenidos a lo largo de este apartado quedan recogidos en la **Tabla 4.2**.

Parámetro	Valor [mm]
$b$	2
$t_{seccion}$	1
$t$	1

Tabla 4.2: Dimensiones de las corrugaciones del polarizador

### 4.2.2. Número de corrugaciones

Como ya se adelantó anteriormente, para calcular el número de corrugaciones se simulará la conexión en cascada de las corrugaciones con las líneas de transmisión. Para ello, se utilizó un programa en Matlab para facilitar el proceso, a continuación se mostrarán los resultados obtenidos y la conclusión de los mismos.

Se hicieron dos simulaciones con diferentes valores de  $N$ , donde  $N$  se refiere al número de corrugaciones. Tal y como se muestra en la **Figura 4.4**, se llegó a la conclusión de que con este tipo de corte no se llegará a cumplir las especificaciones necesarias para tener la función de polarizador.

En estas gráficas se pueden observar los diferentes desfases entre los modos  $TE_{10}^S$  y  $TE_{10}^A$  según el número de corrugaciones que tenga el polarizador. También se puede observar que a partir de un número de corrugaciones el desfase pasa a ser positivo, esto se debe al funcionamiento interno de la función angle de Matlab que truncará el valor a su rango sumando o restando un número de vueltas múltiplo de  $2\pi$ .

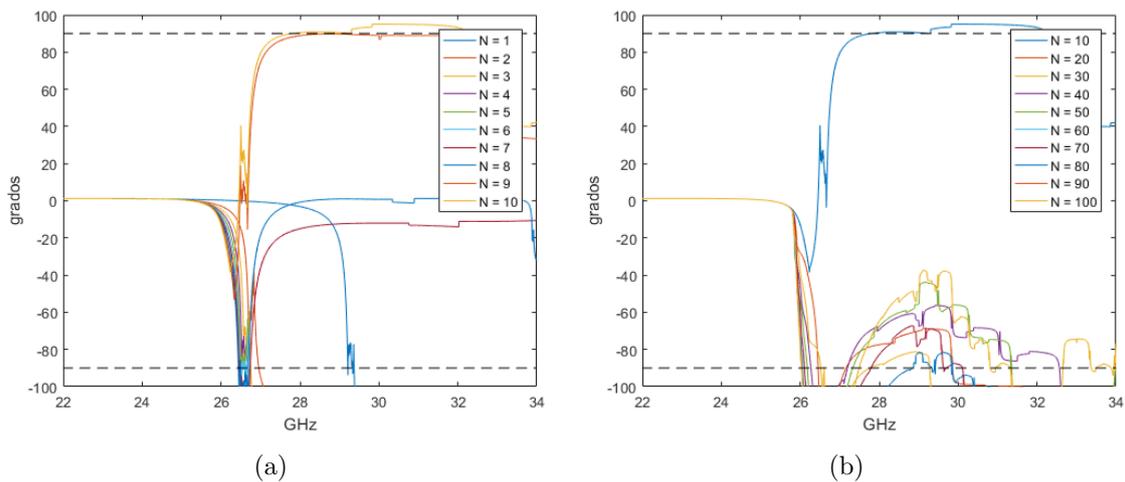


Figura 4.4: Comportamiento del polarizador para diferente número de corrugaciones

Llegados a este punto, se planteó un nuevo tipo de corte a la guía, para comprobar si con el nuevo diseño se podrían alcanzar los requerimientos necesarios que proporcionarían a la guía de onda las funciones de polarizador.

### 4.3. Nuevo diseño de la corrugación

---

Tal y como se comentó en la sección anterior, queda descartado el modelo representado en la **Figura 3.2(b)** y se empezará a diseñar el polarizador para un nuevo modelo.

En un primer momento, se planteó modificar el corte ya realizado de tal forma que el paso entre una corrugación y la línea de transmisión siguiente no fuera tan brusco, es decir, la idea era suavizar los cortes. Para ello, se pensó que un buen diseño podría ser el mostrado en la **Figura 4.5**.

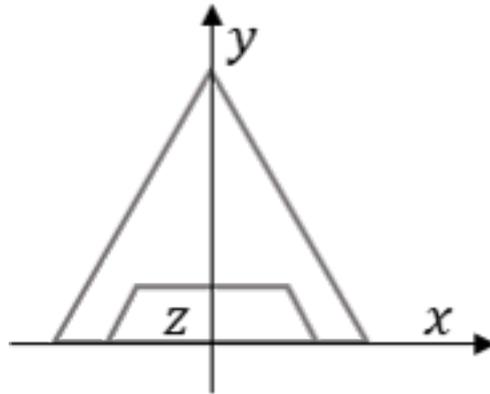


Figura 4.5: Vista frontal del nuevo corte planteado para las corrugaciones

La simulación correspondiente a una única corrugación en CST para observar el comportamiento que tendrá, se puede consultar en el anexo A. Si se mira la **Figura A.18** y la **Figura A.19** se puede comprobar que la adaptación de impedancias es mejor en el modo horizontal, que en el modo vertical (**Figura 2.2**). En cambio, el desfase que se puede conseguir entre ambos modos (**Figura A.20**) es superior al planteado con otros modelos estudiados anteriormente, por lo que se esperan unos mejores resultados.

#### 4.3.1. Dimensiones del polarizador

Las dimensiones de la guía, continuarán con el mismo tamaño indicado hasta ahora, es decir,  $e = 10 [mm]$  y se corresponde con el lado del triángulo equilátero que formará nuestra guía de onda, y  $l_{puerto} = 6 [mm]$  que se corresponderá con la longitud del puerto.

En cambio, las dimensiones del polarizador serán diferentes a las calculadas en el modelo anterior, por lo que se tendrá que volver a calcular el valor adecuado para  $b$ ,  $t$ ,  $t_{seccion}$  y para un nuevo parámetro que se introducirá con este modelo,  $x$ . La sección del polarizador, con los parámetros que se van a utilizar, se muestra en la **Figura 4.6**

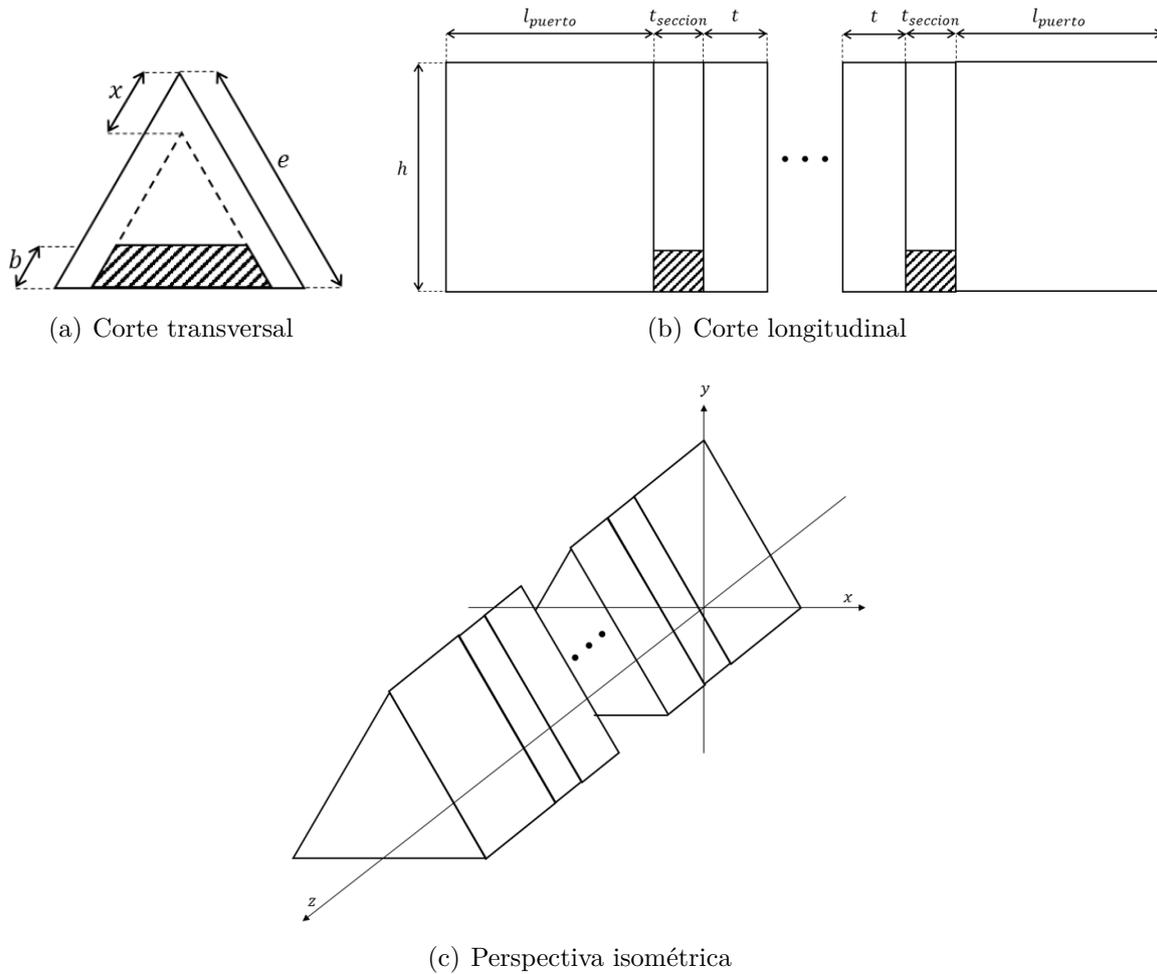


Figura 4.6: Sección del polarizador

Al igual que en el anterior modelo, lo que primero se hizo fue una serie de simulaciones para calcular el corte de la guía, es decir,  $b$ . Para ello, se estableció un valor fijo de la profundidad de cada corrugación ( $t = 1 [mm]$ ) y de la diferencia de alturas entre el triángulo principal de la guía de onda y el triángulo imaginario que formará el corte de la corrugación ( $x = 1 [mm]$ ).

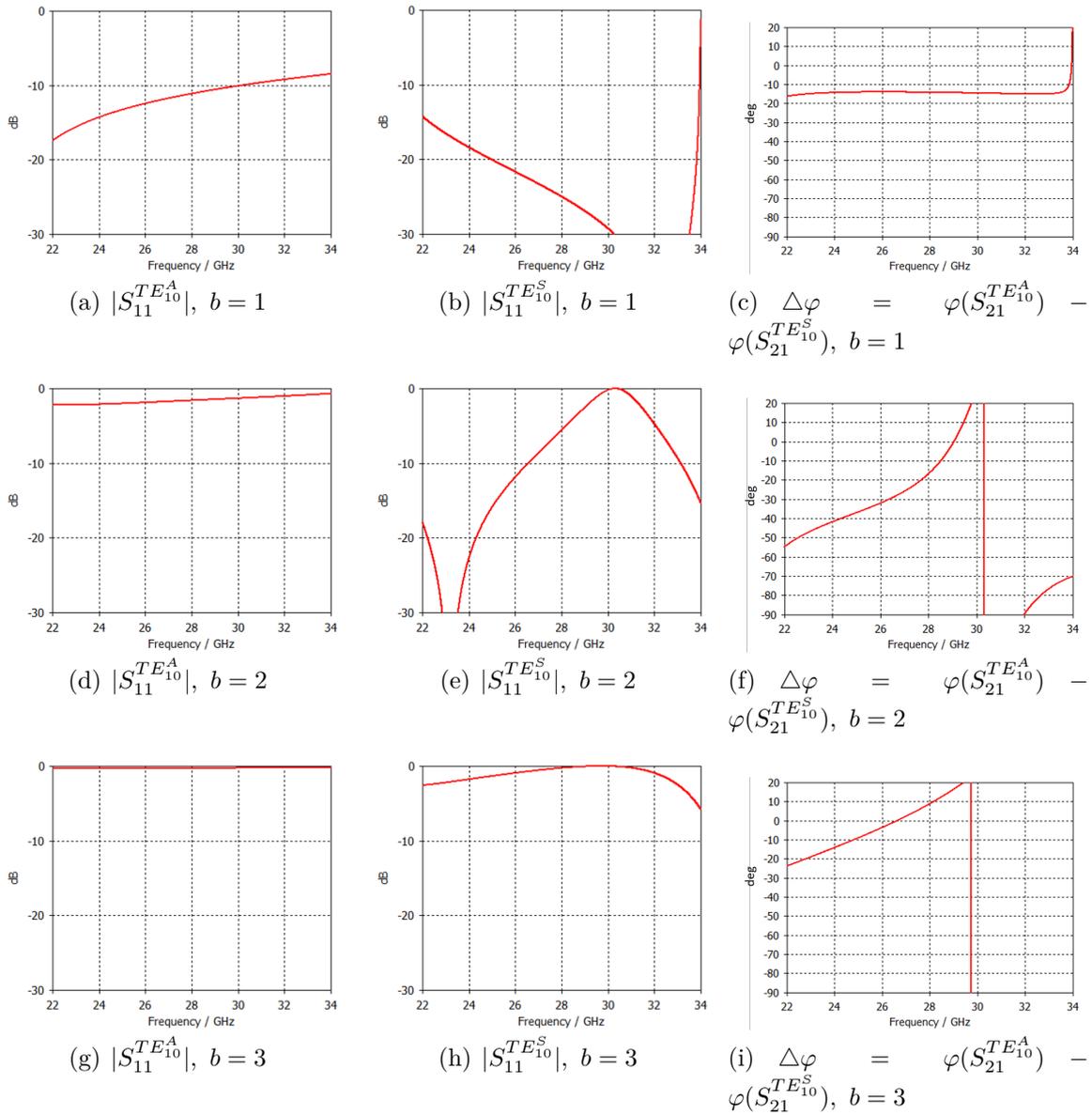


Figura 4.7: Comportamiento de una corrugación para distintos valores de  $b$

Como se puede observar en la **Figura 4.7**, con un valor fijo de  $t$  y de  $x$ , a medida que aumenta el valor de  $b$  el desfase aumenta, pero la adaptación de impedancias empeora gravemente. Por lo tanto, la mejor opción para no perder la adaptación de impedancias será utilizar  $b = 1$  [mm].

A continuación se pasará a calcular el valor de la diferencia de alturas, es decir,  $x$ . Para ello, se fijará el valor de  $t = 1$  [mm] y se usará el valor obtenido anteriormente para el corte de la guía  $b = 1$  [mm].

