



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**POLARIZADOR DE BANDA ANCHA BASADO EN
GUÍA DE ONDA CIRCULAR PARA LA BANDA KA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A:

ROSA VIANEY VEGA CARETA



DIRECTOR DE TESIS:

DR. OLEKSANDR MARTYNYUK

Abril 2014

Introducción Geneal.

El término microondas, se refiere a las ondas electromagnéticas que ocupan frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz del espectro electromagnético, y que poseen una longitud de onda entre 1 m y 1 mm por lo que también son llamadas ondas milimétricas. Pero en el área de radiofrecuencia a menudo las señales de microondas oscilan entre 1 GHz y 100 GHz; y tienen un mayor uso dentro del rango de 1 GHz a 40 GHz.

Debido a que poseen frecuencias altas y longitudes de onda pequeñas, las microondas presentan dificultades en el análisis y diseño de los dispositivos que trabajan con estas y por tanto son inexactos al momento de fabricarlos. Sin embargo se utilizan porque tienen grandes beneficios, por ejemplo:

- La ganancia de antena es proporcional a $(D/\lambda)^2$ donde D es el diámetro de la antena, por tanto a frecuencias más altas mayor será la ganancia de la antena.
- A frecuencias altas se tiene un mayor ancho de banda.
- Las señales de microondas viajan por la línea de vista, así que sirven para comunicación satelital y terrestre.

Además, las señales de microondas tienen muchas aplicaciones: radio y televisión, radares, meteorología, comunicaciones vía satélite, medición a distancia, investigación de las propiedades de la materia, entre otras.

Las frecuencias de microondas se dividen en un conjunto de bandas , tal como se muestra en la Tabla 1. De estas bandas una de las más importantes es la banda Ka, la cual posee un espectro relativamente abundante y por lo tanto es atractiva para los servicios que no se pueden encontrar en frecuencias más bajas. Sin embargo desde el punto de vista técnico tiene muchos retos, siendo el mayor la gran atenuación que surge ante la presencia de una precipitación pluvial, esto por

supuesto puede ser superado con el aumento de la potencia transmitida o sensibilidad en el receptor para tener un mejor margen de enlace.

Banda	Rango de Frecuencia [GHz]
L	1 – 2
S	2 – 4
C	4 – 8
X	8 – 12
Ku	12 – 18
K	18 – 26
Ka	26 – 40
U	40 – 60

Tabla 1. Bandas de frecuencias de microondas [9]

En los sistemas de telecomunicaciones es de suma importancia la discriminación de polarización de las ondas, pues permite reutilizar frecuencias mediante la transmisión simultánea en un mismo haz a la misma frecuencia con señales de polarizaciones ortogonales. Esto es de gran relevancia debido a que el espectro electromagnético es finito, y de esta manera se puede transmitir mayor cantidad de información.

Dos polarizaciones son ortogonales entre sí cuando sus vectores de campo eléctrico forman 90° en todo momento. Los satélites emplean polarización ortogonal lineal (horizontal y vertical), aunque en la banda C también es común emplear la polarización ortogonal circular (derecha e izquierda).

Objetivo.

El trabajo realizado en esta tesis, tiene como fin lograr el diseño de un polarizador de banda ancha basado en guía de onda circular para banda Ka, lo anterior se realiza para obtener una onda con polarización circular, la cual nos sirve para transmitir una mayor cantidad de información, pues permite enviar dos señales diferentes sin que se mezclen entre sí.

Además se busca que el polarizador diseñado tenga el menor coeficiente de reflexión posible para disminuir pérdidas y que posea un ancho de banda amplio.

Organización de tesis.

En el primer capítulo se justifica la realización de la tesis, explicando de manera general el concepto de polarización y el funcionamiento de un polarizador, además de analizar algunos tipos de polarizadores. Posteriormente con base en el estudio realizado y las objetivos que se desean conseguir, se selecciona el tipo de polarizador a diseñar.

En el segundo capítulo se tiene el análisis del diseño seleccionado, donde se asientan sus principios básicos de operación y se plantean las bases para producir la diferencia de fase de 90° entre los campos eléctricos que atravesarán el dispositivo. También se establecen algunas de las características de diseño que poseerá el polarizador.

El tercer capítulo se centra principalmente en la simulación del polarizador, lo anterior se realiza con la finalidad de obtener modelos que se puedan poner en práctica, pues el software permite obtener las dimensiones físicas del polarizador.

En el cuarto capítulo se realiza la optimización del polarizador con el objetivo de ampliar el ancho de banda del dispositivo, reducir el coeficiente de reflexión y disminuir lo más posible el error de fase.

En el quinto capítulo se establecen los resultados obtenidos de la fabricación del polarizador basado en una guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Finalmente en el sexto capítulo se establecen las conclusiones generales, donde se comparan los resultados teóricos y experimentales del polarizador diseñado.

Índice

Introducción General.....	i
Objetivo.....	ii
Organización de tesis.....	iii
Referencias de figuras.	xi
Referencias de tablas.	xix
CAPÍTULO I.- Introducción al polarizador.....	1
1.1 Polarización Electromagnética.	1
1.1.1 Definición.	1
1.1.2 Tipos de polarización.	2
1.1.2.1 Polarización Lineal.	3
1.1.2.1.1 Polarización lineal vertical.....	4
1.1.2.1.1 Polarización lineal horizontal.....	4
1.1.2.1.1 Polarización lineal inclinada.....	5
1.1.2.2 Polarización Circular.....	7
1.1.2.2.1 Polarización circular derecha.....	7
1.1.2.2.1 Polarización circular izquierda.	9
1.1.2.3 Polarización Elíptica.	11
1.1.2.3.1 Polarización elíptica derecha.	13
1.1.2.3.2 Polarización elíptica izquierda.....	13
1.2 Polarizador.	14
1.2.1 Funcionamiento.	15
1.2.2 Aplicaciones.	16
1.2.3 Tipos de Polarizadores.	16
1.2.3.1 Tipos de Polarizadores en guía de onda circular.....	17

1.2.3.1.1 Polarizador basado en guía de onda circular con placa longitudinal dieléctrica.....	18
1.2.3.1.2 Polarizador basado en guía de onda circular con discos dieléctricos.....	20
1.2.3.1.3 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.....	23
1.2.3.1.4 Polarizador basado en guía de onda circular con optimización de diafragmas elípticos.	26
1.3 Conclusiones del capítulo.....	28
CAPÍTULO II.- Diseño del polarizador	29
2.1 Guía de onda circular.	29
2.1.1 Frecuencia de corte de una guía de onda circular.	30
2.1.1.1 Frecuencia de corte para el modo TE (Transversal eléctrico).	31
2.1.1.2 Frecuencia de corte para el modo TM (Transversal magnético).	34
2.1.2 Cálculo de frecuencias de corte para los primeros tres modos de propagación.	36
2.2 Simulación en el software Microwave Office (MWO).	37
2.3 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	39
2.3.1 Diafragma elíptico visto como circuito eléctrico.	39
2.3.1.1 Comportamiento en frecuencia de un capacitor.	40
2.3.1.2 Comportamiento en frecuencia de un inductor.	42
2.3.1.3 Aproximación de un diafragma elíptico a un circuito eléctrico.	43
2.4 Diseño del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	44
2.4.1 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos iguales.....	44

2.4.2 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos, utilizando dos tipos de diafragmas: centrales y extremos.....	46
2.4.3 Polarizador basado en guía de onda circular con pares de diafragmas elípticos iguales.	48
2.5 Conclusiones del capítulo.....	51
CAPÍTULO III.- Simulación del polarizador.....	53
3.1 Simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	53
3.1.1 Especificaciones generales de la simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.....	53
3.1.1.1 Representación del diafragma elíptico como circuito LC.....	54
3.1.1.2 Simulación de los diafragmas elípticos en el software especializado.	55
3.1.2 Análisis de los diafragmas elípticos de la simulación del polarizador. .	56
3.1.2.1 Primer diafragma.....	58
3.1.2.2 Segundo Diafragma.....	62
3.1.2.3 Tercer diafragma.	65
3.1.2.4 Cuarto diafragma.....	67
3.1.2.5 Quinto diafragma.....	70
3.1.3 Longitudes entre diafragmas elípticos de la simulación del polarizador.	72
3.1.4 Análisis de los resultados obtenidos de la simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	73
3.2 Optimización de las longitudes del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	77
3.2.1 Longitudes entre diafragmas elípticos de la optimización del polarizador.	77

3.2.2	Análisis de los resultados obtenidos de la optimización del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	78
3.3	Conclusiones del capítulo.....	81
CAPÍTULO IV.- Optimización del polarizador.....		83
4.1	Requerimientos para la fabricación del polarizador.....	83
4.1.1	Substrato dieléctrico (RO-5880).....	83
4.1.1.1	Características del substrato dieléctrico.....	84
4.1.2	Compensación de las longitudes por la colocación del substrato.	88
4.2	Simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.....	88
4.2.1	Características generales de la simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	88
4.2.2	Análisis de los resultados obtenidos de la simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.....	90
4.3	Diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	91
4.3.1	Características generales del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	91
4.3.2	Análisis de los resultados obtenidos del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.	94
4.4	Conclusiones del capítulo.....	98
CAPÍTULO V. Fabricación, armado y medición del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.		99
5.1	Proceso de fabricación.....	99
5.1.1	Rondanas del polarizador.....	99
5.1.2	Máscaras de los diafragmas elípticos.....	102

5.2 Presentación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.....	103
5.3 Resultados experimentales del polarizador.	104
5.4 Conclusiones del capítulo.....	106
CONCLUSIONES.	111
Bibliografía.	113
Mesografía.	115

Referencias de figuras.

- Figura 1.1 Tipos de polarización [1].
- Figura 1.2 Polarización lineal vertical [1].
- Figura 1.3 Polarización lineal horizontal [1].
- Figura 1.4 Polarización lineal inclinada [1].
- Figura 1.5 Polarización circular derecha [1].
- Figura 1.6 Polarización circular izquierda [1].
- Figura 1.7 Polarización elíptica derecha [1].
- Figura 1.8 Polarización elíptica izquierda [1].
- Figura 1.9 Onda incidente E_i dividida en dos componentes ortogonales [4].
- Figura 1.10. Vista esquemática del polarizador basado en guía de onda circular con placa transversal dieléctrica. (a) Vista tridimensional. (b) Vista frontal [5].
- Figura 1.11. Diferencia de las constantes de propagación respecto a la frecuencia, variando el radio (R) de la guía de onda [5].
- Figura 1.12. Polarizador basado en guía de onda circular con discos dieléctricos [6].
- Figura 1.13. Frecuencia de corte para los modos de propagación. (a) Modos de propagación en una guía de onda circular (b) Modos de propagación para una guía de onda cargada con discos dieléctricos[6].
- Figura 1.14. Configuraciones posibles para los discos [6].
- Figura 1.15. Tipos de discontinuidades de iris en un polarizador de guía de ondas. (a) Polarizador de guía de ondas circular con un clásico iris. (b) Polarizador basado en guía de onda circular surcada. (c) Polarizador basado en guía de onda cuadrada con diafragma rectangular. (d) Polarizador basado en guía de onda circular con diafragma elíptico [7].
- Figura 1.16. Principio de funcionamiento del polarizador. Un campo incidente vertical, produce una RHCP, mientras que un campo incidente horizontal produce una LHCP [7].

- Figura 1.17. Diafragmas elípticos (a) Apertura cóncava. (b) Apertura convexa [8].
- Figura 1.18. Coeficiente de reflexión respecto a la frecuencia del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos optimizados [8].
- Figura 1.19. Diferencia de fase con respecto a la frecuencia del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos optimizados [8].

- Figura 2.1 Geometría de la guía de onda circular [9].
- Figura 2.2 Circuito equivalente completo de un capacitor real.
- Figura 2.3 Respuesta en frecuencia del circuito equivalente completo de un capacitor real.
- Figura 2.4 Circuito equivalente de un inductor real.
- Figura 2.5 Comportamiento en frecuencia de un inductor.
- Figura 2.6 Circuito eléctrico correspondiente a dos diafragmas elípticos idénticos.

- Figura 3.1 Circuito LC paralelo
- Figura 3.2 Forma geométrica del diafragma elíptico
- Figura 3.3 Circuito equivalente del polarizador para ambas polarizaciones (la parte superior del circuito corresponde al campo paralelo a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas y la parte inferior al campo paralelo a los ejes menores de las elipses de los diafragmas).
- Figura 3.4 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del primer diafragma, $S[5,5]$ (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del primer diafragma $S[6,6]$ (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.
- Figura 3.5 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del primer diafragma $S1(1),1(1)$ (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del primer diafragma

S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.

- Figura 3.6 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del segundo diafragma S[5,5] (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del segundo diafragma S[6,6] (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.
- Figura 3.7 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del segundo diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del segundo diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.
- Figura 3.8 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del tercer diafragma S[5,5] (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del tercer diafragma S[6,6] (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.
- Figura 3.9 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del tercer diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del tercer diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.
- Figura 3.10 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del cuarto diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del cuarto diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.
- Figura 3.11 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor del cuarto diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor del cuarto diafragma S1(2),1(2) (línea

rosa) respecto a la frecuencia del cuarto diafragma de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.

- Figura 3.12 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del quinto diafragma $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del quinto diafragma $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.
- Figura 3.13 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor del quinto diafragma $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor del quinto diafragma $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.
- Figura 3.14 (a) Coeficiente de reflexión del modo de polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S[1,1]$ (línea azul) y del modo de polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S[3,3]$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en MWO.
- Figura 3.15 (a) Coeficiente de reflexión del modo de polarización con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado en campo electromagnético.
- Figura 3.16 (a) Coeficiente de reflexión del modo de polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S[1,1]$ (línea azul) y del modo de polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S[3,3]$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la optimización del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en MWO.