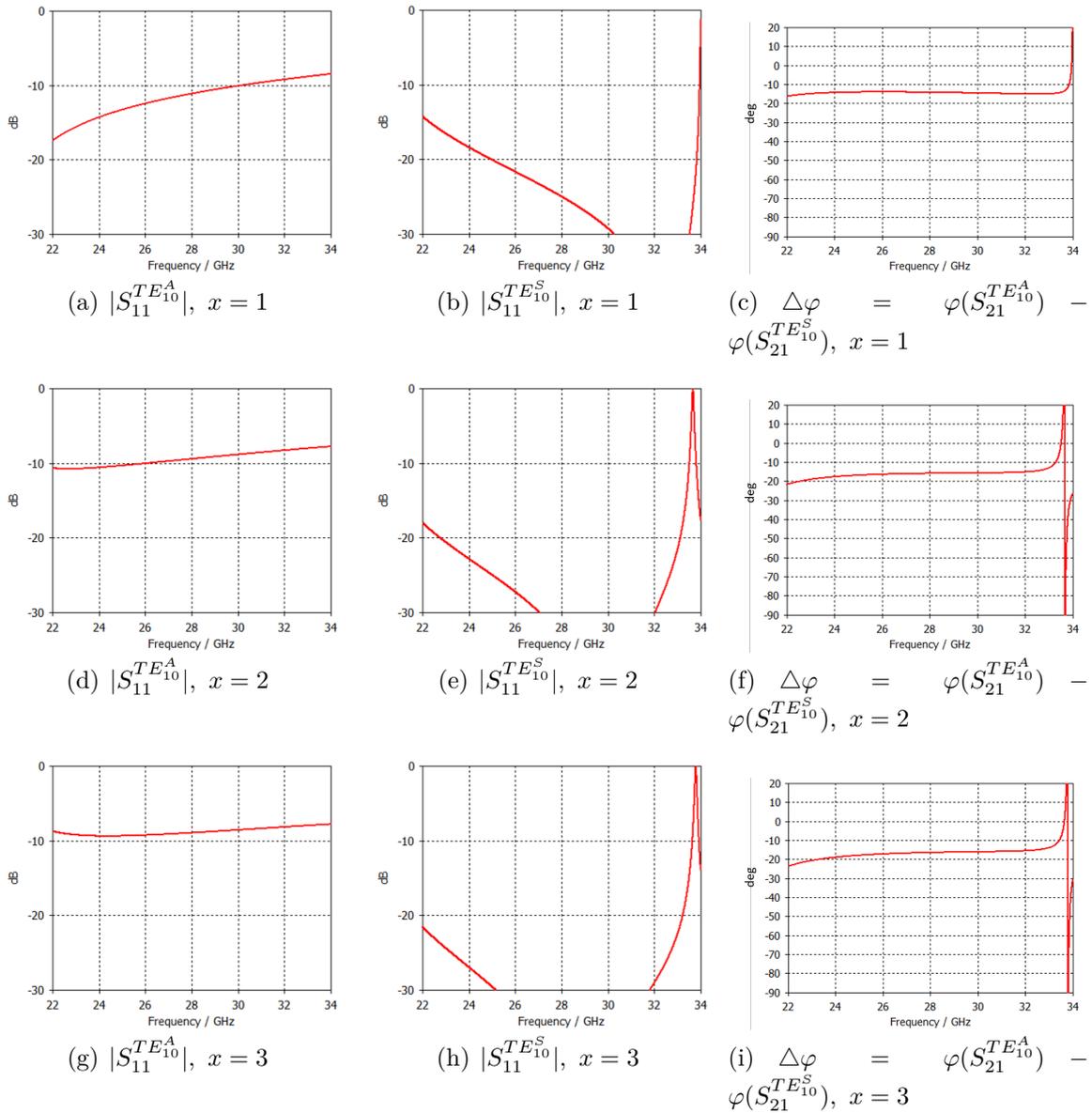


Figura 4.8: Comportamiento de una corrugación para distintos valores de  $x$

En la **Figura 4.8** se puede observar que el valor de  $x$  no interfiere mucho en los resultados obtenidos, tanto en términos de adaptación de impedancias como en el desfase entre ambos modos, por lo que se llega a la conclusión de utilizar un valor intermedio  $x = 2$  [mm].

Una vez calculados el valor para el corte de cada corrugación (b) y la diferencia de alturas entre los dos triángulos ( $x$ ), se comenzará a simular la guía de onda con el fin de conseguir el valor para la profundidad de cada corrugación ( $t_{seccion}$ ).

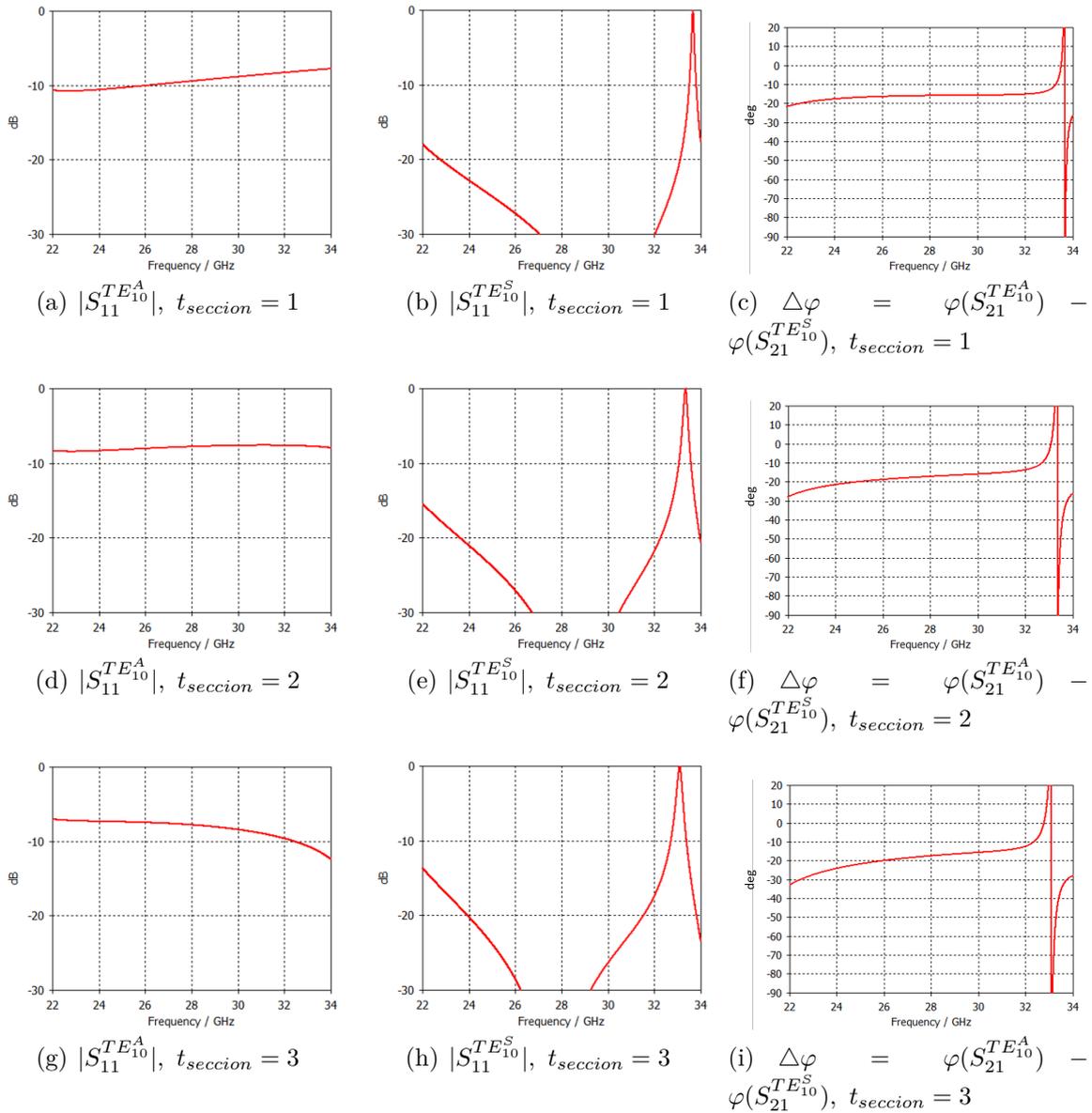


Figura 4.9: Comportamiento de una corrugación para distintos valores de  $t_{seccion}$

Tal y como se muestra en la **Figura 4.9** al aumentar el valor de  $t_{seccion}$  la adaptación de impedancias empeora y el desfase no varía mucho, por lo que se decide utilizar el valor  $t_{seccion} = 1$  [mm].

Finalmente, del mismo modo que se hizo para el anterior modelo, se pasará a calcular la profundidad de cada línea de transmisión que se colocarán entre corrugaciones. Para ello, se simulará la guía de onda con los parámetros establecidos hasta ahora, es decir,  $b = 1$  [mm],  $t_{seccion} = 1$  [mm] y  $x = 2$  [mm], y como se ha ido haciendo hasta el momento, se variará el valor de  $t$  para observar cuál es el mejor valor para conseguir un desfase de  $90^\circ$  con una adaptación razonable.

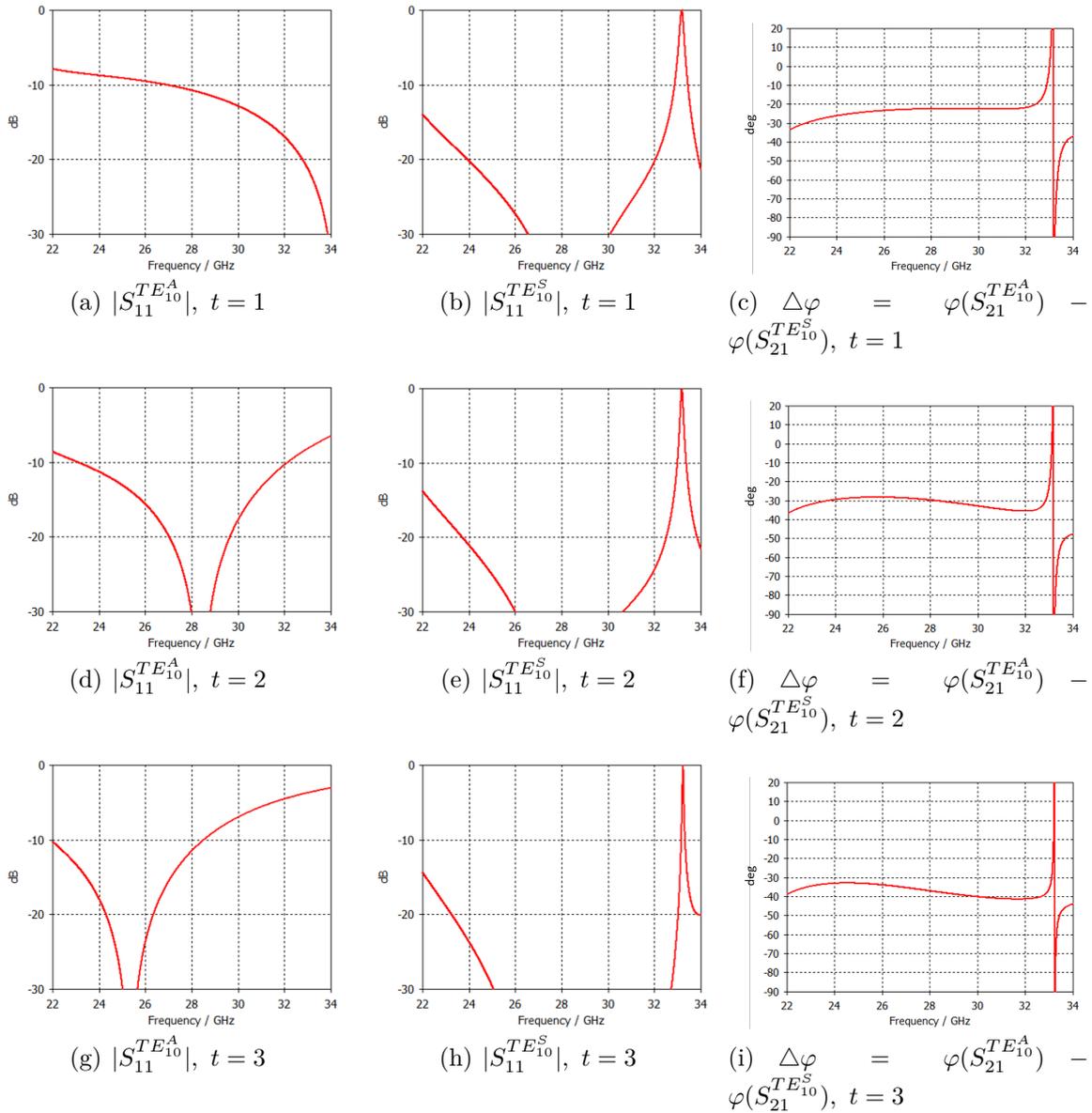


Figura 4.10: Comportamiento de una corrugación para distintos valores de  $t$

Según la **Figura 4.10** se puede observar que a mayor  $t$ , mayor será el desfase. En el caso de la adaptación de impedancias, el mejor caso para el modo vertical (**Figura 2.2**) es para  $t = 2$  [mm]. Como en el modo horizontal (**Figura 2.2**) no se aprecian grandes variaciones, se decidió utilizar este valor como el predeterminado para el diseño del polarizador. Se llega a la conclusión de que los datos que se utilizarán en la realización del polarizador serán los recogidos en la **Tabla 4.3**.

Parámetro	$b$	$x$	$t_{seccion}$	$t$	$f_c^{TE_{10}^A}$ y $f_c^{TE_{10}^S}$	$f_c^{TE_{11}^S}$ y $f_c^{TM_{11}^S}$
Valor	1 [mm]	2 [mm]	1 [mm]	2 [mm]	20 [GHz]	34, 641 [GHz]

Tabla 4.3: Dimensiones y especificaciones del polarizador final

### 4.3.2. Número de corrugaciones

Del mismo modo que se calculó el número de corrugaciones para el anterior modelo, se utilizará un programa en Matlab que vaya iterando el número de corrugaciones simulando el desfase que habría de la conexión en cascada de las corrugaciones con las líneas de transmisión.

Se realizaron dos simulaciones para diferentes valores de  $N$  (número de corrugaciones). La primera simulación fue variando  $N$  de 10 a 100 iteraciones, para visualizar el comportamiento que tendría en cada década y poder reducir el rango. La segunda simulación se acotó de 1 a 10 corrugaciones, con el fin de ampliar el rango en el que se observa un desfase aproximado a  $90^\circ$ .

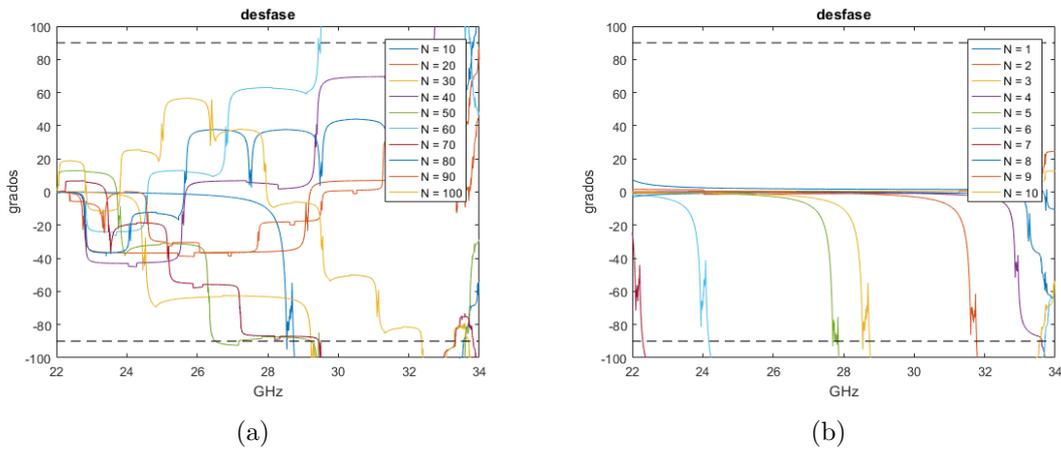


Figura 4.11: Comportamiento del polarizador para diferente número de corrugaciones

Después de observar la gráfica de la **Figura 4.11(b)** se decide simular el polarizador con  $N = 5$ . Para ello, se utilizó el programa CST Studio Suite con el fin de comprobar si se adapta a los objetivos del trabajo o no. Las simulaciones y resultados obtenidos se mostrarán en el Capítulo 5: Integración, pruebas y resultados.

# 5

## Integración, pruebas y resultados

### 5.1. Introducción

---

En este capítulo se van a mostrar los resultados de las simulaciones en CST, para comprobar los resultados obtenidos mediante la simulación del modelo circuital en Matlab y la comparativa con los resultados en CST, dirígase al anexo B.

### 5.2. Simulación en CST con 5 corrugaciones

---

Como se ha indicado en el capítulo anterior, se procederá a simular la guía de onda con las dimensiones establecidas en la **Tabla 4.3** y con  $N = 5$  tal y como se muestra en la **Figura 5.1**.

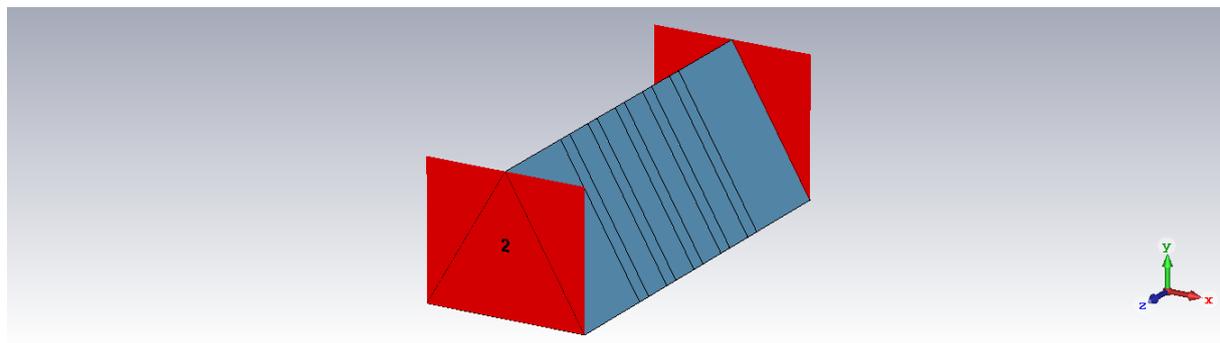
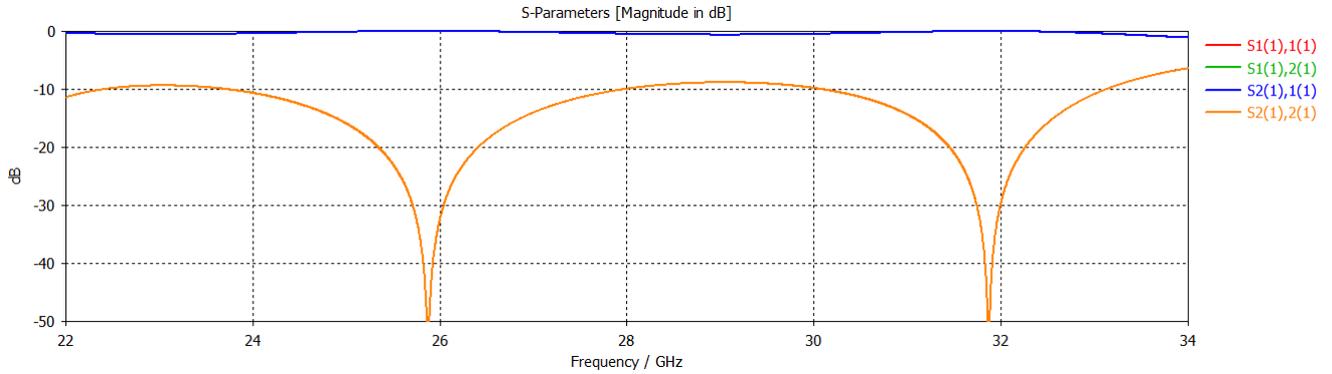


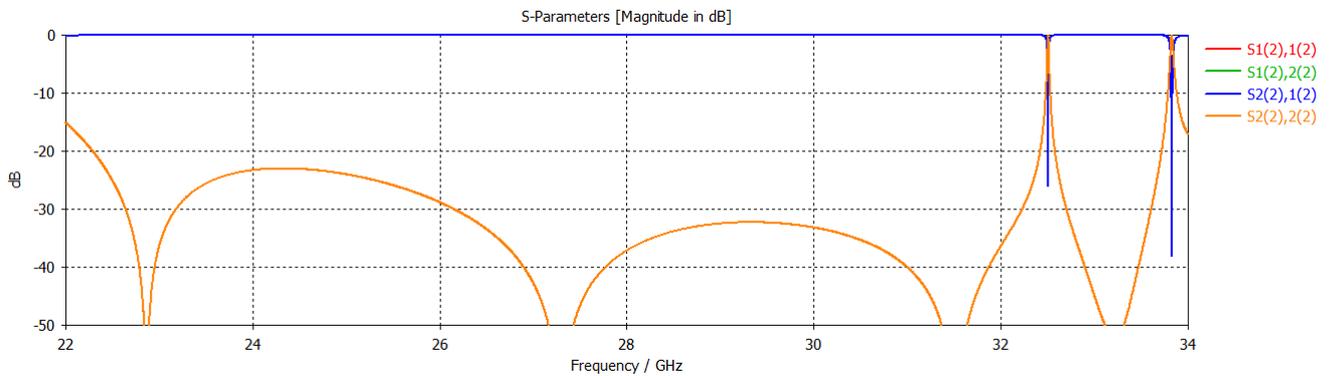
Figura 5.1: Sección canónica del polarizador con 5 corrugaciones diseñada en CST.

Una vez simulada, se pueden observar sus parámetros S representados en la **Figura 5.2**, donde se puede comprobar que la adaptación conseguida con este modelo no ha sido la deseada. No obstante, se comprobará que el desfase alcanzado (**Figura 5.3**) se

aproxima al deseado, sin llegar a alcanzar el objetivo, esto también puede comprobarse en la relación axial representada en la **Figura 5.4** donde se observa que en ningún rango del ancho de banda alcanza los 0 [dB] necesarios para conseguir una polarización circular. Es por esto que se decide ampliar con una corrugación y comprobar si, con esta corrugación adicional, se alcanza el objetivo de los 90° de desfase y los 0 [dB] de relación axial.



(a) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico.



(b) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura 5.2: Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones

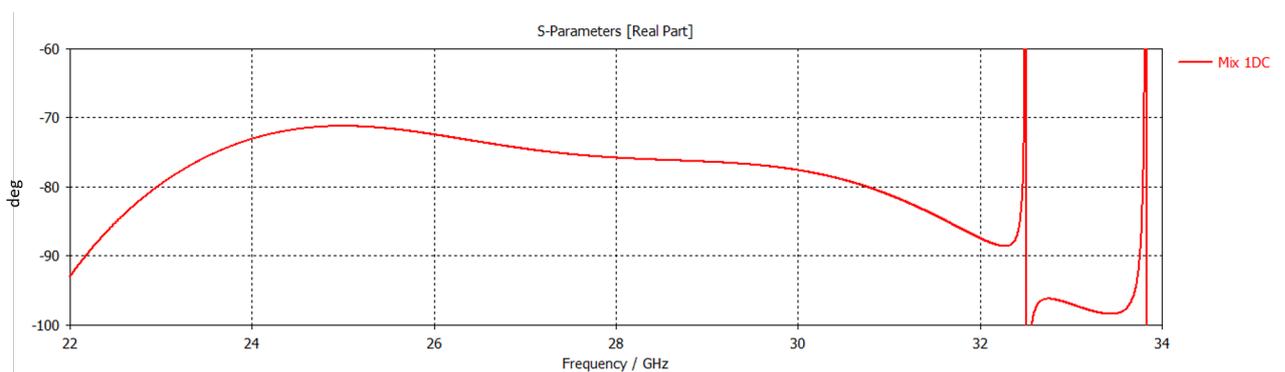


Figura 5.3: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones

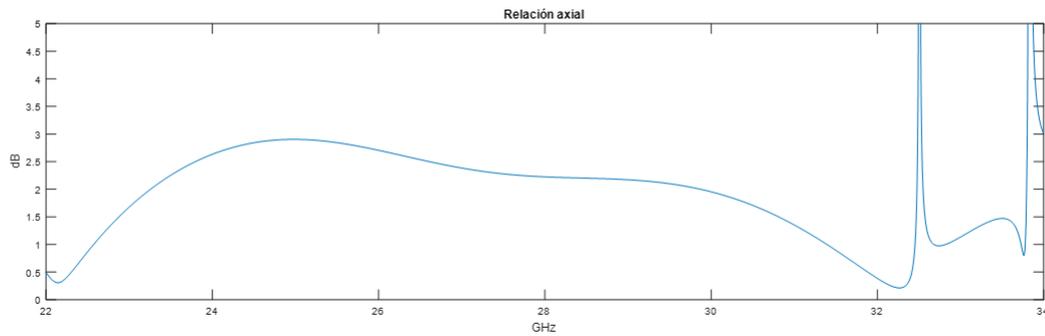


Figura 5.4: Relación axial para el polarizador de 5 corrugaciones

### 5.3. Simulación en CST con 6 corrugaciones

---

A continuación, se mostrarán los resultados de la simulación del polarizador para 6 corrugaciones.

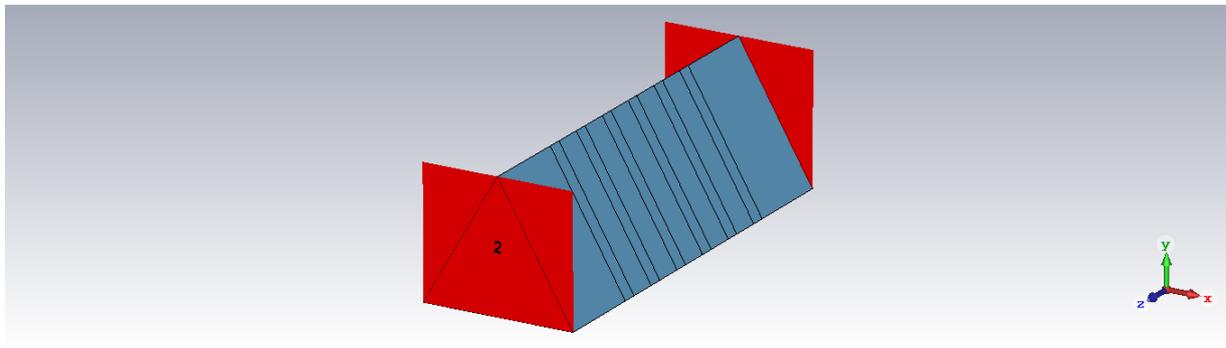
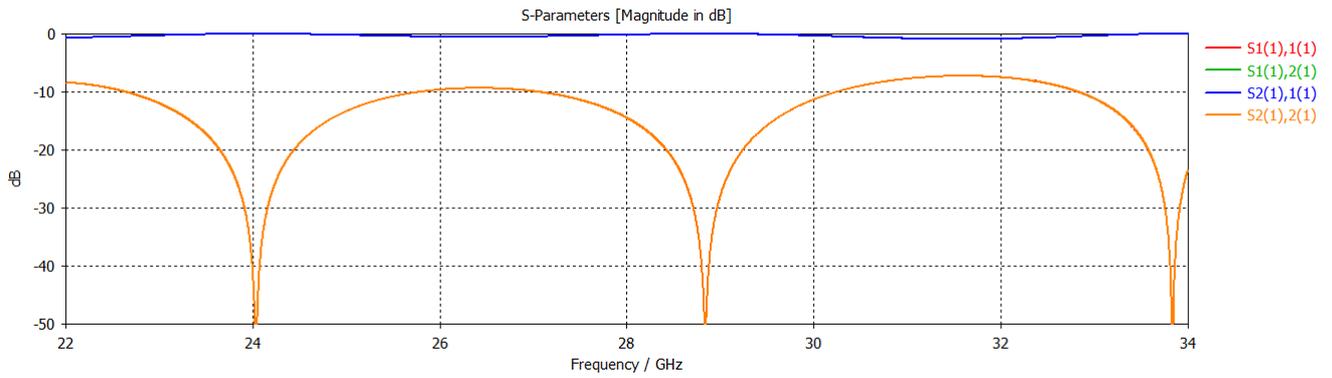
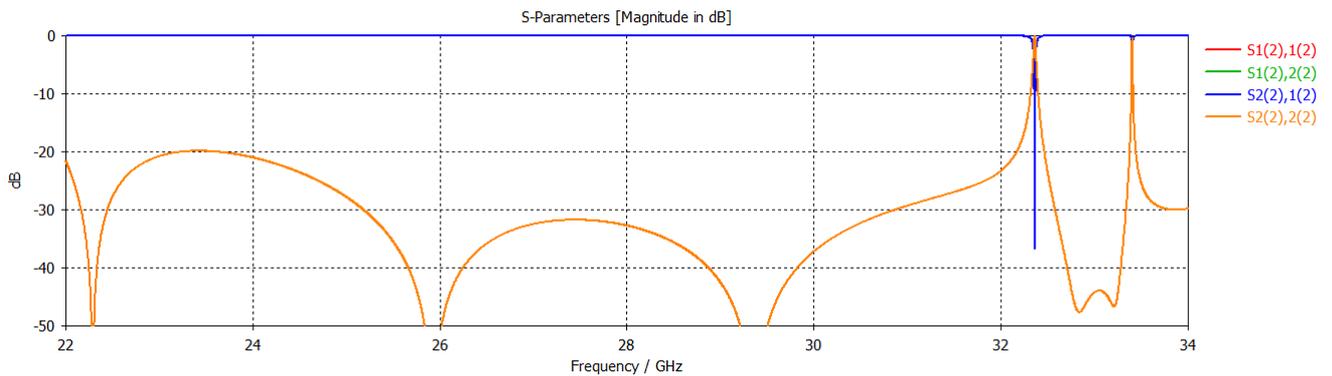


Figura 5.5: Sección canónica del polarizador con 6 corrugaciones diseñada en CST.