- Figura 3.17 (a) Coeficiente de reflexión del modo de polarización con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la optimización del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado en campo electromagnético.

- Figura 4.1 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia del substrato dieléctrico del material RO-5880 en el software especializado.
- Figura 4.2 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a las elipses de los diafragmas $S_{[5,5]}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela a las elipses de los diafragmas $S_{[6,6]}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia del substrato dieléctrico del material RO-5880 en MWO.
- Figura 4.3 (a) Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la optimización del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado.
- Figura 4.4 (a) Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado.

- Figura 4.5 (a) Pérdidas de retorno del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas con respecto a la frecuencia y (b) pérdidas de retorno del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas con respecto a la frecuencia, del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado.
- Figura 4.6 Razón axial con respecto a la frecuencia del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado.
- Figura 5.1 Plano de diez de las rondanas que componen al polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Figura 5.2 Plano de la rondana base que forma parte del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Figura 5.3 Rondanas y diafragmas elípticos, que forman al polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Figura 5.4 Dibujo de las máscaras de los diafragmas elípticos del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Figura 5.5 Máscaras fabricadas de los diafragmas elípticos del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Figura 5.6 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos armado.
- Figura 5.7 (a) Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas (línea roja) respecto a la frecuencia (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, del polarizador en guía de onda circular con diafragmas elípticos fabricado.
- Figura 5.8 Comparación de la magnitud del coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los

diafragmas respecto a la frecuencia, del polarizador teórico (línea azul) y del fabricado (línea roja).

- Figura 5.9 Comparación de la magnitud del coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas respecto a la frecuencia, del polarizador teórico (línea azul) y del fabricado (línea roja).
- Figura 5.10 Diferencia de fase respecto a la frecuencia del polarizador teórico y del fabricado.

Referencias de tablas.

- Tabla 2.1 Valores de ρ'_{nm} para los modos TE de una guía de onda circular [9].
- Tabla 2.2 Valores de ρ_{nm} para los modos TM de una guía de onda circular [9].
- Tabla 2.3 Características y resultados de los polarizadores con diafragmas elípticos iguales.
- Tabla 2.4 Características y resultados de los polarizadores con diafragmas elípticos con extremos diferentes.
- Tabla 2.5 Características y resultados de polarizadores con pares de diafragmas elípticos iguales.

- Tabla 3.1 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el primer diafragma de la simulación del polarizador en MWO.
- Tabla 3.2 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación que atraviesan el primer diafragma de la simulación del polarizador.
- Tabla 3.3 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el segundo diafragma de la simulación del polarizador en MWO.
- Tabla 3.4 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación que atraviesan el segundo diafragma de la simulación del polarizador.
- Tabla 3.5 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el tercer diafragma de la simulación del polarizador en MWO.
- Tabla 3.6 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación del tercer diafragma de la simulación del polarizador.
- Tabla 3.7 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el cuarto diafragma de la simulación del polarizador en MWO.

- Tabla 3.8 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación que atraviesan el cuarto diafragma de la simulación del polarizador.
- Tabla 3.9 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el quinto diafragma de la simulación del polarizador en MWO.
- Tabla 3.10 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación que atraviesan el quinto diafragma de la simulación del polarizador.
- Tabla 3.11 Características generales de la simulación del polarizador en MWO
- Tabla 3.12 Comparativa de resultados de la primera aproximación del polarizador.
- Tabla 3.13 Longitudes optimizadas para la tercera aproximación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Tabla 3.14 Comparativa de resultados de la simulación del polarizador.

- Tabla 4.1 Características del substrato RO-5880.
- Tabla 4.2 Inductancias y capacitancias del diafragma utilizado para la simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Tabla 4.3 Parámetros utilizados en la simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Tabla 4.4 Resultados de la aproximación final del polarizador
- Tabla 4.5 Parámetros utilizados en el diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Tabla 4.6 Medidas de los ejes de los diafragmas que componen el diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.
- Tabla 4.7 Resultados de la aproximación final del polarizador.
- Tabla 5.1 Medidas para la variable "A" y número de piezas requeridas para el polarizador.

CAPÍTULO I.- Introducción al polarizador.

Para iniciar con el análisis y diseño de un polarizador, es necesario revisar el concepto de polarización, entender el funcionamiento de un polarizador y examinar las características de los diferentes polarizadores existentes.

1.1 Polarización Electromagnética.

1.1.1 Definición.

De acuerdo con el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) , la polarización de una onda radiada está definida como "la propiedad de la onda electromagnética radiada de describir su dirección y magnitud relativa del vector de campo eléctrico con respecto a la variante tiempo; específicamente, la figura trazada como función del tiempo por el extremo del vector localizado en un punto fijo de interés en el espacio".[1]

En otras palabras, la polarización no es otra cosa que la variación de la magnitud y dirección del campo eléctrico en función del tiempo. Estas variaciones del campo son observadas a lo largo de la dirección de propagación de la onda.

Para entender el concepto básico de polarización de una onda, recurriremos al reconocido libro "*Advanced Engineering Electromagnetics*" [1]. Donde primeramente, se asume que el campo eléctrico (\vec{E}) se puede descomponer en E_x y E_y donde E_x y E_y son los campos eléctricos dirigidos a lo largo de la dirección del eje x y la dirección del eje y , respectivamente. Una vez asumido lo anterior, las variaciones en E_x y E_y son sinusoidales similares a \vec{E} . Para conseguir diferentes tipos de polarización para \vec{E} , se consideran diferentes condiciones para E_x y E_y .

Al considerar una onda plana armónica con los componentes x y y del campo eléctrico viajando en la dirección positiva de z . El campo eléctrico \vec{E} y el campo magnético \vec{H} instantáneos están dados por:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \widehat{a}_x E_x + \widehat{a}_y E_y = \text{Re}[\widehat{a}_x E_x^+ e^{j(\omega t - \beta z)} + \widehat{a}_y E_y^+ e^{j(\omega t - \beta z)}] \quad [V/m] \\ &= \widehat{a}_x E_{x_0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \varphi_x) + \widehat{a}_y E_{y_0}^+ \cos(\omega t - \beta z + \varphi_y)\end{aligned}\quad (1.1)$$

$$\begin{aligned}\vec{H} &= \widehat{a}_y H_y + \widehat{a}_x H_x = \text{Re}\left[\widehat{a}_y \frac{E_x^+}{\eta} e^{j(\omega t - \beta z)} - \widehat{a}_x \frac{E_y^+}{\eta} e^{j(\omega t - \beta z)}\right] \quad [A/m] \\ &= \widehat{a}_x \frac{E_{x_0}^+}{\eta} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_x) - \widehat{a}_y \frac{E_{y_0}^+}{\eta} \cos(\omega t - \beta z + \varphi_y)\end{aligned}\quad (1.2)$$

donde:

ω es la frecuencia angular de la onda,

β es la constante de fase, y

η es la impedancia intrínseca del medio.

Además E_{x_0} y E_{y_0} son valores complejos, en tanto $E_{x_0}^+$ y $E_{y_0}^+$ son valores reales.

1.1.2 Tipos de polarización.

La polarización se clasifica en lineal, circular y elíptica (fig. 1.1); sin embargo la polarización lineal y la polarización circular son casos especiales de la polarización elíptica, y pueden obtenerse cuando la elipse se convierte en una línea recta o en un círculo, respectivamente.

La trayectoria del extremo del vector de campo eléctrico puede ser dibujada en sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario. La rotación del vector de campo eléctrico en sentido de las manecillas del reloj es designada como polarización derecha y en sentido contrario es designada como polarización izquierda.

1.1.2.1 Polarización Lineal.

Si el vector que describe el campo eléctrico en función del tiempo, está siempre dirigido a lo largo de un eje, se dice que el campo está polarizado linealmente. La polarización horizontal, la polarización vertical y la polarización inclinada son formas de polarización lineal.

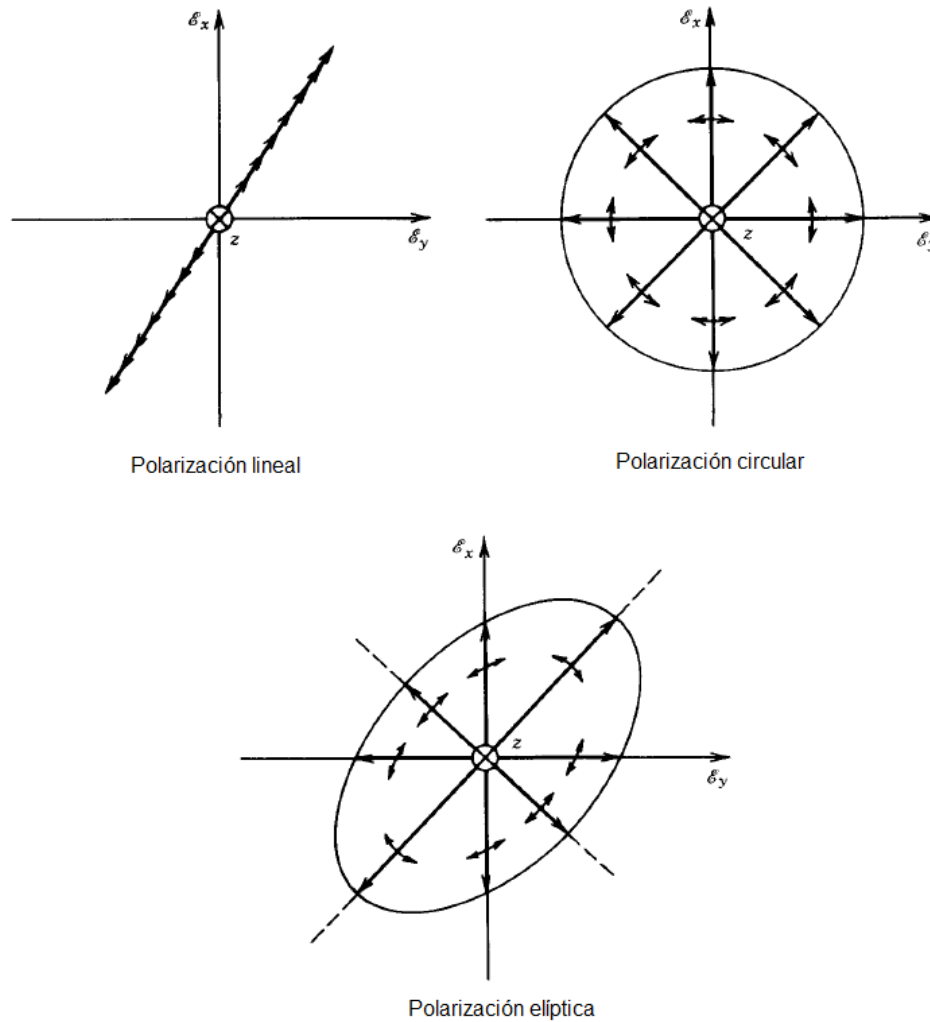


Figura 1.1 Tipos de polarización [1].

1.1.2.1.1 Polarización lineal vertical.

Se examina la variación del vector campo eléctrico dado por la ecuación 1.1 en el plano $z = 0$, esto es elegido por conveniencia y simplicidad. Sea $E_{y_0}^+ = 0$, entonces se tiene:

$$\vec{E} = \hat{a}_x E_{x_0}^+ \cos(\omega t + \phi_x) \quad (1.3)$$

La representación gráfica de la expresión 1.3 es una línea de campo siempre dirigida a lo largo del eje x en cualquier instante de tiempo, tal como se muestra en la figura 1.2. Por lo tanto, se dice que el campo está polarizado linealmente en la dirección x , lo que también se denomina polarización lineal vertical.

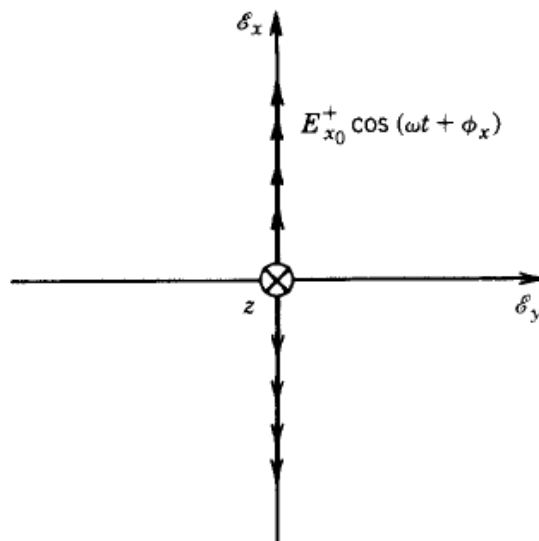


Figura 1.2 Polarización lineal vertical [1].

1.1.2.1.1 Polarización lineal horizontal.

Como en el caso anterior, se examina la variación del vector campo eléctrico dado por la ecuación 1.1, pero ahora cuando $E_{x_0}^+ = 0$, entonces se tiene:

$$\vec{E} = \hat{a}_y E_{y_0}^+ \cos(\omega t + \phi_y) \quad (1.4)$$

La representación gráfica de la ecuación 1.4, se puede ver como una línea dirigida a lo largo del eje y y todo el tiempo (fig. 1.3). Así tendremos que el campo tiene una polarización lineal en la dirección del eje y , también conocida como polarización lineal horizontal.

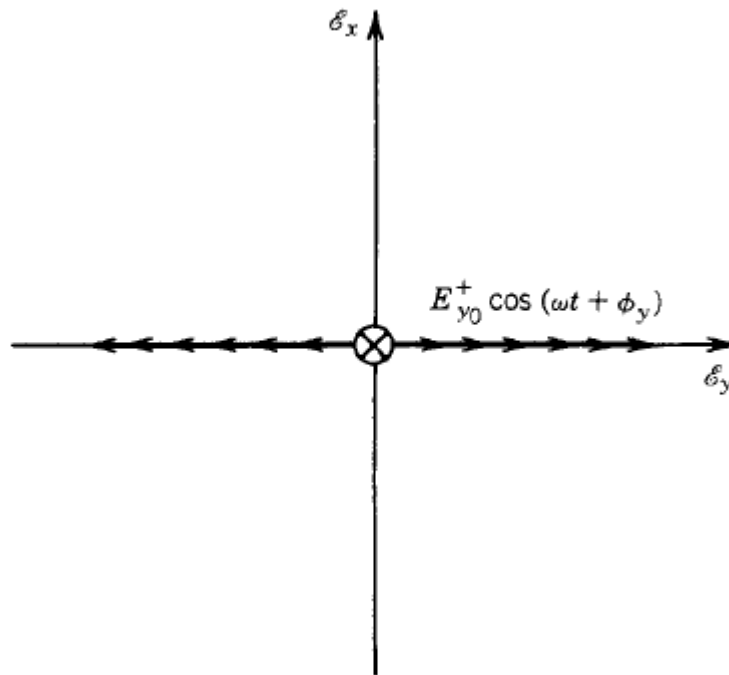


Figura 1.3 Polarización lineal horizontal [1].

1.1.2.1 Polarización lineal inclinada.

Nuevamente consideraremos la variación del vector campo eléctrico dada por la ecuación 1.1, pero ahora se tendrá la condición $\varphi_x = \varphi_y = \varphi$, de lo anterior obtenemos:

$$\vec{E} = \hat{a}_x E_{x_0}^+ \cos(\omega t + \varphi) + \hat{a}_y E_{y_0}^+ \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.5)$$

La amplitud del vector de campo eléctrico está dada por:

$$E = \sqrt{(E_{x_0}^+ \cos(\omega t + \phi))^2 + (E_{y_0}^+ \cos(\omega t + \phi))^2}$$

$$E = \sqrt{(E_{x_0}^+)^2 + (E_{y_0}^+)^2} \cos(\omega t + \phi) \quad (1.6)$$

En la figura 1.4 se puede observar una línea recta durante todo el tiempo, que forma un ángulo ψ respecto al eje x. Este ángulo está dado por:

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{E_y}{E_x} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{E_{y_0}^+}{E_{x_0}^+} \right] \quad (1.7)$$

Se dice que el campo está polarizado linealmente en dirección ψ .

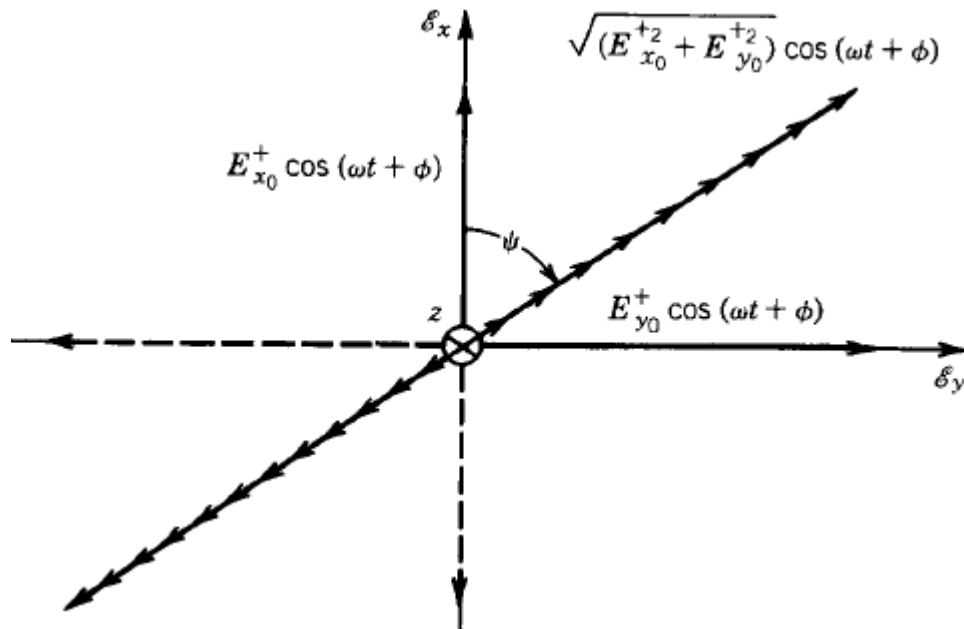


Figura 1.4 Polarización lineal inclinada [1].

Podemos ver que en la polarización lineal inclinada existen dos componentes ortogonales con polarización lineal y con la misma fase interactuando mutuamente, es decir, una componente tendrá polarización horizontal mientras

que la otra será de polarización vertical y a la vez las dos componentes tendrán la misma fase.

1.1.2.2 Polarización Circular.

Si el vector de polarización de campo eléctrico gira 360° a medida que la onda recorre una longitud de onda por el espacio, y la intensidad de campo es igual en todos los ángulos, se dice que la onda tiene polarización circular.

Las condiciones necesarias para tener una polarización circular son:

1. El campo eléctrico debe tener dos componentes ortogonales polarizadas linealmente.
2. Las dos componentes deben tener igual magnitud.
3. Las dos componentes debe tener una diferencia de fase en múltiplos de 90° .

El sentido de rotación es siempre determinado por el giro de la componente adelantada en fase hacia la componente retrasada en fase y observando la rotación del campo cuando la onda viaja alejándose del observador. Las fases iguales o mayores a 0° y menores a 180° se consideran adelantadas, en cambio cuando las fases son iguales o mayores a 180° y menores a 360° se consideran como retrasadas.

1.1.2.2.1 Polarización circular derecha.

Se dice que una onda tiene una polarización circular derecha si el vector de campo eléctrico tiene sentido de rotación de acuerdo con las manecillas del reloj. Además, el vector de campo eléctrico debe trazar una figura circular cuando se observa en el plano de propagación.

Este tipo de polarización se puede explicar por medio del vector de campo eléctrico instantáneo en el plano $z = 0$ para cualquier instante de tiempo. Un ejemplo es:

$$\begin{aligned}\varphi_x &= 0 \\ \varphi_y &= -\pi/2 \\ E_{x_0}^+ &= E_{y_0}^+ = E_R\end{aligned}$$

Entonces,

$$E_x = E_R \cos(\omega t) \quad (1.8)$$

$$E_y = E_R \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_R \text{sen}(\omega t) \quad (1.9)$$

La amplitud del vector de campo eléctrico está dada por:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{E_R^2(\cos^2 \omega t + \text{sen}^2 \omega t)} = E_R \quad (1.10)$$

y es dirigida a lo largo de la línea formando un ángulo ψ con el eje x , el cual está dado por:

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{E_y}{E_x} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{E_R \text{sen}(\omega t)}{E_R \cos(\omega t)} \right] = \tan^{-1}[\tan(\omega t)] = \omega t \quad (1.11)$$

Si se dibuja la gráfica del vector de campo eléctrico para varios instantes de tiempo en el plano donde $z = 0$, veremos que se forma un círculo de radio E_R y el sentido de rotación sigue el sentido de las manecillas de reloj con una frecuencia angular ω , como se muestra en la figura 1.5. Entonces se puede decir que la onda tiene una polarización circular derecha, pues consideramos la rotación vista desde la parte trasera de la dirección de propagación de la onda.

Podemos escribir la expresión del vector de campo eléctrico instantáneo como:

$$\vec{E} = \text{Re} \left[\hat{a}_x E_R e^{j(\omega t - \beta z)} + \hat{a}_y E_R e^{j(\omega t - \beta z - \frac{\pi}{2})} \right]$$

$$= E_R \operatorname{Re}\{[\widehat{a}_x - j\widehat{a}_y]e^{j(\omega t - \beta z)}\} \quad (1.12)$$

Es importante resaltar que la diferencia de fase entre las dos componentes ortogonales del vector de campo eléctrico es 90° .

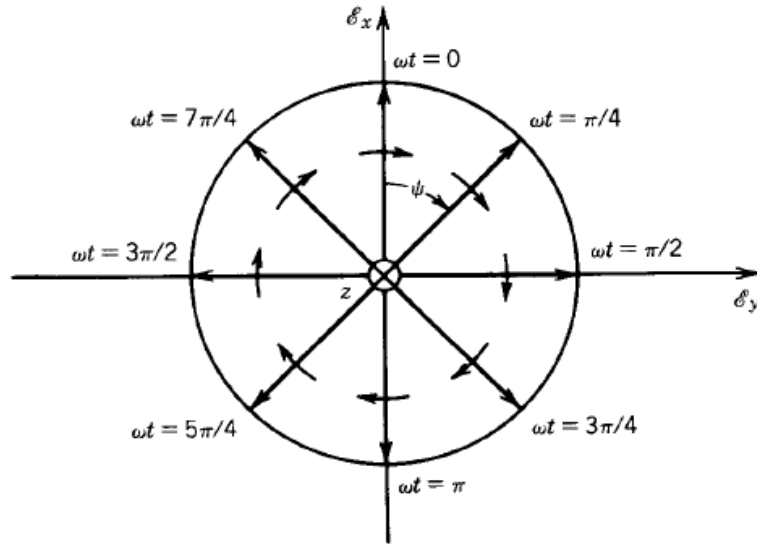


Figura 1.5 Polarización circular derecha [1].

1.1.2.2.1 Polarización circular izquierda.

Si el vector de campo eléctrico tiene su rotación en sentido contrario al movimiento de las manecillas de reloj, se dice que la polarización es izquierda. Esto se puede ver con ayuda de la ecuación 1.1 y considerando:

$$\begin{aligned} \varphi_x &= 0 \\ \varphi_y &= \pi/2 \\ E_{x_0}^+ &= E_{y_0}^+ = E_L \end{aligned}$$

entonces

$$E_x = E_L \cos(\omega t) \quad (1.13)$$

$$E_y = E_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -E_L \operatorname{sen}(\omega t) \quad (1.14)$$

y la amplitud es:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{E_L^2(\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t)} = E_L \quad (1.15)$$

Mientras que el ángulo ψ , está dado por:

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{E_y}{E_x} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{E_L \sin(\omega t)}{E_L \cos(\omega t)} \right] = \tan^{-1}[\tan(\omega t)] = -\omega t \quad (1.16)$$

Vamos a ver que el vector de campo eléctrico describe un círculo de radio E_L , con un sentido de rotación que sigue el movimiento contrario a las manecillas del reloj y una frecuencia angular ω , tratándose así de una polarización circular izquierda (fig. 1.6).

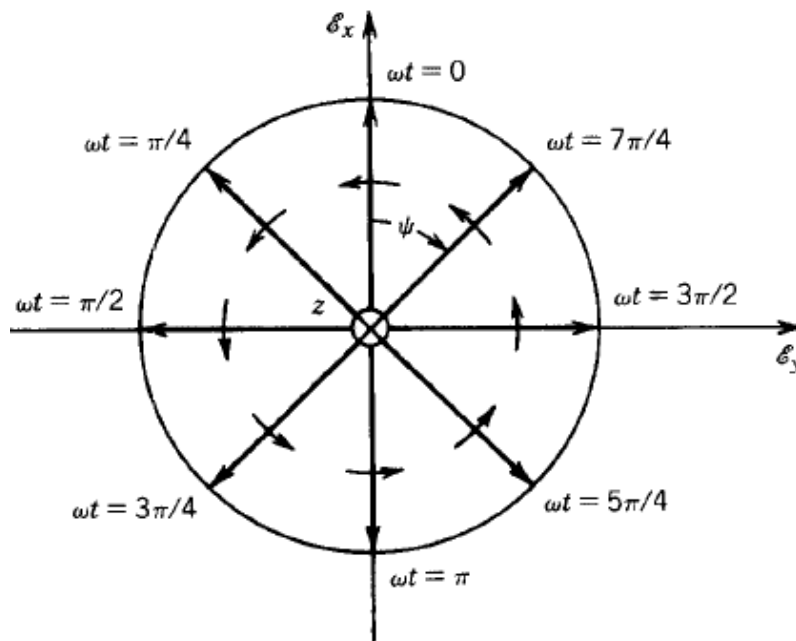


Figura 1.6 Polarización circular izquierda [1].

Finalmente vamos a describir la expresión del vector de campo eléctrico instantáneo como:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \text{Re}[\widehat{a}_x E_L e^{j(\omega t - \beta z)} + \widehat{a}_y E_L e^{j(\omega t - \beta z + \pi/2)}] \\ &= E_L \text{Re}\{[\widehat{a}_x + j\widehat{a}_y] e^{j(\omega t - \beta z)}\}\end{aligned}\quad (1.17)$$

Se debe notar que la componente E_y está adelantada en fase 90° respecto a la componente E_x . El sentido de rotación contrario al movimiento de las manecillas del reloj se determina por la rotación del componente adelantado en fase, en nuestro ejemplo, E_y girando hacia la componente retrasada en fase E_x .

1.1.2.3 Polarización Elíptica.

La polarización elíptica se conoce así porque el vector de campo eléctrico describe una elipse en el espacio; debido a que el vector de campo eléctrico cambia constantemente en el tiempo.