Observando la **Figura 5.6** se puede comprobar que la adaptación de impedancias para el modo horizontal (**Figura 2.2**) ha mejorado, pero en el modo vertical ha empeorado. Esto no es algo que deba preocuparnos ya que se podrá diseñar en un futuro un adaptador de impedancias para conseguir reducir la adaptación en el modo vertical.



(a) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico.



(b) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura 5.6: Parámetros S del polarizador con 6 corrugaciones

Por otro lado, el desfase (**Figura 5.7**) y la relación axial (**Figura 5.8**) conseguidos son muy poco estables en el rango de frecuencias, por lo que se intentará optimizar los resultados variando los valores del propio polarizador.

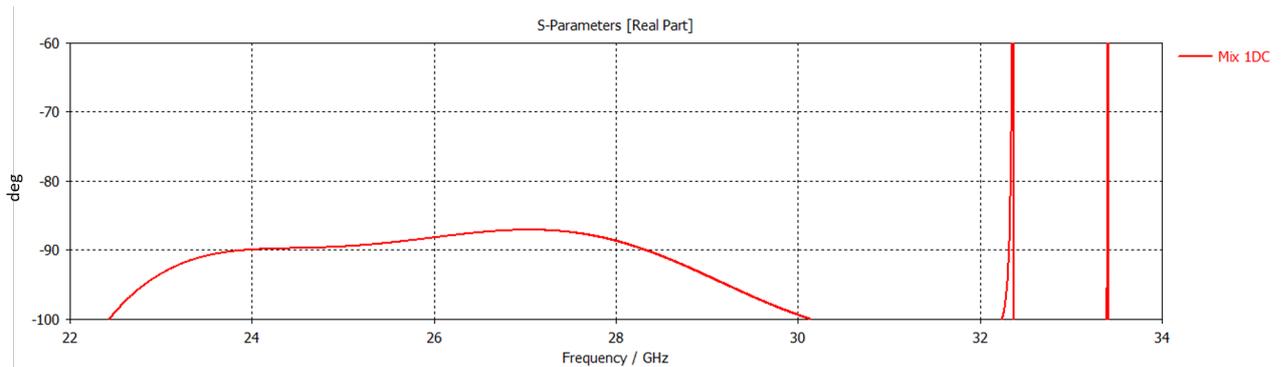


Figura 5.7: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 6 corrugaciones

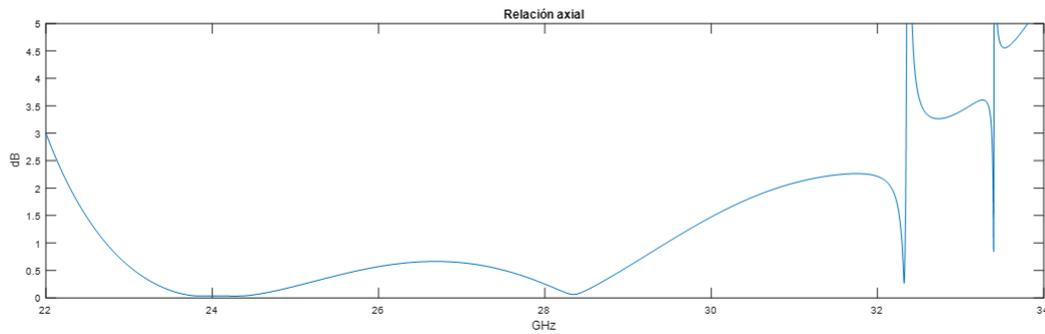


Figura 5.8: Relación axial para el polarizador de 6 corrugaciones

### 5.3.1. Optimización del polarizador

La primera opción que se planteó para poder mantener el desfase en un mayor rango de frecuencias fue aumentar el valor de  $t$ , ya que al observar la **Figura 4.3(i)** se puede apreciar que se conseguía un desfase más lineal que en la **Figura 4.3(f)**.

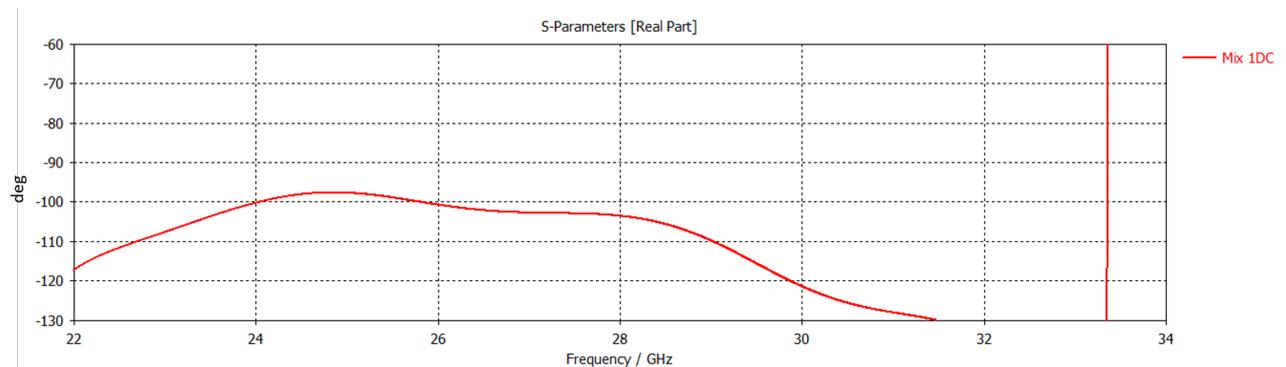


Figura 5.9: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 6 corrugaciones con  $t = 3$

Observando la **Figura 5.9** se puede apreciar que la curva del desfase se ha conseguido aplanar, pero esta vez el desfase alcanzado supera el deseado, por lo que se volverá a simular para  $N = 5$  con el nuevo valor de  $t$ . Esto mismo ocurre con la relación axial (**Figura 5.10**), que supera el valor de 1 [dB], cuando se busca un valor igual o próximo a los 0 [dB].

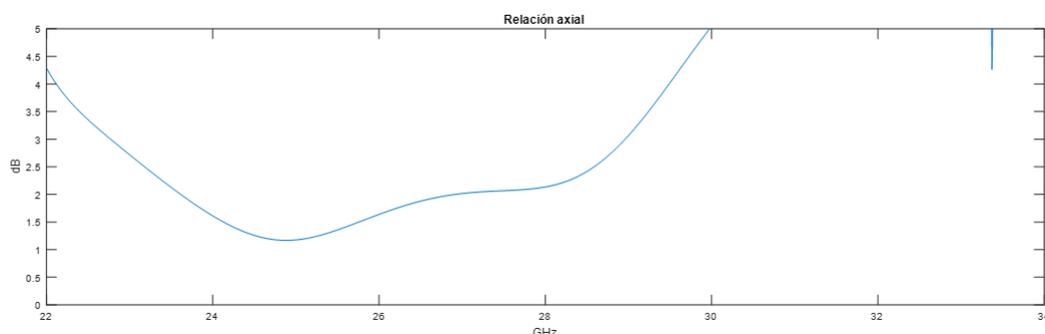


Figura 5.10: Relación axial para el polarizador de 6 corrugaciones con  $t = 3$

Con esta nueva simulación (**Figura 5.11**), se comprueba que el desfase esta vez quedará por encima del valor deseado y que el valor de la relación axial (**Figura 5.12**) comienza a aproximarse a los 0 [dB], por lo que esta vez lo que se hará será aumentar el valor de la diferencia de alturas entre el triángulo principal que forma la guía de onda y el triángulo imaginario que forma la corrugación, con la intención de seguir suavizando la curva.

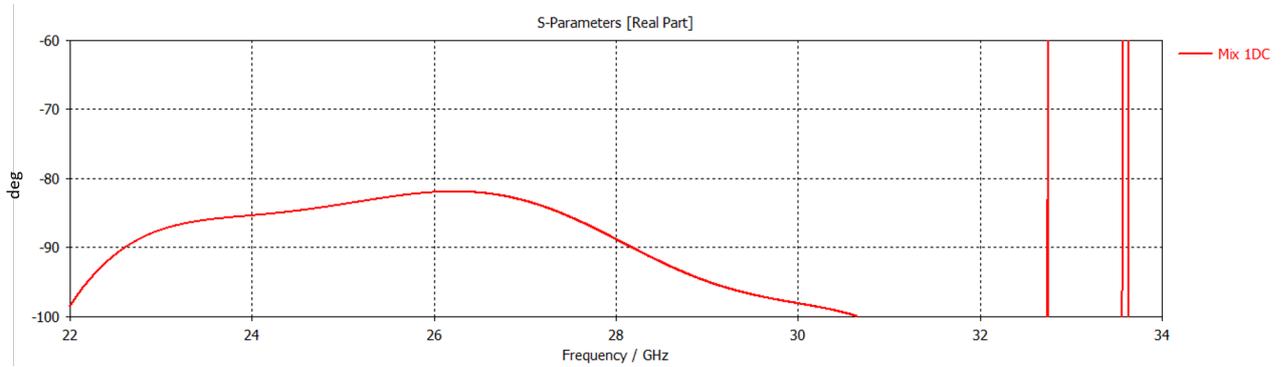


Figura 5.11: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones con  $t = 3$

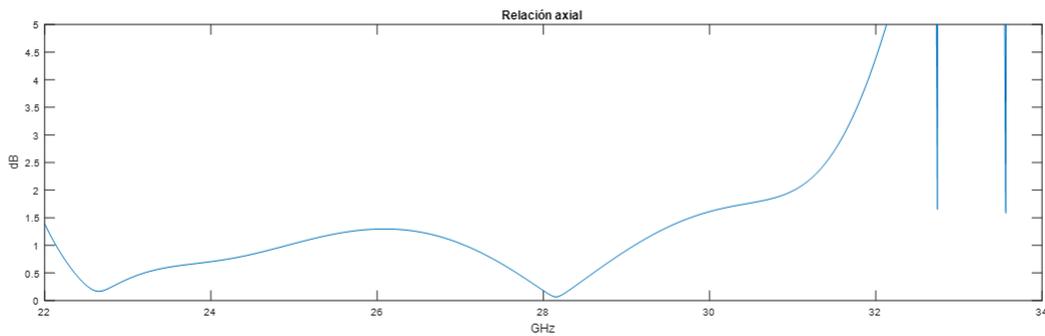


Figura 5.12: Relación axial para el polarizador de 5 corrugaciones con  $t = 3$

Con esta última simulación (**Figura 5.13**), parece que se ha conseguido el desfase deseado con un margen de  $\pm 4^\circ$  de error en un ancho de banda de  $4,867[GHz]$ . No obstante, antes de dar este resultado como final, se deberá comprobar la relación axial de la guía de onda en el rango de frecuencias de  $23,16[GHz]$  a  $28,027[GHz]$ , así como la adaptación de impedancias para estas nuevas dimensiones.

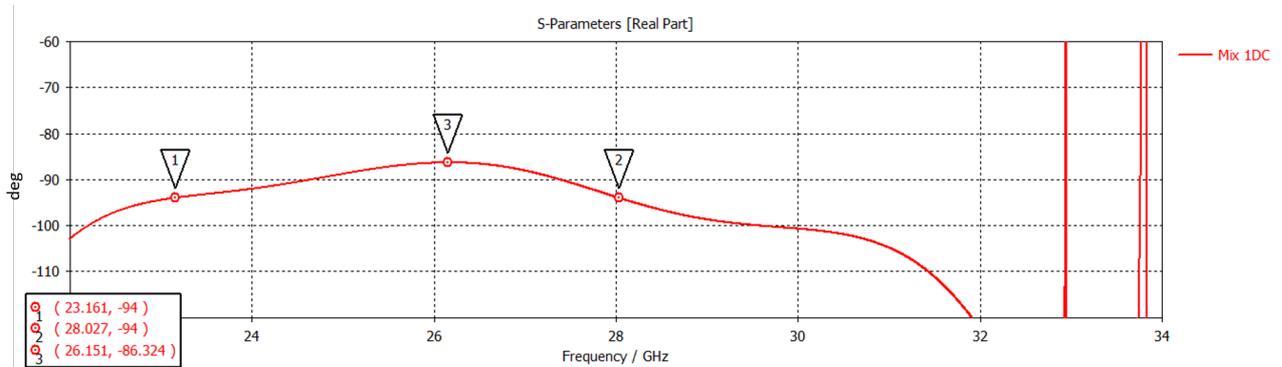


Figura 5.13: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones con  $t = 3$  y  $x = 3$

Como se puede observar en la **Figura 5.14**, en el ancho de banda obtenido, el valor de la relación axial es próximo a  $0 [dB]$ , esto quiere decir que la polarización en este periodo es prácticamente circular, pudiendo ser un poco achatada debido al error. En cambio, en las frecuencias más altas representadas, la relación axial tiende a infinito, lo que significaría que en esas frecuencias la polarización será casi lineal. En el resto de frecuencias del espectro representado, la polarización tendrá forma de elipse.