Igual que en la polarización circular, si el vector de campo eléctrico de la elipse rota en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj cuando la onda viaja alejándose del observador, se tiene una polarización elíptica derecha; de lo contrario se tendrá una polarización elíptica izquierda. Para este caso examinaremos el vector de campo eléctrico instantáneo en el plano $z=0$ y partiendo de la ecuación 1.1:

$$\varphi_x = \pi/2$$

$$\varphi_y = 0$$

$$E_{x_0}^+ = (E_R + E_L)$$

$$E_{y_0}^+ = (E_R - E_L)$$

entonces

$$E_x = (E_R + E_L) \cos(\omega t + \pi/2) = -(E_R + E_L) \text{sen}(\omega t) \quad (1.18)$$

$$E_x = (E_R - E_L) \cos(\omega t) \quad (1.19)$$

y la amplitud del campo eléctrico es:

$$\begin{aligned}
E^2 &= E_x^2 + E_y^2 = ((E_R + E_L) \sen(\omega t))^2 + ((E_R - E_L) \cos(\omega t))^2 \\
E^2 &= E_R^2 \sen^2(\omega t) + E_L^2 \sen^2(\omega t) + 2E_R E_L \sen^2(\omega t) \\
&\quad + E_R^2 \cos^2(\omega t) + E_L^2 \cos^2(\omega t) - 2E_R E_L \cos^2(\omega t) \\
E_x^2 + E_y^2 &= E_R^2 + E_L^2 + 2E_R E_L [\sen^2(\omega t) - \cos^2(\omega t)] \tag{1.20}
\end{aligned}$$

Sin embargo,

$$\sen(\omega t) = -E_x / (E_R + E_L) \tag{1.21}$$

$$\cos(\omega t) = E_y / (E_R - E_L) \tag{1.22}$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.21 y 1.22 en 1.20 y reduciendo tenemos:

$$\{E_x / (E_R + E_L)\}^2 + \{E_y / (E_R - E_L)\}^2 = 1 \tag{1.23}$$

Se puede ver que la ecuación anterior, es la expresión de una elipse, donde el eje mayor es $|E_{m\acute{a}x}| = |E_R + E_L|$ y el eje menor es $|E_{m\acute{i}n}| = |E_R - E_L|$.

La razón axial (AR) está definida como la razón del eje mayor con respecto al eje menor de la polarización elíptica.

$$AR = -\frac{E_{m\acute{a}x}}{E_{m\acute{i}n}} = -\frac{(E_R + E_L)}{(E_R - E_L)} \tag{1.24}$$

Cuando la razón axial toma valores positivos se trata de una polarización elíptica izquierda y cuando toma valores negativos tenemos una polarización elíptica derecha.

El vector de campo eléctrico instantáneo puede escribirse como:

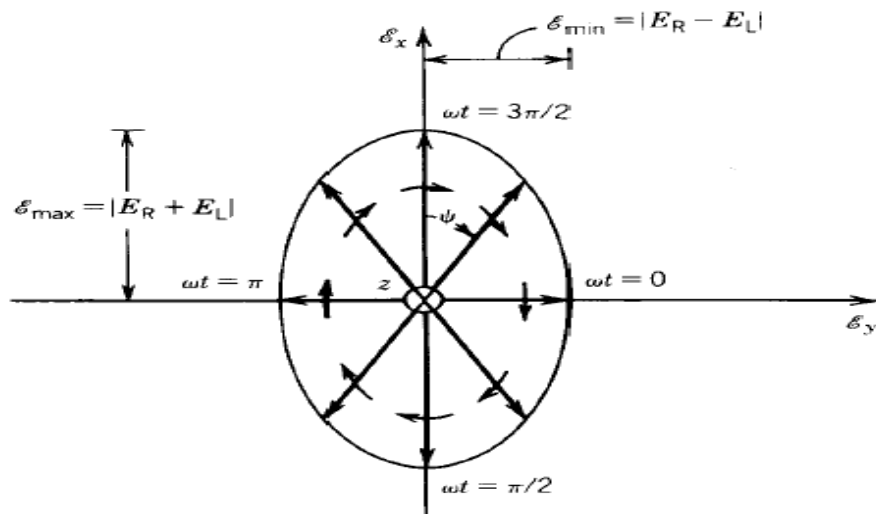
$$\begin{aligned}
\vec{E} &= Re \left[\widehat{a}_x [E_R + E_L] e^{j(\omega t - \beta z + \frac{\pi}{2})} + \widehat{a}_y [E_R - E_L] e^{j(\omega t - \beta z)} \right] \\
\vec{E} &= Re \left\{ [\widehat{a}_x j [E_R + E_L] + \widehat{a}_y [E_R - E_L]] e^{j(\omega t - \beta z)} \right\}
\end{aligned}$$

$$\vec{E} = \text{Re}\{[E_R(j\hat{a}_x + \hat{a}_y) + E_L(j\hat{a}_x - \hat{a}_y)]e^{j(\omega t - \beta z)}\} \quad (1.25)$$

Podemos observar que la ecuación 1.25 está compuesta por la suma de ondas polarizadas circularmente; una con polarización circular derecha (primer término) y la otra con polarización circular izquierda (segundo término), con amplitudes E_R y E_L , respectivamente.

1.1.2.3.1 Polarización elíptica derecha.

Si $E_R > E_L$, la razón axial será negativa y la componente con polarización circular derecha será mayor que la de polarización circular izquierda, ocasionando que el vector de campo eléctrico gire en sentido de las manecillas del reloj, a la polarización de esta onda se le llama polarización elíptica derecha (fig. 1.7).



-Figura 1.7 Polarización elíptica derecha [1].

1.1.2.3.2 Polarización elíptica izquierda.

Si $E_L > E_R$, la razón axial será positiva y la componente con polarización circular izquierda será mayor que la de polarización circular derecha, lo que hará que el

vector de campo eléctrico gire en sentido contrario al de las manecillas del reloj, lo que se conoce como polarización elíptica izquierda (fig. 1.8)

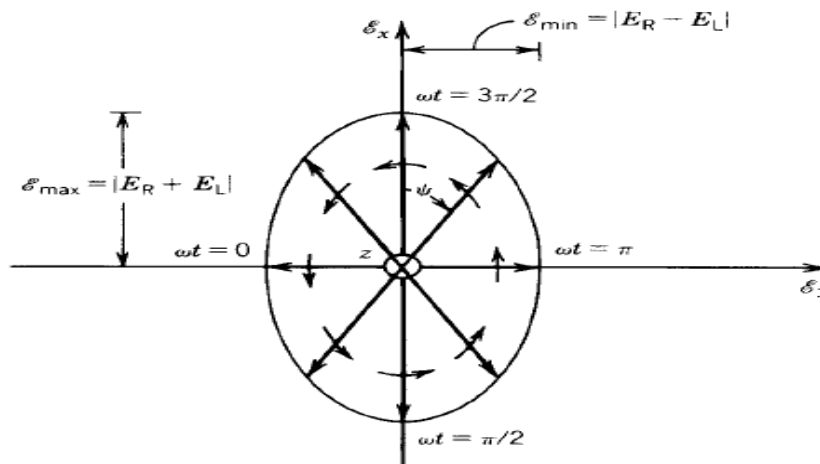


Figura 1.8 Polarización elíptica izquierda [1].

1.2 Polarizador.

Los polarizadores son dispositivos que alteran el cambio de fase de una componente de la onda de manera controlada, convierten la polarización lineal en polarización circular o viceversa y a la vez son capaces de distinguir entre la polarización circular derecha y la polarización circular izquierda.

En los sistemas de alimentación de las antenas se usan polarizadores con desfase de 90° (polarizador de 90°) y con 180° (polarizador de 180°). Los primeros para convertir ondas polarizadas linealmente en ondas polarizadas circularmente y viceversa. Los segundos causan rotación del plano de polarización de una onda polarizada linealmente (el plano de polarización está definido por el vector de polarización y la dirección de propagación de la onda). Las principales aplicaciones de estas antenas son las comunicaciones de microondas, sistemas de radar e investigación de los efectos meteorológicos.

La función del polarizador es crear una diferencia de fase de 90° entre las componentes polarizadas linealmente, con la finalidad de obtener en el puerto de salida del polarizador una onda con polarización circular, donde estén combinadas

las dos señales de los campos ortogonales sin que se interfieran entre sí, ya que existirán 90° de diferencia de fase entre ellos, por lo tanto cuando una de las componentes obtenga su valor máximo de campo eléctrico, la otra componente obtendrá su valor mínimo.

El método más empleado para lograr esta diferencia de fase es, hacer que uno de los campos ortogonales atraviese la guía de onda sin modificaciones, mientras que el otro componente ortogonal será retrasado 90° con respecto al anterior por medio de materiales dieléctricos. Este método es sencillo porque solo se analiza el comportamiento de una de las componentes.

Otro método implica asegurar el comportamiento específico de ambas componentes, de tal manera que a la salida del dispositivo se obtenga una diferencia de fase de 90° entre ambas componentes ortogonales. Esto se puede conseguir al exponer los campos eléctricos ortogonales a los efectos provocados por alteraciones en la guía de onda, estas alteraciones se pueden deber a cambios en las dimensiones de la guía de onda, combinar diferentes materiales dieléctricos, inserción de elementos metálicos en la guía de onda, etc.

1.2.1 Funcionamiento.

La geometría del polarizador basado en una guía de onda circular, se puede ver como una sección de una guía de onda circular modificada, donde se aseguran las diferentes condiciones de propagación para dos componentes ortogonales del campo eléctrico. En el puerto de entrada del polarizador se recibe una onda con campo eléctrico polarizado linealmente E^i (onda incidente), la cual es dividida en dos componentes de igual magnitud E^\perp y E^\parallel que mantienen su polarización lineal pero que son ortogonales entre sí (fig. 1.9). Y debido a las diferentes condiciones de propagación para componentes ortogonales del polarizador, aparece una diferencia de fase de 90° entre ellas, asegurando así la polarización circular en la salida del polarizador.

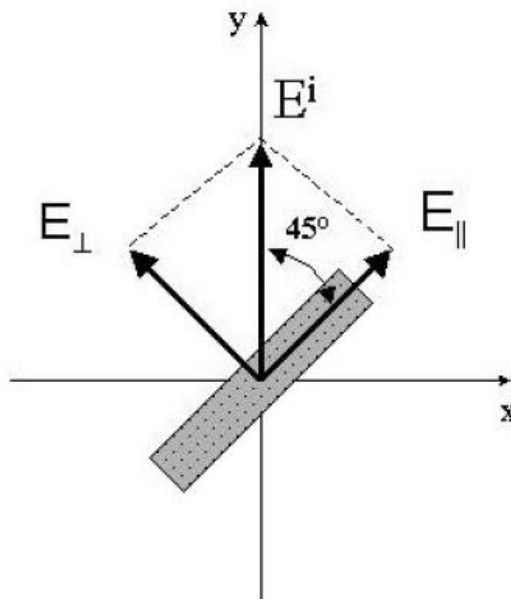


Figura 1.9 Onda incidente E_i dividida en dos componentes ortogonales [4].

1.2.2 Aplicaciones.

En los sistemas de comunicación moderna y en las antenas de radar se utilizan sistemas de alimentación altamente sofisticados. El diseño en la alimentación de la antena es un punto crítico para su desempeño. Al trabajar con señales de microondas, el medio común de transmisión es la guía de onda, principalmente debido a su poca pérdida en frecuencias de microondas y su alta capacidad para manejar ondas de alta potencia

En las antenas el polarizador es un elemento que va situado entre el alimentador y el LNB (Low Noise Block) y, en el caso de que las ondas electromagnéticas sean de polarización circular, el polarizador forma parte del alimentador, para que rechacen en cada caso la polarización no deseada.

1.2.3 Tipos de Polarizadores.

A continuación se presenta un breve análisis de algunos resultados publicados por IEEE realizados con polarizadores, esto tiene como finalidad comparar las

características que se obtienen en cada uno; además se observará que cada polarizador tiene un diseño específico, es decir, se tienen diferentes alteraciones en la línea de transmisión para afectar la fase del campo eléctrico para uno o ambos planos de polarización.

1.2.3.1 Tipos de Polarizadores en guía de onda circular.

Los polarizadores basados en guías de onda se utilizan para convertir la polarización de una señal de lineal a circular, los polarizadores convencionales pueden dividirse en dos grupos.

El primer grupo comprende dispositivos que convierten las ondas que inciden por el primer puerto con polarización circular derecha (RHCP) y circular izquierda (LHCP) a ondas polarizadas linealmente en el segundo puerto, este último de sección transversal cuadrangular o una sección transversal circular. La separación final de la señal (por ejemplo, en RHCP y en LHCP) se realiza por medio de un transductor ortomodal (OMT) secuencial que suministra las señales de salida a dos puertos de guía de ondas separadas.

El segundo grupo está representado por polarizadores septum, es decir, dispositivos con tres puertos de interfaz física que pueden ser utilizados para alimentar la guía de onda cuadrada (o circular), de tal forma que se excitan tanto señales LHCP o RHCP. Su entrada consiste típicamente de dos puertos de guía de ondas rectangulares mientras que su salida puede tener lugar en una guía de onda cuadrada o circular, la última solución es comúnmente adoptada por la facilidad de diseño y la fabricación circular. Ambos grupos de polarizadores, a pesar de exhibir sólo dos y tres puertos físicos de interfaz, representan dispositivos de cuatro puertos. En nuestro caso sólo se estudiarán polarizadores pertenecientes al primer grupo.

1.2.3.1.1 Polarizador basado en guía de onda circular con placa longitudinal dieléctrica.

En el artículo “A circular Polarizer Designed with a Dielectric Septum Loading” [5] el polarizador se realiza con la colocación de una placa longitudinal dieléctrica en el centro de la guía de onda circular, con el fin de conseguir la diferencia de fase entre los modos ortogonales. El diseño es simple y eficaz, pero al poner una placa en el centro se podría introducir gran reflexión; sin embargo dicha placa también puede introducir una polarización circular.

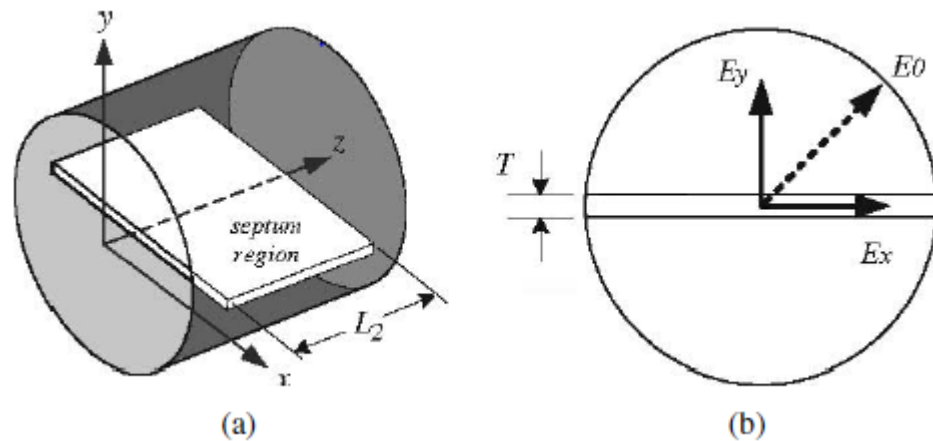


Figura 1.10. Vista esquemática del polarizador basado en guía de onda circular con placa transversal dieléctrica. (a) Vista tridimensional. (b) Vista frontal [5].