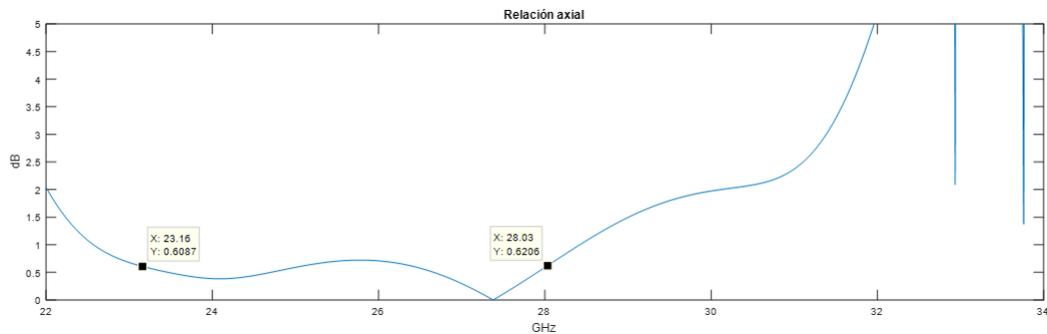
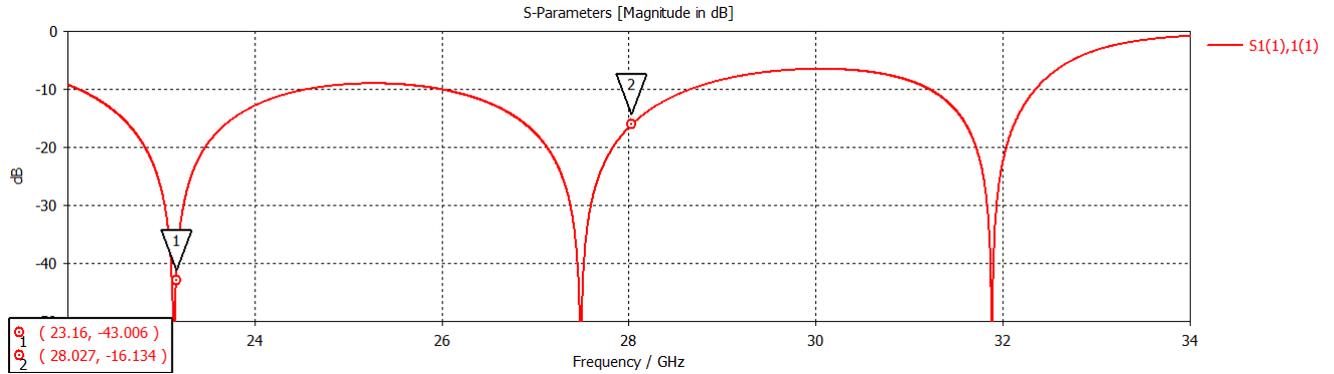
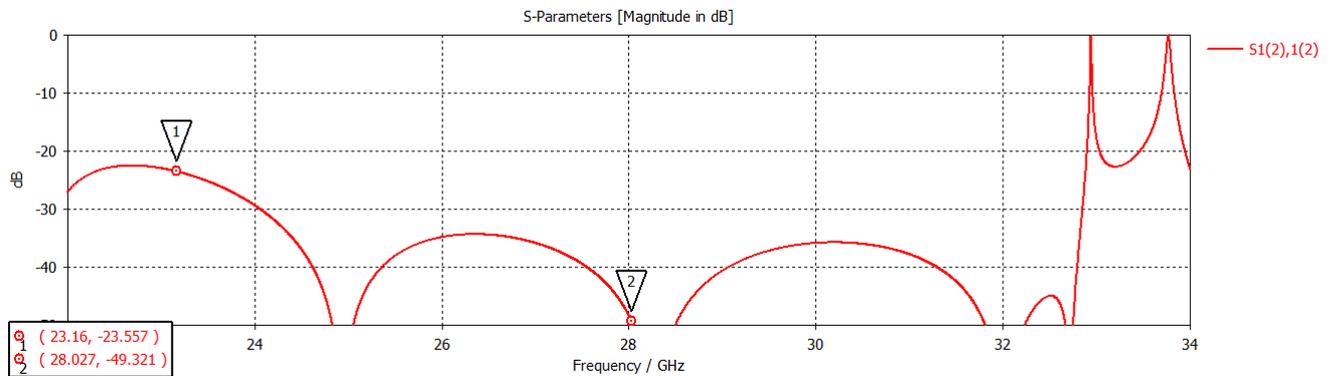


Figura 5.14: Relación axial para el polarizador de 5 corrugaciones con  $t = 3$  y  $x = 3$

A continuación, se van a mostrar en la **Figura 5.15** la adaptación de impedancias. En ella se puede observar que, en el rango de frecuencias que se ha conseguido el desfase, en el modo horizontal (**Figura 2.2**) se ha obtenido una buena adaptación, en cambio, en el modo vertical se necesitará añadir un adaptador para conseguir bajarla hasta, por lo menos, los 20 [dB].



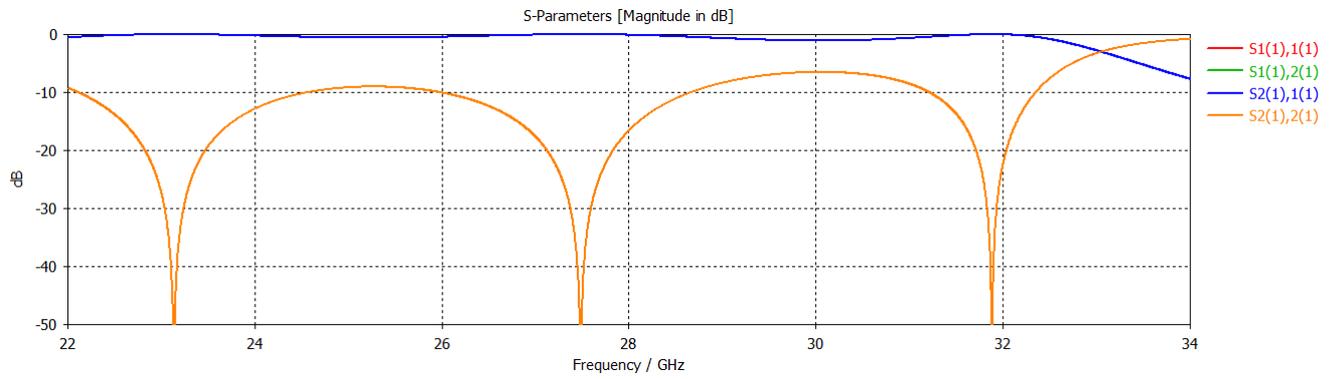
(a) Modo  $TE_{10}$  asimétrico.



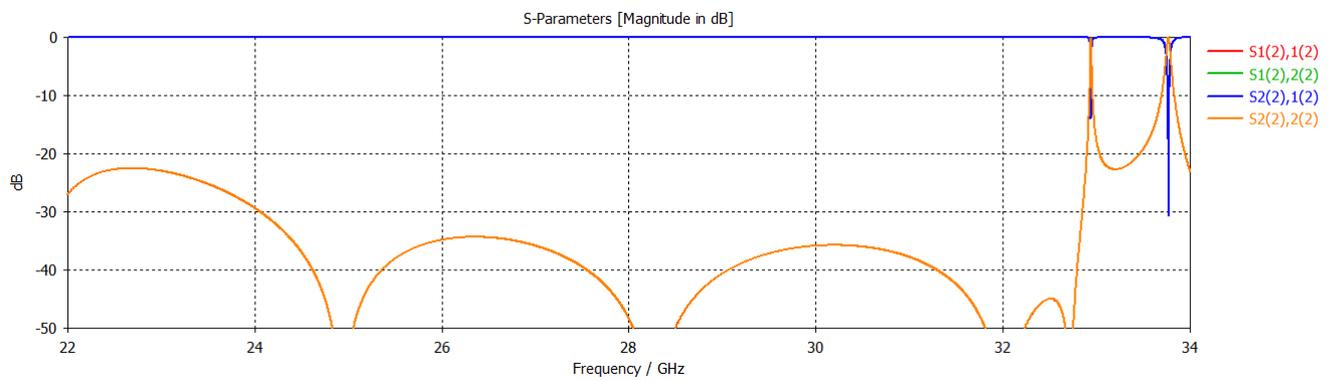
(b) Modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura 5.15: Parámetro  $S_{11}$  del polarizador con 5 corrugaciones

Para dar por terminado este trabajo, se mostrarán los parámetros S obtenidos con el fin de observar que los coeficientes de transmisión están muy próximos a los 0[dB], lo que indicará que cada modo se propagará a la salida con casi la totalidad de la potencia que entró al dispositivo.



(a) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico.



(b) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura 5.16: Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones



# 6

## Conclusiones y Trabajo Futuro

### 6.1. Conclusiones

---

En este trabajo se han explicado las principales técnicas para el diseño de polarizadores en guía de onda que se utilizan actualmente y se han aplicado estas técnicas por primera vez para el diseño de un polarizador de guía de onda traingular equilátera.

En el capítulo 2, se expusieron los principales conceptos necesarios para entender el trabajo. Se mostró el campo eléctrico y el campo magnético de una guía de onda triangular, y las funciones que se utilizan para generar los campos  $TE$  y  $TM$ . También se explicó el procedimiento a seguir para calcular los principales parámetros que se utilizarían en el diseño del polarizador tales como, la frecuencia de corte ( $f_c$ ), el número de onda ( $k_c$ ), la constante de propagación ( $\gamma$ ) o la longitud de onda ( $\lambda_g$ ), que se utilizaron para la particularización del campo  $TE$  de los modos fundamentales que se usaron como método para calcular el desfase ( $TE_{10}^S$  y  $TE_{10}^A$ ). A continuación, se entró en detalle para explicar el concepto de polarización, fundamental para entender el trabajo que se iba a realizar, y qué tipos de polarización existen, desarrollando cada tipo para poder observar las particularidades de cada uno de ellos. Finalmente, se expuso el concepto de relación axial, concepto que fue muy necesario para poder comprobar que el polarizador diseñado cumplía todos los requisitos para conseguir la polarización circular que se deseaba.

El diseño del primer prototipo del polarizador se realizó en el capítulo 3, donde se planteaban varios posibles modelos para la corrugación, que tras unas simulaciones muy sencillas se pudo determinar cuál podría adecuarse mejor al objetivo final. También se establecieron las dimensiones que tendría la guía de entrada al polarizador. Estas dimensiones fueron calculadas de tal forma que cumplieran las especificaciones necesarias para trabajar en un ancho de banda monomodo, fundamental para que la onda se propague únicamente en los modos deseados y no en ningún otro modo superior. Para terminar con el capítulo de diseño, se mostró el procedimiento a seguir para la formación del polarizador, llegando a la conclusión de que una disposición en cascada sería la más adecuada y la más sencilla de realizar.

Con todos estos datos, se comenzó a desarrollar el polarizador en el capítulo 4. Partiendo de las dimensiones especificadas en el capítulo anterior, se establecieron las dimensiones que tendría el polarizador, para ello se utilizaron una serie de simulaciones con CST. A continuación, se calculó por medio de una simulación en Matlab, el número de corrugaciones que serían necesarias para cumplir el desfase y la adaptación de impedancias deseada, llegando a la conclusión de que el modelo que se había utilizado hasta este momento, no era el adecuado para la realización de un polarizador y que su comportamiento se asemejaba más a un filtro. Llegados a este momento, se tuvo que plantear otro modelo de corrugación y volver a calcular tanto las dimensiones del polarizador como el número de secciones del mismo.

Finalmente, en el capítulo 5, se mostraron los resultados obtenidos, donde se pudo observar que los valores calculados anteriormente no eran los óptimos para el trabajo, por lo que se realizaron diferentes simulaciones con el objetivo de conseguir un mejor resultado. Con estos últimos valores se calculó tanto el desfase, como la adaptación de impedancias, los coeficientes de transmisión de potencia y la relación axial, determinantes para demostrar que se había conseguido llegar a los objetivos establecidos al principio de la memoria.

## **6.2. Trabajo futuro**

---

En vista de los resultados obtenidos para el polarizador en guía de onda triangular, se propone como trabajo futuro la realización de un adaptador de impedancias en la entrada del polarizador para mejorar estos resultados, y en caso de que la adaptación hubiera mejorado, la construcción del diseño realizado junto con su adaptador, y la medida del mismo. De esta forma, se podrá comprobar si los resultados obtenidos en las simulaciones se mantendrían en un prototipo real o si el comportamiento cambiaría.

Otra línea de trabajo planteada para el futuro, podría ser el realizar un estudio siguiendo estos mismos objetivos y con procedimientos similares para otros modelos de guía de onda. Al principio de este trabajo se planteó que, si hubiera tiempo, se podría estudiar el comportamiento de una guía de onda circular, incluso elíptica, para su utilización en dispositivos polarizadores por lo que sería un buen trabajo a realizar, haciendo una comparativa con la guía de onda triangular y la guía de onda rectangular.

# Bibliografía

- [1] Ana Morán López. *Contribution to the efficient modeling and design of passive waveguide device through methods based on modal decompositions of electromagnetic fields in unconventional geometries*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Madrid, 2019.
- [2] David M. Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley Sons, Inc., fourth edition edition, 1998.
- [3] Jorge A. Ruiz-Cruz José R. Montejo-Garai Jesús M. Rebollar Ana Morán López, Juan Córcoles. Electromagnetic scattering at the waveguide step between equilateral triangular waveguides. *Hindawi Publishing Corporation*, vol. 2016(ID 2974675):pp. 2 – 5, 2016.
- [4] Uwe Rosenberg Jaroslaw Uher, Jens Bornemann. *Waveguide components for antenna feed systems : theory and CAD*. Artech House Publishers, 1993.
- [5] José Luis Masa Campos. Ii.2.5 polarización. Apuntes de la asignatura de Antenas y Compatibilidad Electromagnética del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.
- [6] Daniel García-Ocaña Hernández. Diseño de un polarizador para un alimentador de antena en banda ka en guía de onda rectangular. Trabajo de Fin de Grado, Universidad Autónoma de Madrid, junio 2015.
- [7] Arne F. Jacob Björn Deutschmann. Broadband septum polarizer with triangular common port. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 68(2):pp. 695 – 698, 2020.
- [8] Jorge A. Ruiz Cruz. Ii.1 circuitos formados por líneas de transmisión y elementos concentrados. Apuntes de la asignatura de Medios de Transmisión impartida del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.





# Simulación para el tipo de corte en la corrugación

## A.1. Modelo 1

---

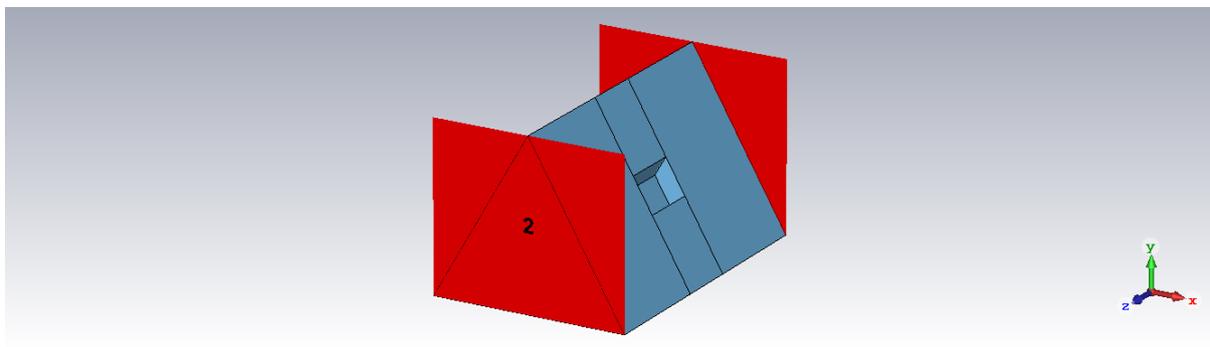


Figura A.1: Sección canónica del modelo 1 diseñada en CST.

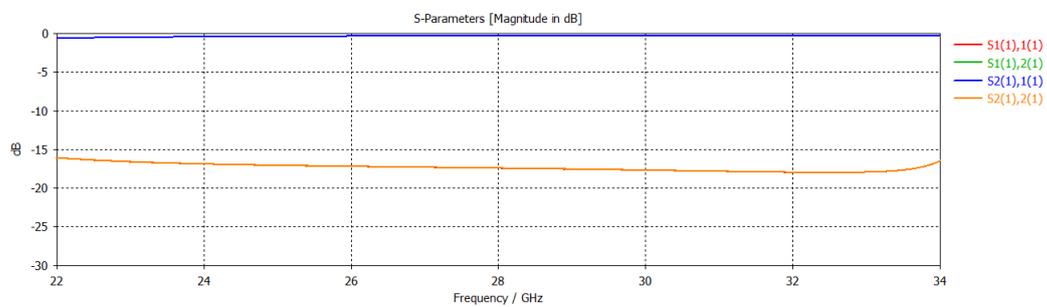


Figura A.2: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico para el modelo 1.

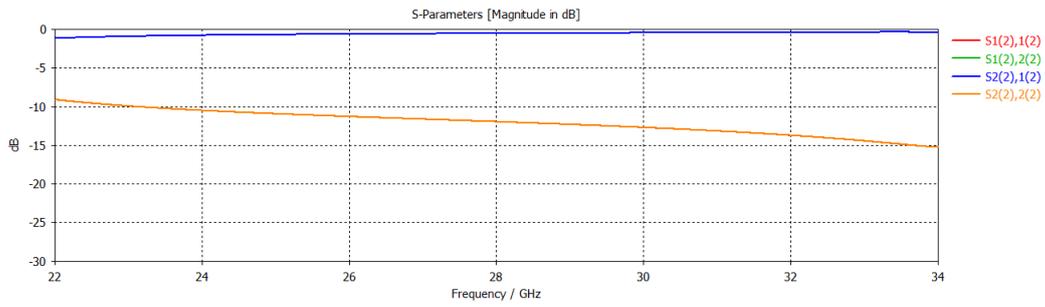


Figura A.3: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico para el modelo 1.

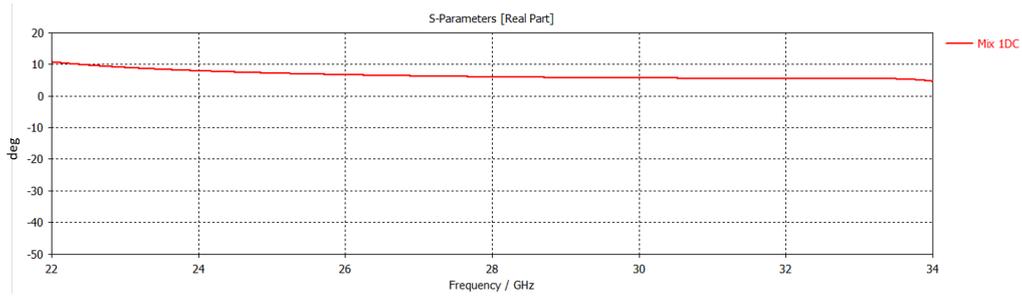


Figura A.4: Desfase entre los modos del modelo 1

## A.2. Modelo 2

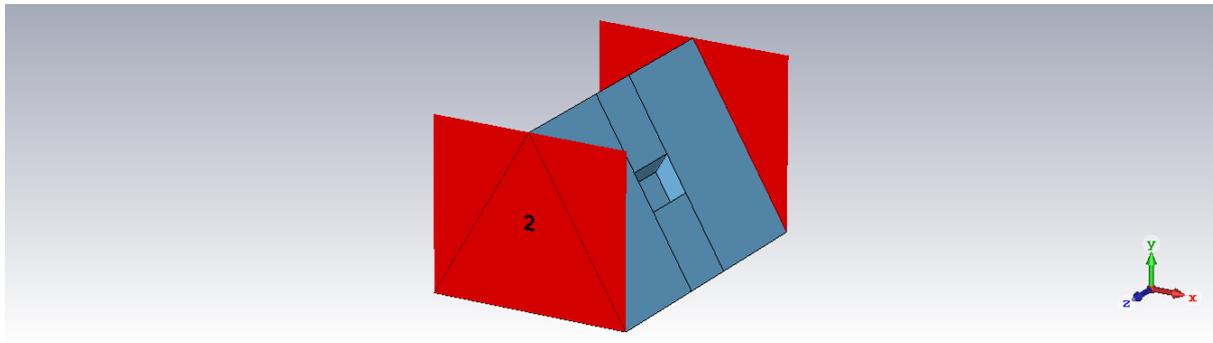


Figura A.5: Sección canónica del modelo 2 diseñada en CST.

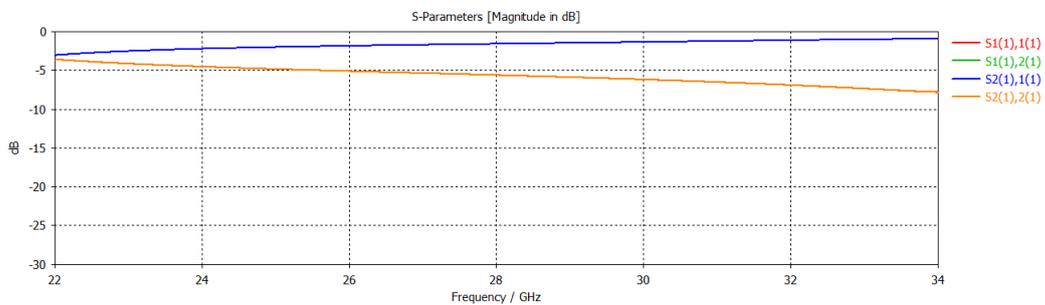


Figura A.6: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico para el modelo 2.

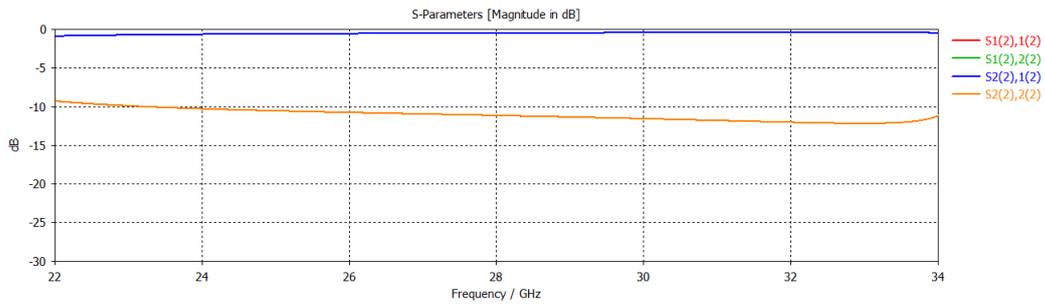


Figura A.7: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico para el modelo 2.

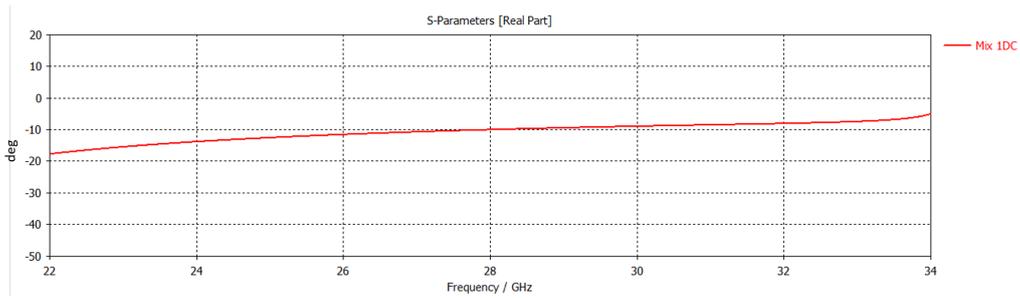


Figura A.8: Desfase entre los modos del modelo 2

### A.3. Modelo 3

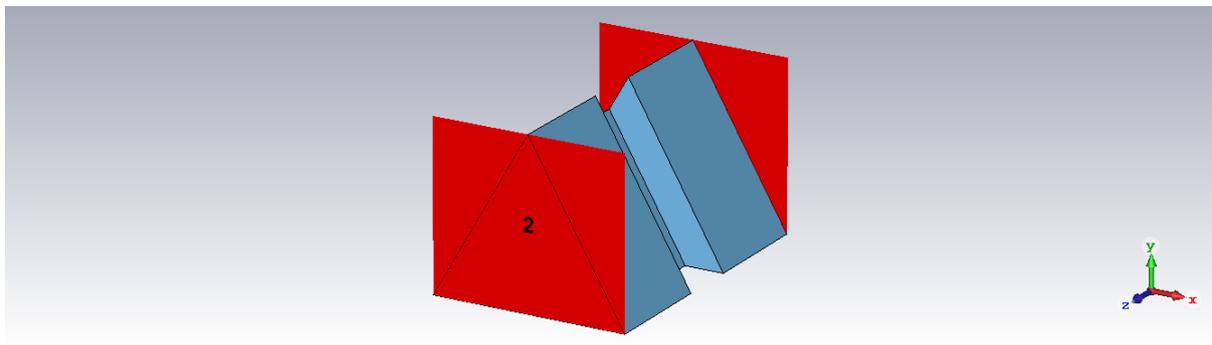


Figura A.9: Sección canónica del modelo 3 diseñada en CST.

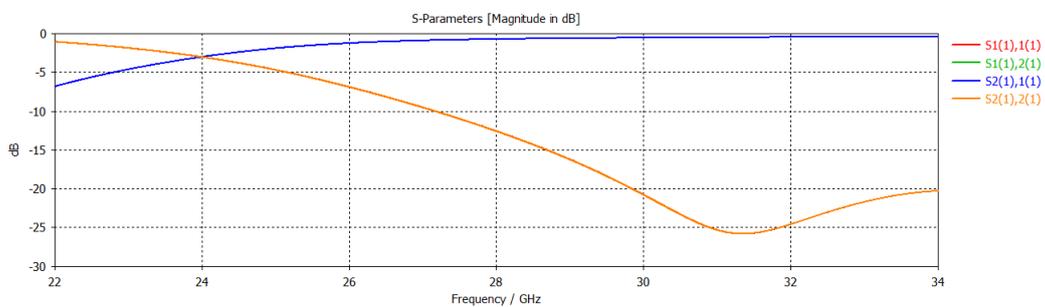


Figura A.10: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico para el modelo 3.

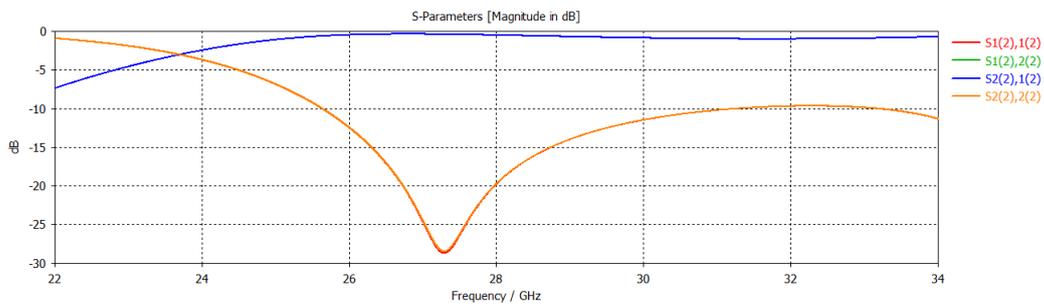


Figura A.11: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico para el modelo 3.