En la figura 1.10(b) se muestra una onda incidente E_0 con polarización orientada a 45° en relación con la placa transversal dieléctrica. Esta onda se puede descomponer en dos proyecciones ortogonales iguales (paralela y perpendicular a la placa longitudinal). Las dos componentes entonces se propagan a través de la región de la placa dieléctrica con poca reflexión debido a la pequeña discontinuidad que representa la placa. En la región de la placa, la constante de propagación β_x de la componente E_x es fuertemente perturbada por la placa de dieléctrico debido a que la línea de campo eléctrico es paralela a la placa. Por otra

parte, la constante de propagación β_y de la componente E_y está débilmente perturbada porque la línea de campo eléctrico es perpendicular a la placa.

En el artículo también se establece que este tipo de polarizador puede ser implementado basado en la elección de una adecuada longitud de la placa dieléctrica (L_2) a fin de lograr una diferencia de fase de 90° en el puerto de salida.

El radio la guía de onda tiene que caer en el intervalo de 1,58 a 1,83 mm para acomodarse a una frecuencia de operación, que oscile desde 60 hasta 62,25 GHz. mientras que la placa dieléctrica se realiza con Teflón, el cual tiene una constante dieléctrica de 2,2 y tiene un grosor (T) de 0,254 cm.

El criterio para seleccionar el radio es calcular las variables β_x y β_y variando el radio de la guía de onda y determinar el valor del radio en donde la diferencia de $\beta_x - \beta_y$ sea casi contante e insensible a la frecuencia. Los resultados de estos cálculos se muestran en la figura 1.11; donde se puede ver que con un radio (R) de 1.79 mm se tiene una respuesta constante.

Para determinar la longitud de la placa dieléctrica se considera:

$$(\beta_x - \beta_y)(L_2) = 90^\circ \quad (1.26)$$

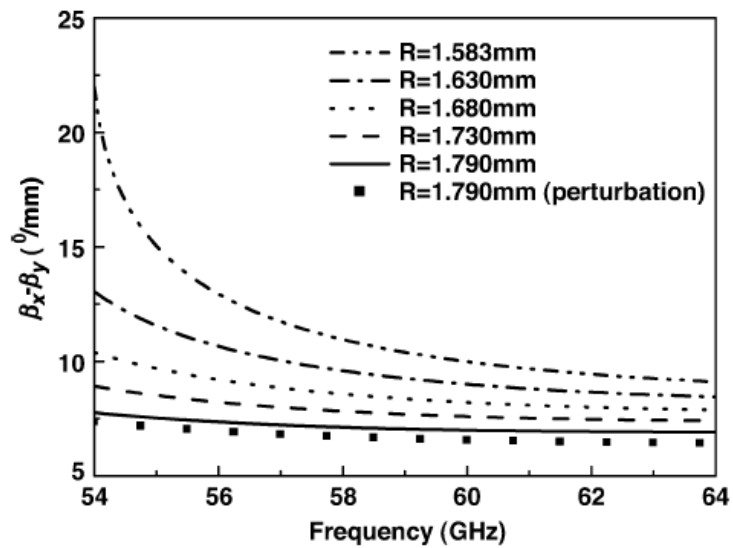


Figura 1.11. Diferencia de las constantes de propagación respecto a la frecuencia, variando el radio (R) de la guía de onda [5].

De esta forma obtuvieron, una longitud de la placa dieléctrica de 12.9 mm., además de los siguientes resultados: relación axial menor que 0.5 dB, la diferencia de fase es plana y cercana a 90° en el rango de frecuencia de 60 a 62,25 GHz. En tanto que las pérdidas de retorno son mejores que -13 dB para ambas polarizaciones ($E_x - E_y$), en el mismo rango de frecuencia.

1.2.3.1.2 Polarizador basado en guía de onda circular con discos dieléctricos.

En el artículo “*Wide-Band Polarizer in Circular Waveguide Loaded with Dielectric Discs*” [6], se trabaja con una guía de onda circular con discos dieléctricos colocados periódicamente (fig. 1.12), los cuales afectan fuertemente el modo dominante (TE-11), pero tienen poco efecto sobre el modo (TM-01) que normalmente limita el ancho de banda.

En la figura 1.13, se observa la comparación de la frecuencia de corte de los primeros modos de propagación, tanto para una guía de onda uniforme, como para una guía de onda cargada con discos dieléctricos. Lo más relevante es la separación entre los modos TE-11 y TM-01; pues en el primer caso el ancho de banda útil se ve limitado por el modo TM-01, mientras que en el segundo el ancho de banda queda limitado por el modo TE-21. Lo anterior beneficia al ancho de banda útil, además que se puede pensar en la guía de onda con discos dieléctricos como un cilindro de metal del mismo diámetro, completamente llena de la constante k_e .

$$k_e \cong 1 + (k_d - 1) \frac{t}{d} \quad (1.27)$$

Donde k_d es la constante dieléctrica del disco, t es el espesor del disco y d es el espaciado entre discos. Con discos circulares, k_e es la misma en todos los planos de polarización. La forma del disco puede ser modificada para obtener diferentes valores de k_e .

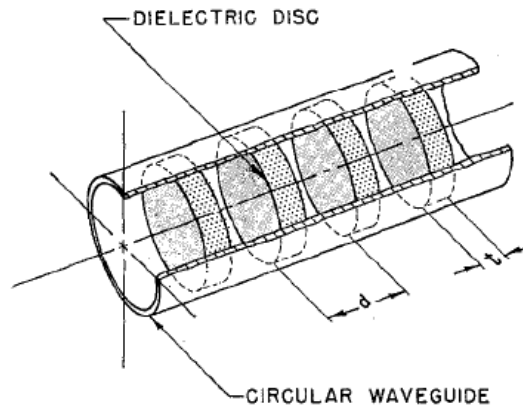


Figura 1.12. Polarizador basado en guía de onda circular con discos dieléctricos [6].

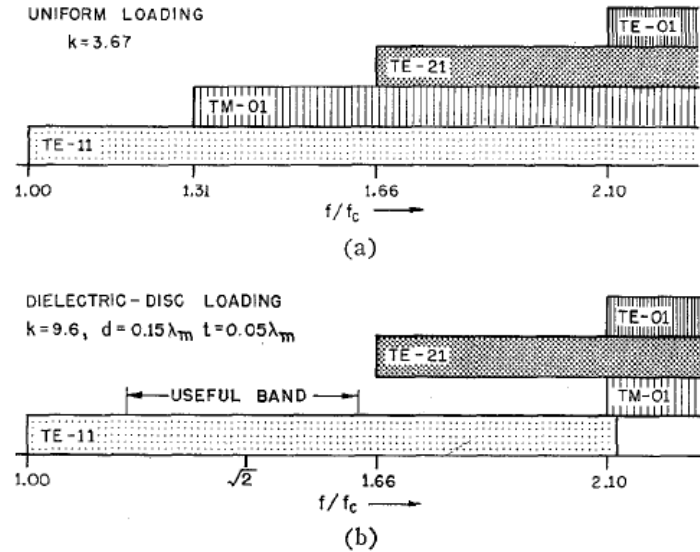


Figura 1.13. Frecuencia de corte para los modos de propagación. (a) Modos de propagación en una guía de onda circular (b) Modos de propagación para una guía de onda cargada con discos dieléctricos[6].

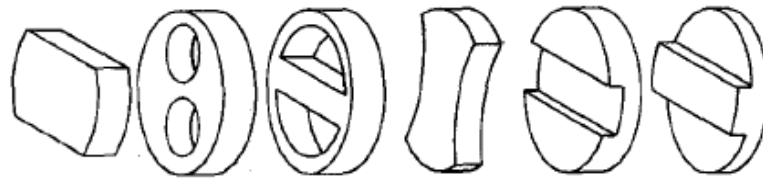


Figura 1.14. Configuraciones posibles para los discos [6].

La Figura 1.14 muestra algunas de las formas posibles de los discos dieléctricos, de las cuales la seleccionada fue la primera forma. Además, el diseño desarrollado tiene una separación entre los centros de los discos del polarizador de $0.15 \lambda_0$. El material del disco es alúmina sinterizada de alta densidad y pureza, con una constante dieléctrica de 9.6. Se muestra que tres o cuatro discos serían adecuados para el polarizador, para una banda de frecuencia de 15 %; en este caso eligieron cuatro discos idénticos.

Como resultados se exhibió una relación axial 0.3 dB y una diferencia de fase de $90 \pm 1^\circ$ a través de un ancho de banda del 15 %. Sin embargo la capacidad de potencia del modelo desarrollado es modesto, pero útil para aplicaciones de transmisor.

1.2.3.1.3 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Los polarizadores basados en guía de onda, se han realizado hasta ahora mediante el uso de guías de ondas cuadradas o circulares con la inserción de diversos tipos de discontinuidades, tal como se ilustra en la figura 1.15 (a) y 1.15(c). El uso de la guía de onda circular con diafragmas, como en la figura 1.15 (a) y 1.15 (b), provoca dificultades desde el punto de vista de modelado ya que las secciones transversales del diafragma no son separables. Por otro lado, los polarizadores basados en guía de onda cuadrada con diafragmas rectangulares (fig. 1.15 (c)) son extremadamente adecuados para el modelado electromagnético de campo, pero generalmente requieren además de una transición de guía de onda cuadrada-a-circular, ya que la alimentación generalmente se realiza con guías de onda circulares.

Una posible solución diferente es utilizar una guía de onda de apoyo de forma circular con diafragmas elípticos, como en la figura 1.15 (d), esta posible solución es la llevada a cabo en el artículo "*Full-Wave Design and Optimization of Circular Waveguide Polarizers with Elliptical Irises*" [7],

En la figura 1.16 se ilustra el comportamiento de un polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos. Un campo incidente puede ser considerado como la superposición de dos campos, uno con polarización vertical y uno con polarización horizontal. El campo eléctrico polarizado verticalmente se propaga a lo largo de una línea de transmisión con (esencialmente) discontinuidades capacitivas, mientras que el campo polarizado horizontalmente se propaga a lo largo de una línea de transmisión con discontinuidades inductivas.

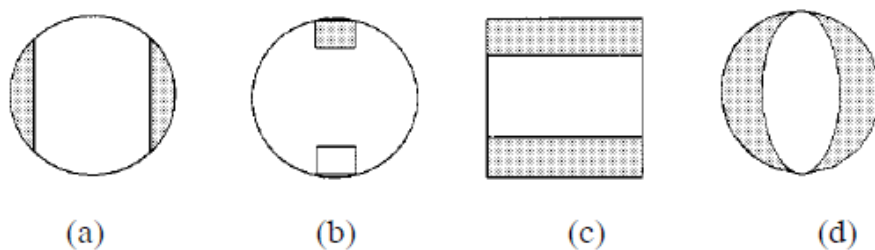


Figura 1.15. Tipos de discontinuidades de iris en un polarizador de guía de ondas. (a) Polarizador de guía de ondas circular con un clásico iris. (b) Polarizador basado en guía de onda circular surcada. (c) Polarizador basado en guía de onda cuadrada con diafragma rectangular. (d) Polarizador basado en guía de onda circular con diafragma elíptico [7].

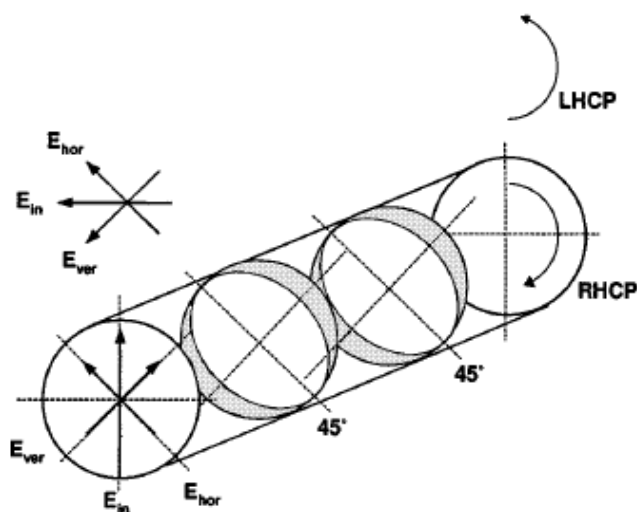


Figura 1.16. Principio de funcionamiento del polarizador. Un campo incidente vertical, produce una RHCP, mientras que un campo incidente horizontal produce una LHCP [7].

Al final del polarizador, después de un cierto número de diafragmas (en esta figura, sólo dos diafragmas se reproducen para mayor claridad), los campos eléctricos tienen una diferencia de fase de 90° , por lo tanto, se producirá la polarización circular buscada. Una RHCP (Polarización Circular Derecha) o una LHCP (Polarización Circular Izquierda) se producen en función de la dirección del campo incidente, como se ilustra en la figura 1.16.

Naturalmente, el polarizador también actúa como un discriminador de polarización: cuando un RHCP (LHCP) incide sobre el componente del lado derecho (fig. 1.16), un campo de polarización lineal, se produce como se muestra en la figura.