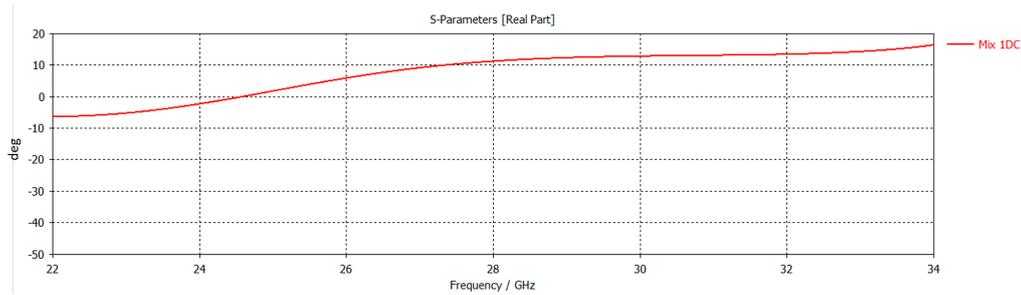


Figura A.12: Desfase entre los modos del modelo 3

## A.4. Modelo 4

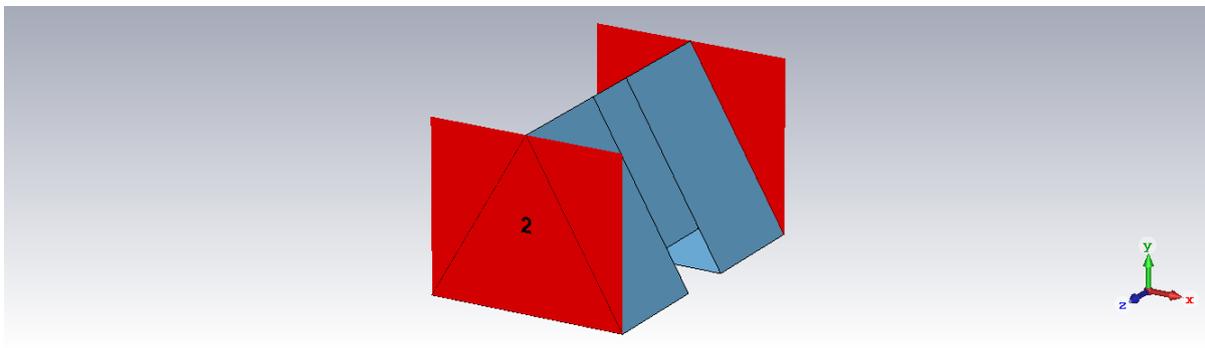


Figura A.13: Sección canónica del modelo 4 diseñada en CST.

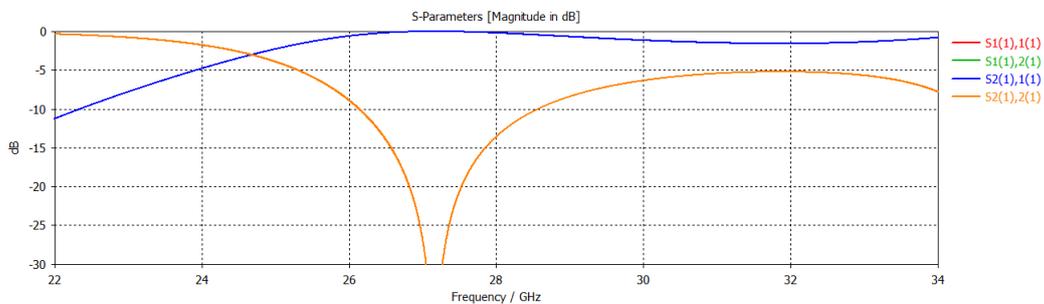


Figura A.14: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico para el modelo 4.

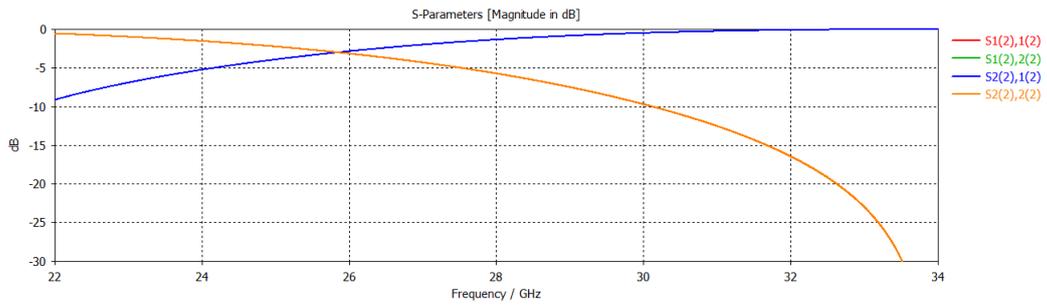


Figura A.15: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico para el modelo 4.

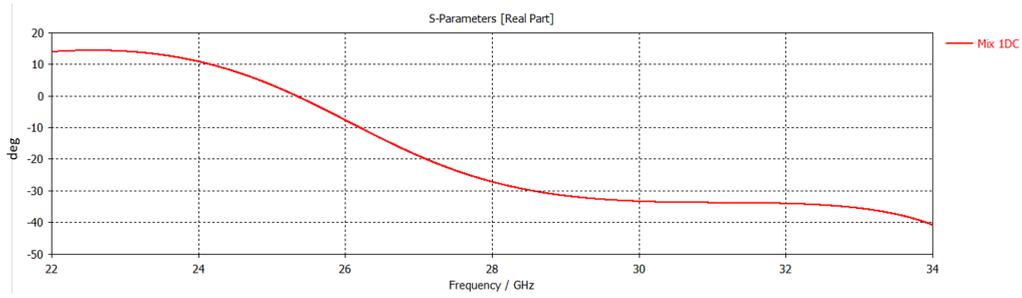


Figura A.16: Desfase entre los modos del modelo 4

## A.5. Modelo 5

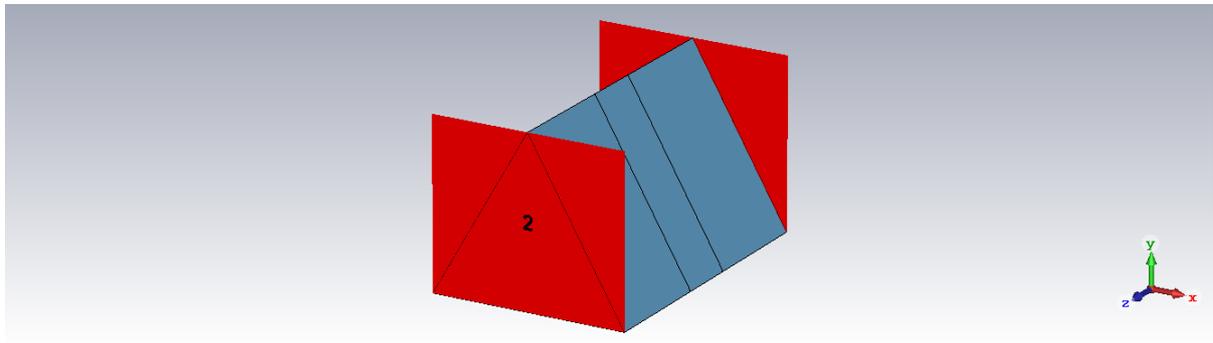


Figura A.17: Sección canónica del modelo 5 diseñada en CST.

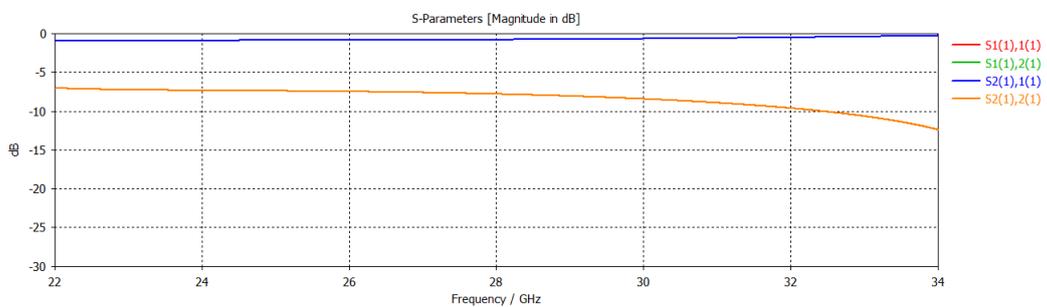


Figura A.18: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico para el modelo 5.

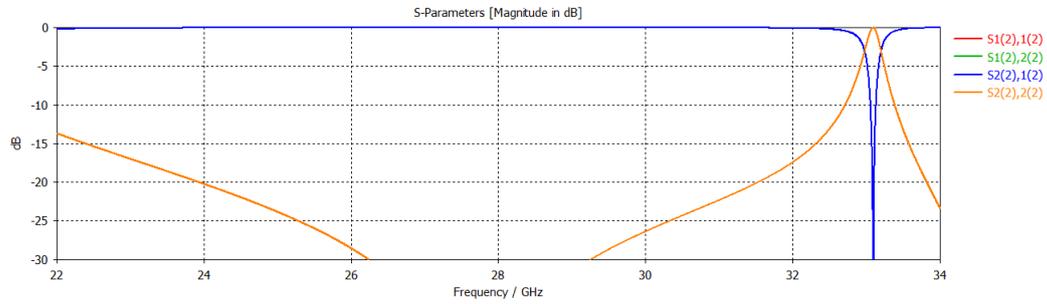


Figura A.19: Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico para el modelo 5.

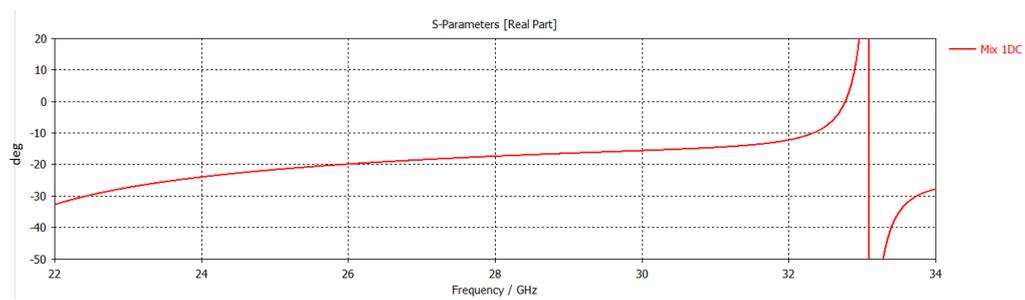


Figura A.20: Desfase entre los modos del modelo 5

# B

## Simulaciones del modelo circuital

### B.1. Introducción

---

En este anexo se mostrarán los resultados obtenidos en las simulaciones del modelo circuital equivalente para comprobar que este modelo permite diseñar el polarizador de forma teórica.

### B.2. Simulación en Matlab con 5 corrugaciones

---

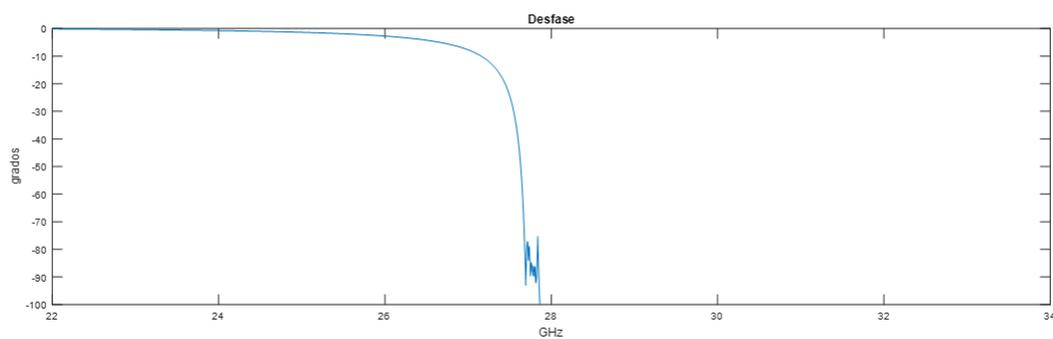
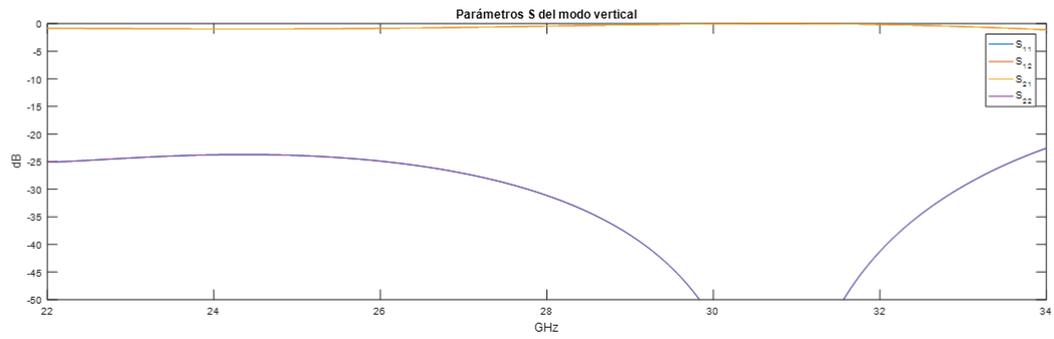
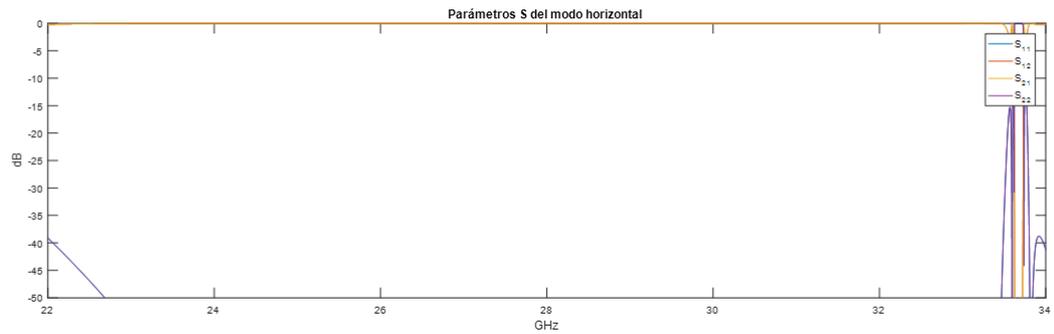


Figura B.1: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones



(a) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico.