El polarizador es simétrico a lo largo de la dirección longitudinal (dirección de propagación), por lo que sólo la mitad de la estructura tiene que ser considerada. Como es de esperarse, con el fin de calcular la diferencia de fase entre las dos polarizaciones, son necesarios dos análisis, uno para cada polarización. A partir de estos dos análisis, se recuperan los parámetros de dispersión, en este caso los de transmisión S_{21}^H y S_{21}^V , de los cuales se calcula la diferencia fase como:

$$\Delta\phi = \angle S_{21}^H - \angle S_{21}^V$$

El modelo del polarizador diseñado contiene 6 diafragmas elípticos, a continuación se muestran las medidas utilizadas:

- Diámetro de la guía de onda=26 mm
- Espesor del diafragma=6.44 mm (igual para todos);
- Separación entre diafragmas= 6.12mm (uniforme);
- Diafragma 1: eje mayor=40.41 mm; menor=36.30 mm;
- Diafragma 2: eje mayor= 40.41mm; menor= 31.46 mm;
- Diafragma 3: eje mayor=40.41mm; menor=29.32 mm.

Sólo se muestran las medidas de 3 diafragmas, recordando que el polarizador es simétrico. Y tiene como resultados: una banda útil que va de 7.75 GHz a 8.55 GHz, con una diferencia de fase de $90^\circ \pm 2^\circ$ y un coeficiente de reflexión menor a -37 dB para ambas polarizaciones.

1.2.3.1.4 Polarizador basado en guía de onda circular con optimización de diafragmas elípticos.

Durante la realización del artículo “*Optimum-Iris-Set Concept for Waveguide Polarizers*” [8], encontraron que en algunos casos la diferencia de fase de un polarizador, tiene en su comportamiento en frecuencia un punto estacionario que conduce a diseños de polarizadores con errores de fase muy bajos. Desafortunadamente, este punto estacionario ocurre en una parte precisa, además este valor depende del tipo de discontinuidad y no puede ser modificado mediante la variación de otros parámetros de diseño (espesor del diafragma, número de diafragmas y espaciamentos), sin aumentar el error de fase y el coeficiente de reflexión.

Existen novedosos perfiles para los diafragmas elípticos de los polarizadores basados en guía de onda circular (fig. 1.17). Cuando se dan 2° de libertad para controlar mejor el comportamiento en frecuencia de la diferencia de fase, se puede encontrar un conjunto de diafragmas óptimos mediante la selección de discontinuidades. Este conjunto de diafragmas pueden ser identificados por medio de la relación r/λ_0 , donde r es el radio de la guía de onda y λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre en la frecuencia central.

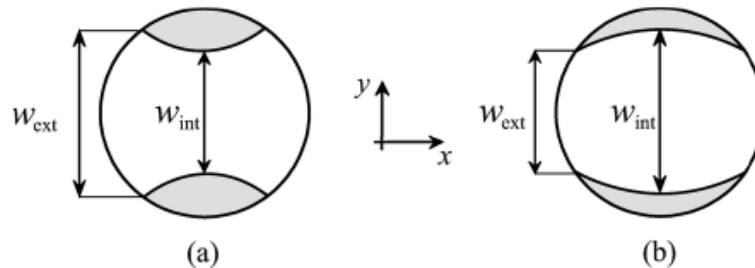


Figura 1.17. Diafragmas elípticos (a) Apertura cóncava. (b) Apertura convexa [8].

El polarizador basado en guía de onda circular diseñado [8] tiene 8 diafragmas para los cuales se utilizó el concepto de optimización. La frecuencia central es de 32 GHz, el ancho de banda es del 10 % y el radio de la guía de onda tiene un

valor igual a 4.1 mm ($r/\lambda_0 \approx 0.44$). Asimismo, exhibe un coeficiente de reflexión menor que -55 dB en la banda útil para ambas polarizaciones (fig. 1.18) y un error de fase de 0.9° (fig. 19).

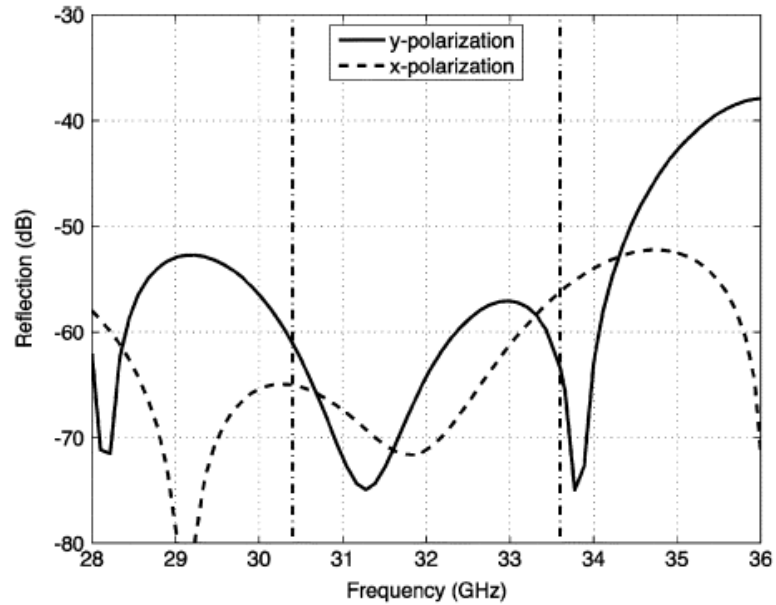


Figura 1.18. Coeficiente de reflexión respecto a la frecuencia del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos optimizados [8].

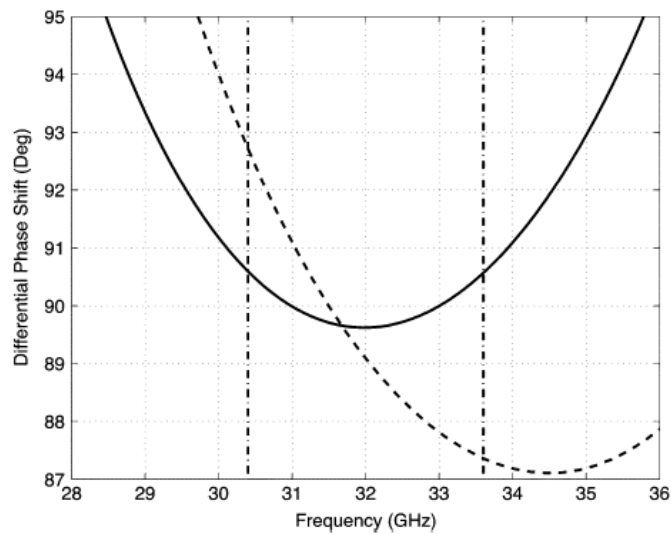


Figura 1.19. Diferencia de fase con respecto a la frecuencia del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos optimizados [8].

1.3 Conclusiones del capítulo.

Con el objetivo de diseñar un polarizador de banda ancha, se ha realizado:

- El análisis del funcionamiento de un polarizador.
- La investigación de los tipos de polarizadores mostrados en algunos artículos del IEEE.
- Con base en una comparación de los artículos del IEEE y a las características que se buscan obtener del polarizador, se eligió el polarizador a diseñar, para lo cual se consideró que:

Los polarizadores basados en guía de onda circular con discos dieléctricos y los polarizadores basados en guía de onda circular con placa longitudinal presentan un estrecho ancho de banda con respecto a los polarizadores basados en guía de onda circular con diafragmas elípticos. Además estos últimos presentan la ventaja de ser robustos y precisos; pero tienen la desventaja de que requieren procesos especiales de fabricación.

Por lo tanto, como se busca diseñar y fabricar un polarizador de banda ancha en banda Ka; en este trabajo se utiliza como primera aproximación de diseño del polarizador del diseño ejemplificado en el artículo “*Full-Wave Design and Optimization of Circular Waveguide Polarizers with Elliptical Irises*” [7]; también se considera el artículo “*Optimum-Iris-Set Concept for Waveguide Polarizers*” [8].

CAPÍTULO II.- Diseño del polarizador

Al estar basado el polarizador en una guía de onda circular con diámetro de 7.2 mm, se van a estudiar las características de una guía de onda circular. Para lo cual se recurre al libro " *Microwave Engineering*" [9].

Las guías de onda operan dentro de un rango de frecuencias determinado por sus dimensiones. Para que la propagación tenga lugar en la guía de onda, la configuración de campos eléctricos y magnéticos de las ondas debe satisfacer ciertas condiciones, estas posibles configuraciones son llamadas modos. Los modos se designan según las direcciones que los campos eléctrico y magnético asumen respecto de la dirección de propagación y son:

- TEM (Transversal electromagnético) donde el campo eléctrico y el magnético son perpendiculares a la dirección de propagación.
- TE (Transversal eléctrico) donde solo el campo eléctrico es perpendicular a la dirección de propagación.
- TM (Transversal magnético) donde el campo magnético es perpendicular a la dirección de propagación.

2.1 Guía de onda circular.

La guía de onda circular es compatible con los modos de propagación TM y TE, pero no con en el modo TEM porque sólo está presente un conductor, como se muestra en la figura 2.1.

Al tratarse de una figura cilíndrica es conveniente emplear coordenadas cilíndricas. Los campos transversales en coordenadas cilíndricas pueden ser derivados de las componentes de campo E_z y H_z , para los modos TM y TE, respectivamente.

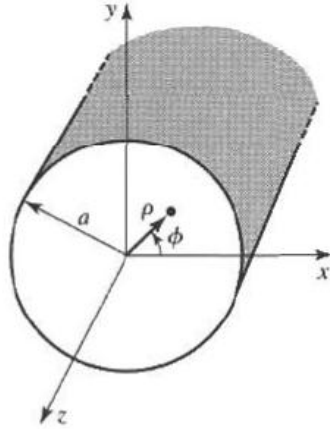


Figura 2.1 Geometría de la guía de onda circular [9].

Las componentes transversales del campo en coordenadas cilíndricas se pueden derivar de las componentes longitudinales como:

$$E_{\rho} = \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{\omega \mu}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad (2.1)$$

$$E_{\phi} = \frac{-j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \quad (2.2)$$

$$H_{\rho} = \frac{j}{k_c^2} \left(\frac{\omega \epsilon}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \quad (2.3)$$

$$H_{\phi} = \frac{-j}{k_c^2} \left(\omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad (2.4)$$

donde $k_c^2 = k^2 - \beta^2$, y $e^{-j\beta z}$ ha sido asumido como factor de propagación. Para el factor de propagación $e^{+j\beta z}$, se reemplaza β por $-\beta$ en todas las expresiones anteriores.

2.1.1 Frecuencia de corte de una guía de onda circular.

La propagación puede ocurrir si las frecuencias operativas son más altas que un cierto valor crítico llamado frecuencia de corte. Si la frecuencia de operación es más baja que el valor de corte, la onda se desvanece.

Para cada modo de propagación hay una frecuencia de corte. En la guía de onda circular, la frecuencia de corte está determinada por el diámetro interno de la guía de onda. El modo fundamental con frecuencia de corte más baja entre todos los modos, en la guía de onda es el modo transversal eléctrico 11 (TE_{11}) y es por eso denominado modo dominante.

2.1.1.1 Frecuencia de corte para el modo TE (Transversal eléctrico).

Para los modos TE, $E_z = 0$ y H_z es una solución de la ecuación de onda,

$$\nabla^2 H_z + k^2 H_z = 0 \quad (2.5)$$

Si $H_z(\rho, \phi, z) = h_z(\rho, \phi)e^{-j\beta z}$, la ecuación 2.5 puede expresarse en coordenadas cilíndricas como:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + k_c^2 \right) h_z(\rho, \phi) = 0 \quad (2.6)$$

La solución se obtiene utilizando el método de separación de variables. Por lo tanto, se tiene

$$h_z(\rho, \phi) = R(\rho)P(\phi) \quad (2.7)$$

y se sustituye en la ecuación 2.6 para obtener:

$$\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho R} \frac{dR}{d\rho} + \frac{1}{\rho^2 P} \frac{d^2 P}{d\phi^2} + k_c^2 = 0 \quad (2.8)$$

o

$$\frac{\rho^2}{R} \frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{\rho}{R} \frac{dR}{d\rho} + \rho^2 k_c^2 = -\frac{1}{P} \frac{d^2 P}{d\phi^2} \quad (2.9)$$

El lado izquierdo de la ecuación 2.9 depende de ρ , mientras que el lado derecho depende sólo de ϕ . Por lo tanto, cada lado de la ecuación debería ser igual a una constante, que llamaremos k_ϕ^2 . Entonces,

$$-\frac{1}{P} \frac{d^2 P}{d\phi^2} = k_\phi^2 \quad (2.10)$$

o

$$\frac{d^2 P}{d\phi^2} + k_\phi^2 P = 0 \quad (2.11)$$

También,

$$\rho^2 \frac{d^2 R}{d\rho^2} + \rho \frac{dR}{d\rho} + (\rho^2 k_c^2 - k_\phi^2) R = 0 \quad (2.12)$$

La solución general de la ecuación 2.11 es:

$$P(\phi) = A \operatorname{sen}(k_\phi \phi) + B \operatorname{cos}(k_\phi \phi) \quad (2.13)$$

Como la solución de h_z debe ser periódica en ϕ (es decir, $h_z(\rho, \phi) = h_z(\rho, \phi \pm 2m\pi)$), k_ϕ debe ser un número entero (n). Por lo tanto la ecuación 2.13 se convierte en:

$$P(\phi) = A \operatorname{sen}(n\phi) + B \operatorname{cos}(n\phi) \quad (2.14)$$

En tanto que la ecuación 2.12 se convierte en:

$$\rho^2 \frac{d^2 R}{d\rho^2} + \rho \frac{dR}{d\rho} + (\rho^2 k_c^2 - n^2) R = 0 \quad (2.15)$$

la cual es reconocida como la ecuación diferencial de Bessel. La solución es

$$R(\rho) = C J_n(k_c \rho) + D Y_n(k_c \rho) \quad (2.17)$$

donde $J_n(x)$ y $Y_n(x)$ son las funciones de Bessel de primer y segundo género, respectivamente. Como $Y_n(k_c \rho)$ se convierte en infinito para $\rho = 0$, lo cual no es físicamente aceptado para una guía de onda circular, por lo que $D = 0$. La solución para h_z se puede escribir como

$$h_z(\rho, \phi) = (A \sen(n\phi) + B \cos(n\phi)) J_n(k_c \rho) \quad (2.18)$$

donde la constante C de la ecuación 2.17 ha sido reemplazada por las constantes A y B de la ecuación 2.18. Sin embargo, todavía se tiene que determinar k_c (número de onda de corte), para lo cual se debe hacer cumplir las condiciones de frontera que $E_{tan} = 0$ en la pared de la guía de onda. Como $E_z = 0$, se debe tener que

$$E_\phi(\rho, \phi) = 0 \quad \text{para } \rho = a \quad (2.19)$$

Partiendo de la ecuación 2.2, encontramos E_ϕ

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c} (A \sen(n\phi) + B \cos(n\phi)) J_n'(k_c \rho) e^{-j\beta z} \quad (2.20)$$

donde la notación $J_n'(k_c \rho)$ se refiere a la derivada de J_n . Para desaparecer E_ϕ para $\rho = a$, debemos tener

$$J_n'(k_c a) = 0 \quad (2.21)$$

Si las raíces de $J_n'(k_c \rho)$ son definidas como ρ'_{nm} de modo que $J_n'(\rho'_{nm}) = 0$, donde ρ'_{nm} es la m -ésima raíz de J_n' entonces k_c debe tener el valor

$$k_{c\ nm} = \frac{\rho'_{nm}}{a} \quad (2.22)$$

Los valores para ρ'_{nm} están dados en tablas y los primeros valores se encuentran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valores de ρ'_{nm} para los modos TE de una guía de onda circular [9].