(b) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura B.2: Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones

### B.3. Simulación en Matlab con 6 corrugaciones

---

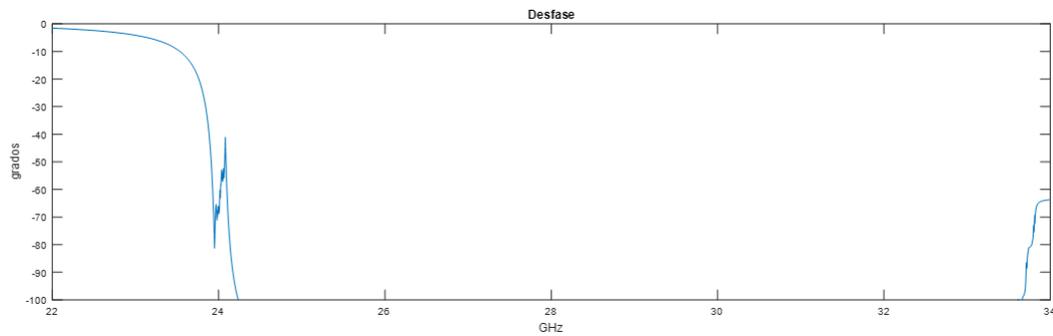
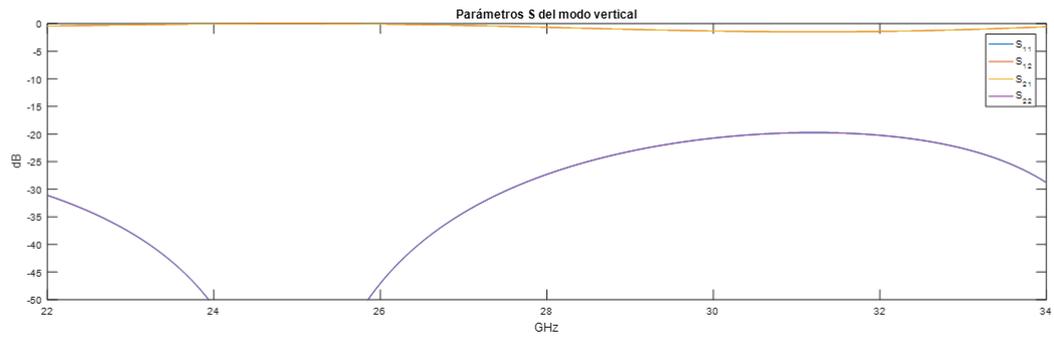
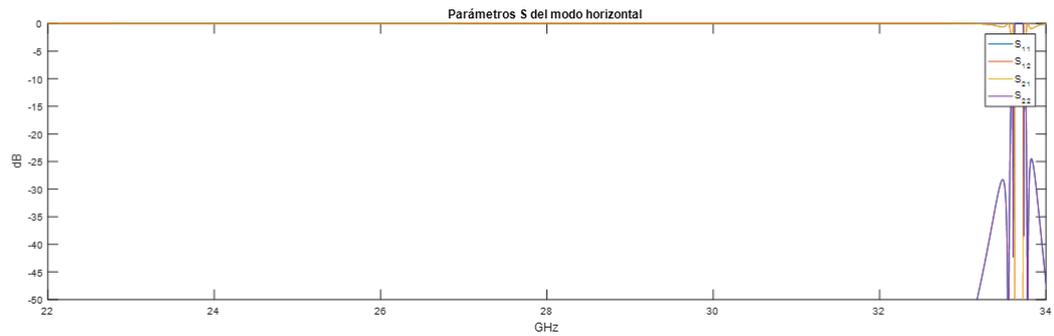


Figura B.3: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 6 corrugaciones



(a) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico.



(b) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura B.4: Parámetros S del polarizador con 6 corrugaciones

## B.4. Simulación en Matlab con 6 corrugaciones con $t = 3$

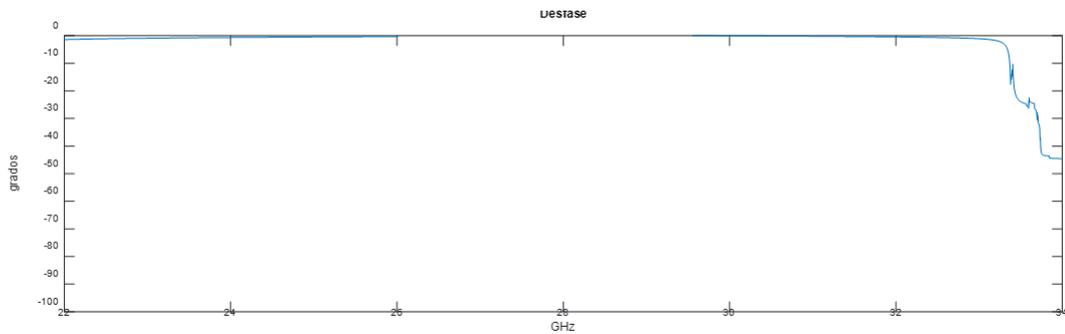
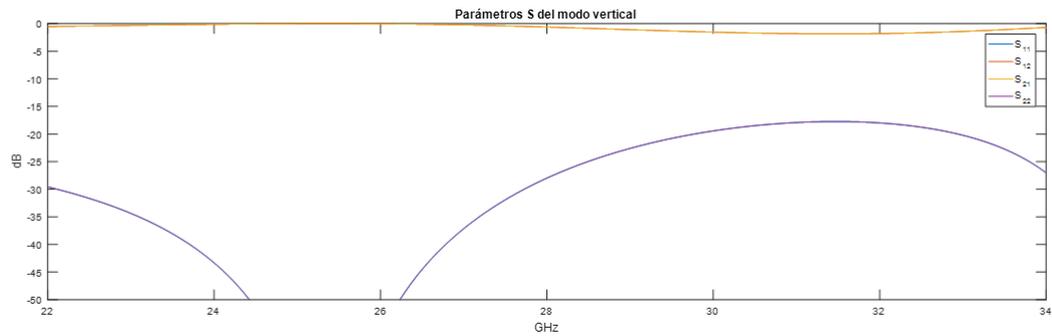
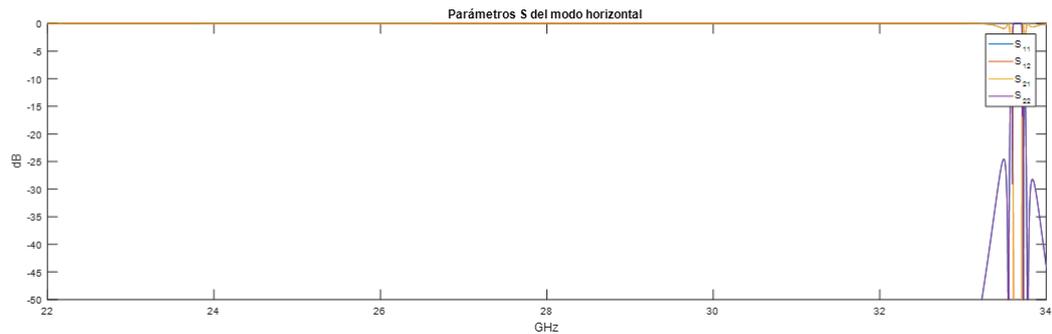


Figura B.5: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 6 corrugaciones con  $t = 3$



(a) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico.



(b) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura B.6: Parámetros S del polarizador con 6 corrugaciones con  $t = 3$

## B.5. Simulación en Matlab con 5 corrugaciones con $t = 3$

---

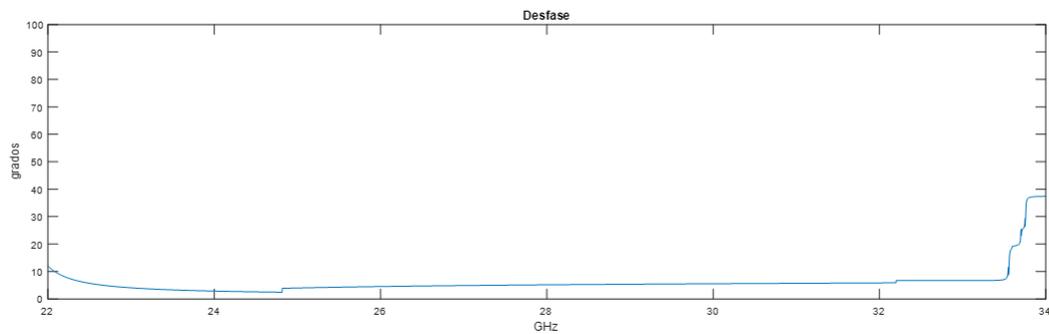
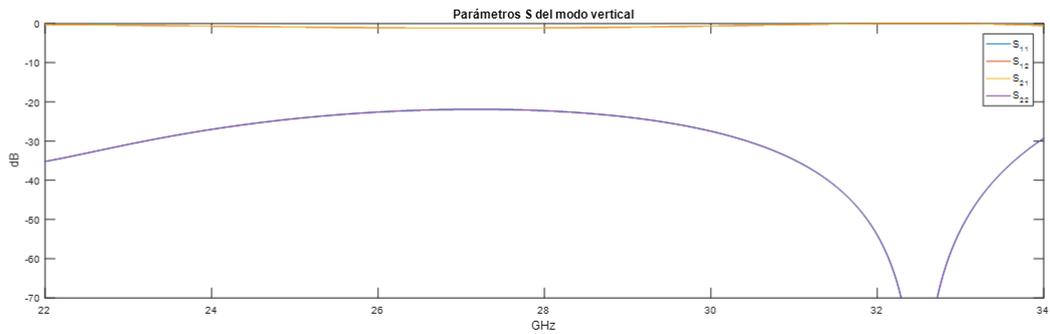
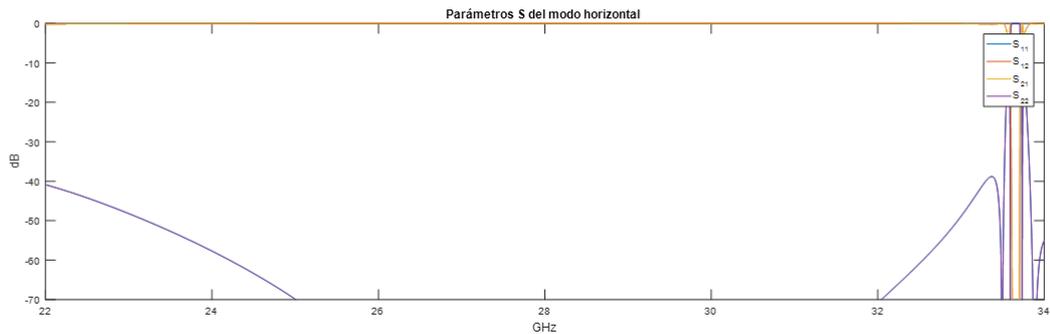


Figura B.7: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones con  $t = 3$



(a) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico.



(b) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura B.8: Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones con  $t = 3$

## B.6. Simulación en Matlab con 5 corrugaciones con $t = 3$ y $x = 3$

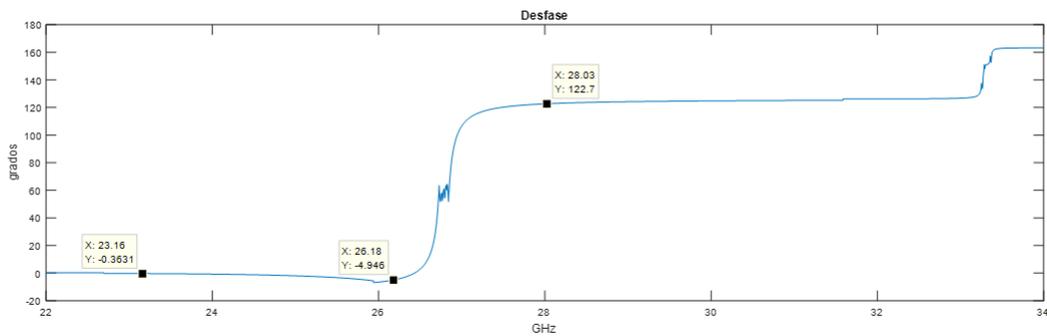
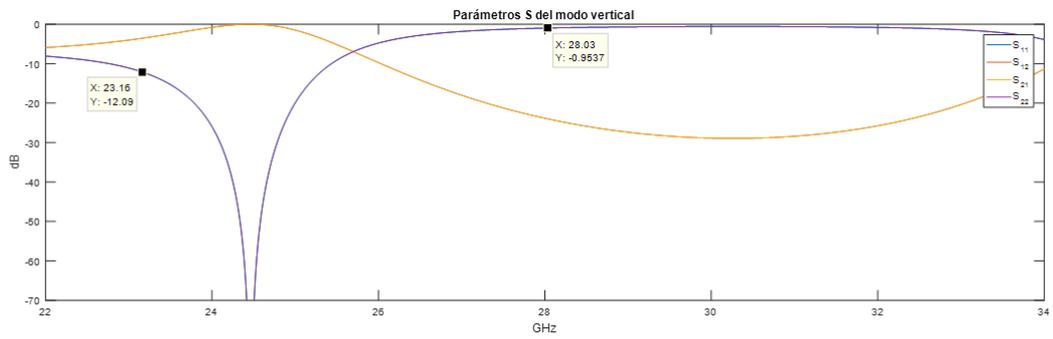
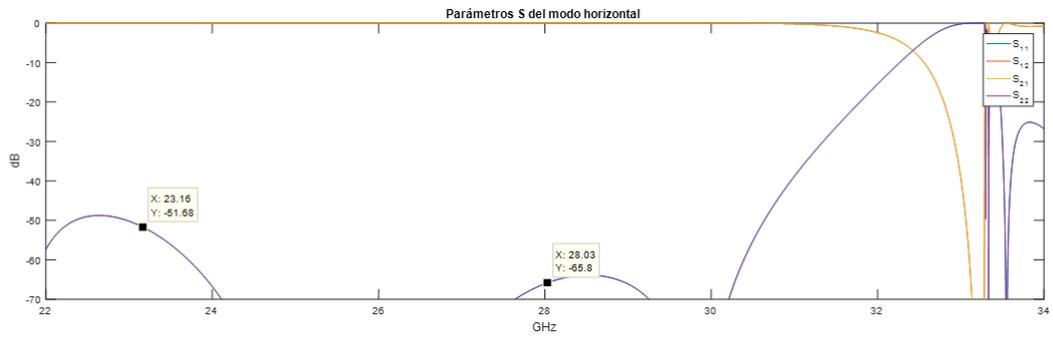


Figura B.9: Desfase entre los modos  $TE_{10}$  asimétrico y  $TE_{10}$  simétrico en el polarizador de 5 corrugaciones con  $t = 3$  y  $x = 3$



(a) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  asimétrico.



(b) Parámetros S del modo  $TE_{10}$  simétrico.

Figura B.10: Parámetros S del polarizador con 5 corrugaciones con  $t = 3$  y  $x = 3$