N	ρ'_{n1}	ρ'_{n2}	ρ'_{n3}
0	3.832	7.016	10.174
1	1.841	5.331	8.536
2	3.054	6.706	9.970

Los modos TE_{nm} son definidos por el número de onda de corte, $k_{c\ nm} = \rho'_{nm} / a$, donde n se refiere al número de variaciones circunferenciales (ϕ), y m se refiere al número de variaciones radiales (ρ). La constante de propagación para el modo TE_{nm} es

$$\beta_{nm} = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\rho'_{nm}}{a}\right)^2} \quad (2.23)$$

con una frecuencia de corte dada por:

$$f_{nm} = \frac{\rho'_{nm}}{2\pi \cdot a \sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (2.24)$$

El primer modo de propagación TE es el modo con el menor ρ'_{nm} , lo cual se obtiene de tabla 2.1 y se puede ver que se trata del modo TE_{11} , por lo tanto, este es el modo dominante de la guía de onda circular. Debido a que $m \geq 1$, no hay modo TE_{10} , pero sí hay modo TE_{01} .

2.1.1.2 Frecuencia de corte para el modo TM (Transversal magnético).

Para los modos TM de una guía de onda circular, debemos resolver para E_z la ecuación de onda en coordenadas cilíndricas:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + k_c^2\right) e_z = 0 \quad (2.25)$$

donde $E_z(\rho, \phi, z) = e_z(\rho, \phi)e^{-j\beta z}$ y $k_c^2 = k^2 - \beta^2$. Esta ecuación es muy parecida a la ecuación 2.6, y la solución general es la misma (ecuación 2.18).

$$e_z(\rho, \phi) = (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi))J_n(k_c \rho) \quad (2.26)$$

Tabla 2.2 Valores de ρ_{nm} para los modos TM de una guía de onda circular [9].

N	ρ_{n1}	ρ_{n2}	ρ_{n3}
0	2.405	5.520	8.654
1	3.832	7.016	10.174
2	5.135	8.417	11.620

La diferencia entre la solución del modo TE y la presente solución, es que las condiciones de frontera se pueden aplicar directamente a e_z de la ecuación 2.26, donde

$$E_\phi(\rho, \phi) = 0 \quad \text{para } \rho = a \quad (2.27)$$

Así, tenemos

$$J_n(k_c a) = 0 \quad (2.28)$$

$$k_{c\ nm} = \frac{\rho_{nm}}{a} \quad (2.29)$$

donde ρ_{nm} es la m-ésima raíz de $J_n(x)$, es decir, $J_n(\rho_{nm}) = 0$. Los valores de ρ_{nm} están dados en tablas, y los primeros de estos valores se listan en la tabla 2.2.

La constante de propagación para el modo TM_{nm} es

$$\beta_{nm} = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\rho_{nm}}{a}\right)^2} \quad (2.30)$$

La frecuencia de corte es:

$$f_{nm} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{\rho_{nm}}{2\pi \cdot a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.31)$$

Así, el primer modo de propagación TM es el modo TM_{01} , con $\rho_{01} = 2.405$. Como este valor es más grande que $\rho'_{11} = 1.841$ del modo de menor orden TE_{11} , este último es el modo dominante de de la guía de onda circular.

2.1.2 Cálculo de frecuencias de corte para los primeros tres modos de propagación.

Considerando un radio de 3.6 [mm] se calcula la frecuencia de corte para los primeros tres modos de propagación de la guía de onda circular, para lo cual se utilizan las ecuaciones 2.24 y 2.31, además de las tablas 2.1 y 2.2.

- Frecuencia de corte para el modo TE_{11}

$$f_c = \frac{\rho'_{11} \cdot c}{2\pi \cdot a} \quad (2.32)$$

$$f_c = \frac{(1.841)(2.9979 \times 10^8 [m/s])}{2\pi \cdot 3.6 [mm]}$$

$$f_c = 24.399 [GHz]$$

donde:

a.- es el radio de la guía de onda circular.

c.- es el valor de la velocidad de la luz en el vacío ($2.9979 \times 10^8 [m/s]$)

$\rho'_{11} = 1.841$ (obtenido de la tabla 2.1)

- Frecuencia de corte para el modo TM_{01}

$$f_c = \frac{\rho'_{01} \cdot c}{2\pi \cdot a} \quad (2.33)$$

$$f_c = \frac{(2.405)(2.9979 \times 10^8 [m/s])}{2\pi \cdot 3.6 [mm]}$$

$$f_c = 31.8749 \text{ [GHz]}$$

donde:

$$\rho'_{01} = 2.405 \text{ (obtenido de la tabla 2.2)}$$

- Frecuencia de corte para el modo TE_{21}

$$f_c = \frac{\rho'_{21} \cdot c}{2\pi \cdot a} \quad (2.34)$$

$$f_c = \frac{(3.054)(2.9979 \times 10^8 \text{ [m/s]})}{2\pi \cdot 3.6 \text{ [mm]}}$$

$$f_c = 40.4765 \text{ [GHz]}$$

donde:

$$\rho'_{21} = 3.054 \text{ (obtenido de la tabla 2.1)}$$

2.2 Simulación en el software Microwave Office (MWO).

Se debe saber que la velocidad de fase es una constante independiente de la frecuencia para los modos TEM. Sin embargo, en algunos casos (como la propagación de onda en una guía de onda) la constante de fase no es una función lineal de la frecuencia angular, las ondas de distinta frecuencia se propagarán a diferente velocidad de fase. Ya que todas las señales que transportan información consisten en una banda de frecuencias y se propagarán con velocidades de fase diferentes, produciendo una distorsión en la forma de onda de la señal. El fenómeno de distorsión de la señal causado por el hecho de que la velocidad de fase dependa de la frecuencia se conoce como dispersión.

Para realizar simulaciones en MWO, se deben plasmar modificaciones para que se considere el efecto de la dispersión (lo anterior es necesario porque el efecto de la dispersión en los resultados es significativo); para esto se va utilizar la

medida de la longitud eléctrica y se le añadirá el efecto de la dispersión. La longitud eléctrica (E) para los modos TE y TM se calcula como:

$$\begin{aligned}
 E &= \sqrt{k^2 - k_c^2} \\
 &= k \cdot \sqrt{1 - \frac{k_c^2}{k^2}} \\
 &= k \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

donde:

k .- es el número de onda.

k_c .- es el número de onda de corte.

f .- es la frecuencia operativa.

f_c .- es la frecuencia de corte.

Pero MWO simula la longitud eléctrica multiplicada por la longitud de la guía de onda circular (l), de la siguiente manera:

$$E \cdot l = k \cdot l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}
 \tag{2.36}$$

Así que, para que MWO considere el efecto de la dispersión, se va a multiplicar la longitud eléctrica (E), por la longitud de la guía de onda circular y por la frecuencia central (f_0) y lo anterior se divide por la frecuencia operativa (f).

$$El = \frac{k \cdot l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}{f} \cdot f_0
 \tag{2.37}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2\pi \cdot f \cdot l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}{c \cdot f} \cdot f_0 \\
&= \frac{2\pi \cdot l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}{c} \cdot f_0
\end{aligned}$$

En tanto que la impedancia característica se calcula como:

$$Z_0 = \frac{120\pi \cdot 2}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (2.38)$$

2.3 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Como se concluyó en el capítulo 1, el polarizador a diseñar es el polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos. Cabe recordar que en su comportamiento (subtema 1.2.3.1.3), un campo incidente puede ser considerado como la superposición de dos campos, uno con componente paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas y uno con componente paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas. El campo eléctrico paralelo a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas se propaga a lo largo de una línea de transmisión con discontinuidades capacitivas, mientras que el campo paralelo a los ejes menores de las elipses de los diafragmas se propaga a lo largo de una línea de transmisión con discontinuidades inductivas.

2.3.1 Diafragma elíptico visto como circuito eléctrico.

Para poder simular los diafragmas en MWO se requiere encontrar el equivalente de un diafragma en circuitos eléctricos. Para lo cual se investiga el comportamiento que tiene en frecuencia un capacitor y un inductor.

2.3.1.1 Comportamiento en frecuencia de un capacitor.

Un capacitor es cualquier elemento consistente en dos superficies conductoras separadas por un material aislante o dieléctrico. El dieléctrico o aislante es normalmente un material cerámico, aire, papel, mica, plástico, vidrio o aceite. La capacidad de un capacitor consiste en la propiedad de almacenar carga cuando entre las superficies conductoras se aplica una diferencia de potencial.

El funcionamiento de un capacitor en un circuito responde a un fenómeno de inducción de carga. Por tanto, idealmente, no circula corriente entre las placas de un condensador sino que induce externamente. Sin embargo, en realidad todo material por aislante que sea siempre tiene una conductividad que en general es función de la frecuencia, ello provoca la circulación de una pequeña corriente entre las placas del condensador apartando su comportamiento del ideal. Por tanto, un capacitor no presenta sólo una capacitancia sino que tiene asociadas una resistencia e inductancia, debidas a las terminales y a la estructura del componente. Un modelo del circuito equivalente es el de la figura 2.2, donde R es la resistencia de las terminales, placas y contactos, L es la inductancia de las terminales y placas, R_p es la resistencia de fugas del dieléctrico y del encapsulado y C_p es la capacidad del capacitor.

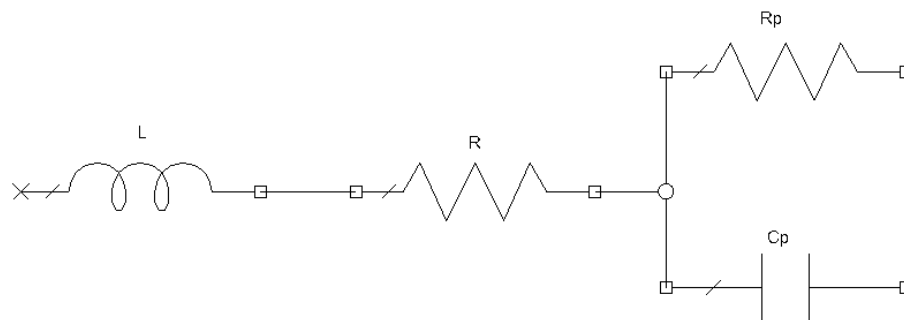


Figura 2.2 Circuito equivalente completo de un capacitor real.

Al modelo equivalente presentado en la figura 2.3 corresponde cierta dependencia de impedancia en frecuencia. En este modelo inicialmente, la característica capacitiva predomina sobre la inductiva y el capacitor tiene una respuesta en frecuencia como debería esperarse. Pero a una frecuencia f_r (frecuencia de resonancia), el capacitor y la bobina interna resuenan proporcionando un mínimo de impedancia. A partir de la frecuencia de resonancia un aumento progresivo en la frecuencia hace que predominen los efectos inductivos sobre los capacitivos y el capacitor se comporta más como una bobina que como un capacitor. Por lo tanto, hay que considerar que en el diseño deben utilizarse los capacitores a unas frecuencias que estén por debajo de la frecuencia de resonancia.

En general, capacitancias de elevado valor tienden a exhibir mayor inductancia interna que capacitores pequeños. Es decir, la fórmula $X_c = 1/\omega C$ podría indicar que valores de capacitancias mayores suponen menor reactancia a una frecuencia dada. Sin embargo, a altas frecuencias lo contrario puede llegar a ser cierto. Esto hay que tenerlo en cuenta cuando se diseñan circuito a frecuencias por encima de 100 MHz.

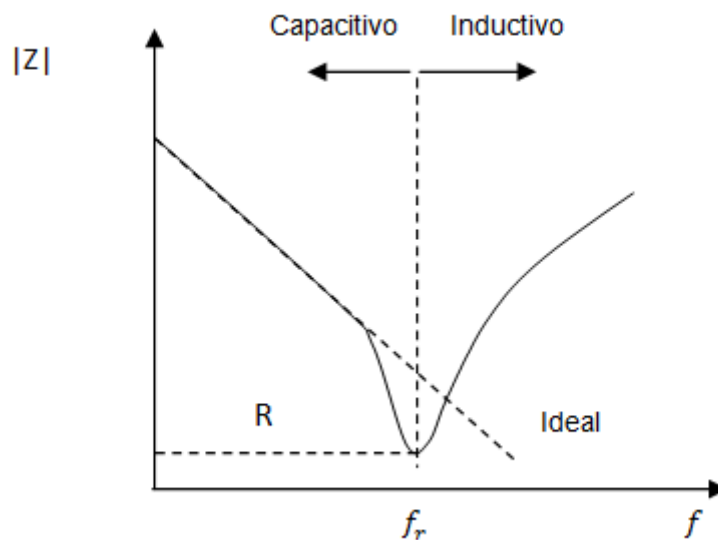


Figura 2.3 Respuesta en frecuencia del circuito equivalente completo de un capacitor real.

2.3.1.2 Comportamiento en frecuencia de un inductor.

Un inductor no es otra cosa que un cable bobinado o enrollado de tal manera que se incrementa el flujo magnético ligado entre las espiras, este incremento del flujo sobre el cable aumenta la inductancia propia del cable.

El circuito equivalente de un inductor L_s se muestra en la figura 2.4. En ella la resistencia R_s , es la resistencia de pérdidas del inductor y la capacitancia C_d es la capacitancia distribuida que existe entre cada dos espiras bobinadas. Del circuito se deduce la curva de respuesta en frecuencia (fig. 2.5) de la bobina real.

Inicialmente el efecto inductivo predomina sobre el capacitivo hasta llegar a una frecuencia de resonancia entre L_s y C_d donde se alcanza el máximo de impedancia, a partir de la cual predomina el efecto capacitivo y por tanto es una zona que hay que evitar.

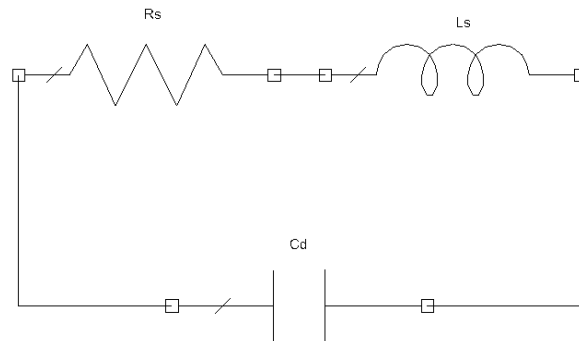


Figura 2.4 Circuito equivalente de un inductor real.

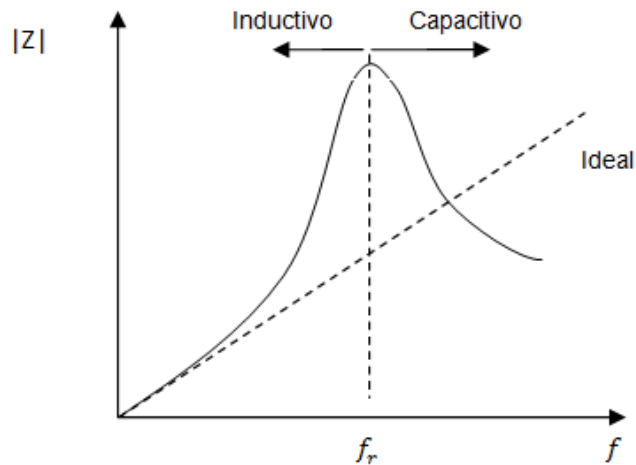


Figura 2.5 Comportamiento en frecuencia de un inductor.

2.3.1.3 Aproximación de un diafragma elíptico a un circuito eléctrico.

De la figura 2.6, el circuito eléctrico representa discontinuidades capacitivas, mientras que el circuito eléctrico inferior representa discontinuidades inductivas. Así que el efecto ocasionado por un capacitor y un inductor representan la presencia de un diafragma elíptico en la guía de onda circular. De lo anterior se deduce que en la figura 2.6 se cuenta con la presencia de dos diafragmas elípticos idénticos.

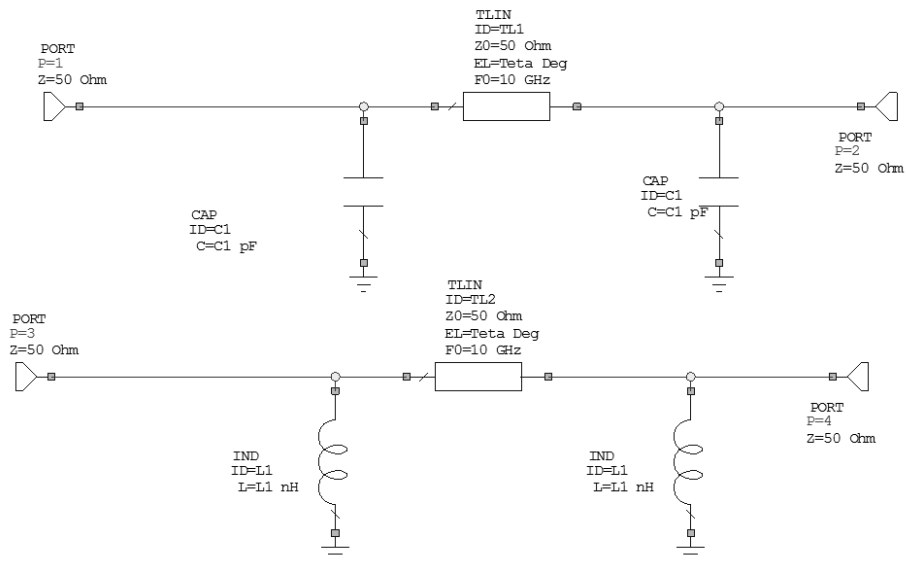


Figura 2.6 Circuito eléctrico correspondiente a dos diafragmas elípticos idénticos.

2.4 Diseño del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Para encontrar con que estructura se obtienen los mejores resultados en el polarizador, se van a simular diversas configuraciones para el polarizador, por ejemplo:

- características idénticas o diferentes en los diafragmas,
- distinto número de diafragmas, y
- diferente o igual separación entre diafragmas;

Pero en todas las configuraciones siempre se conservará la simetría longitudinal del dispositivo.

2.4.1 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos iguales.

Se debe tomar en cuenta que en las simulaciones no se considera la dispersión y que para encontrar los mejores resultados se utiliza la herramienta "optimize". Inicialmente las metas para todos los polarizadores son:

- coeficiente de reflexión menor 0.1 para ambos modos de polarización (el paralelo a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas y el paralelo a los ejes menores de las elipses de los diafragmas).
- diferencia de fase de 90° entre ambos modos de polarización en la salida del polarizador, con una tolerancia de $\pm 5^\circ$.

En relación con las metas anteriores, se busca se cumplan para la mayor banda de frecuencias posible. Además, en algunos casos (polarizador con 8 y 10 diafragmas) estas metas se van a cumplir rápidamente y para obtener mejores resultados se va a modificar la meta del coeficiente de reflexión para ambos modos de polarización estableciéndola en 0.05. Los parámetros que se optimizan son: la inductancia, la capacitancia y la longitud eléctrica.

Se empieza con un polarizador con dos diafragmas (simulado como se muestra en la fig. 2.6), donde ambos diafragmas tienen la misma inductancia, capacitancia, y están separados una distancia dada.

Una vez realizada la simulación se puede observar que el resultado del polarizador con dos diafragmas (tabla 2.3) está muy lejos de ser satisfactorio, debido a que el coeficiente de reflexión tiene un valor elevado para ambos modos de propagación. Por lo tanto, es necesario modificar las características del polarizador, en este caso se modifica el número de diafragmas que componen el polarizador.

A continuación se realizan las simulaciones correspondientes para 4, 6, 8 y 10 diafragmas elípticos idénticos, estas simulaciones seguirán un procedimiento similar a la simulación del polarizador de dos diafragmas; esto con la finalidad de comparar resultados y así, elegir el número de diafragmas conveniente para el polarizador. Los resultados de las simulaciones realizadas se encuentran en la tabla 2.3.

De la tabla 2.3, $C1$ (capacitancia) y $L1$ (inductancia) representan las discontinuidades del primer diafragma; y en este caso al ser todos los diafragmas idénticos, $C1$ y $L1$ también representan las discontinuidades de cada uno de los demás diafragmas. En tanto que, el valor de la longitud eléctrica permite obtener la distancia que existe entre cada par de diafragmas del polarizador, la cual, en este caso es la misma entre cada uno de los diafragmas que componen al polarizador. Lo anterior se debe a que como ya se mencionó la longitud eléctrica en MWO se simula como la multiplicación de la longitud eléctrica por la longitud de la guía de onda circular, donde la longitud de la guía de onda circular es el equivalente a la longitud de separación entre cada par de diafragmas.

Cabe mencionar que $\Gamma_{m\acute{a}x}$ se refiere al valor máximo del coeficiente de reflexión para ambos modos de polarización dentro de la banda de frecuencias de operación y por tanto, el coeficiente de reflexión en la banda de frecuencias útiles del polarizador generalmente es menor al $\Gamma_{m\acute{a}x}$.

Al comparar los resultados de las simulaciones anteriores se llega a la conclusión de que para mayor número de diafragmas colocados en el polarizador, se consigue un menor coeficiente de reflexión, un ancho de banda mayor y una diferencia de fase entre los modos de polarización más estable y cercana a 90°.

Tabla 2.3 Características y resultados de los polarizadores con diafragmas elípticos iguales.

Características	Polarizadores con diferente número de diafragmas elípticos.				
	2 Diafragmas	4 Diafragmas	6 Diafragmas	8 Diafragmas	10 Diafragmas
C1 [pF]	0.0674942	0.0553931	0.0247178	0.0180759	0.0148966
L1 [nH]	0.3550974	1.10239	1.00565	1.31155	1.69927
Longitud eléctrica [°]	89.3255	73.0934	77.3467	79.3465	92.8838
Diferencia de fase [°]	84.8-85.2	84.5 - 95.5	92.7 - 95	92.8 - 95	93.1 - 95
$\Gamma_{\text{máx}}$	0.369	0.158	0.118	0.096	0.0794
Banda de frecuencias [GHz]	30 - 36	30-36	28 - 38	28 - 38	28 - 38

2.4.2 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos, utilizando dos tipos de diafragmas: centrales y extremos.

Para estas simulaciones nuevamente no se va a considerar la dispersión y se va a partir de las simulaciones del subtema anterior (2.4.1), pues de esta forma garantizamos mejores resultados, pues se parte de un "buen" resultado y con la herramienta "optimize" sólo va a ser posible mejorar las características de reflexión y de diferencia de fase. Si no se parte de las simulaciones anteriores el software MWO, se podría o no localizar mejores resultados a los ya encontrados.

La diferencia con las simulaciones anteriores, es que los diafragmas de los extremos para cada polarizador no son iguales a los diafragmas centrales, sin embargo se mantiene la simetría longitudinal del polarizador, es decir, los diafragmas de los extremos son idénticos entre sí.

Inicialmente las metas para todos los polarizador son:

- coeficiente de reflexión menor 0.01 para ambos modos de polarización (el paralelo a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas y el paralelo a los ejes menores de las elipses de los diafragmas).
- diferencia de fase de 90° entre los modos de polarización con un error de fase de $\pm 5^\circ$ en la salida del polarizador.

Reiteradamente en algunos casos estas metas se van a cumplir rápidamente y para obtener mejores resultados se va a modificar la meta del coeficiente de reflexión para ambos modos de polarización. En tanto que los parámetros que se van a optimizar, son: la inductancia, la capacitancia y la longitud eléctrica.

Recordemos que cada diafragma se representa con una inductancia y una capacitancia. Empezaremos con 4 diafragmas, posteriormente se simulará con 6, 8 y 10 diafragmas; los resultados se observan en la tabla 2.4.

En la tabla 2.4 $L1$ y $C1$ son inductancia y capacitancia respectivamente, que corresponde a los dos diafragmas centrales del polarizador, por su parte $L2$ y $C2$ representan a los dos diafragmas colocados en los extremos (uno de cada lado). Y por su parte la longitud eléctrica nos permite encontrar la distancia que existe entre cada par de diafragmas del polarizador.

Al analizar los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que modificar los diafragmas de los extremos del polarizador es una buena idea, pues se consigue que el polarizador opere en un ancho de banda mayor, con un coeficiente de

reflexión menor para ambos modos de propagación, y además la diferencia de fase es más cercana a 90° y con un error de fase menor.

Tabla 2.4 Características y resultados de los polarizadores con diafragmas elípticos con extremos diferentes.

Características	Polarizadores con diferente número de diafragmas elípticos.			
	4 Diafragmas	6 Diafragmas	8 Diafragmas	10 Diafragmas
C1 [pF]	0.053351	0.0297675	0.0232705	0.0221416
L1[nH]	0.466161	0.858312	1.32698	2.14867
C2 [pF]	0.0239932	0.015047	0.0120916	0.011626
L2[nH]	1.04478	1.66811	2.40359	3.66317
Longitud eléctrica [°]	89.725	89.186	87.9289	85.84
Diferencia de fase [°]	88.9 - 90.2	92.8 - 95	91.1 - 95	85.1 - 95
$\Gamma_{\text{máx}}$	0.0128	0.0264	0.0262	0.0248
Banda de frecuencias [GHz]	30-36	28 - 38	28 - 38	28 - 38

2.4.3 Polarizador basado en guía de onda circular con pares de diafragmas elípticos iguales.

Anteriormente verificamos que al permitir que los diafragmas extremos que componen el polarizador sean diferentes a los centrales, se obtienen mejores condiciones de trabajo (ancho de banda, diferencia de fase y coeficiente de

reflexión). Por tanto, siguiendo ese criterio se va a permitir que los diafragmas del polarizador sean diferentes, pero siempre conservando la simetría longitudinal del polarizador; por ejemplo si el polarizador está compuesto por 6 diafragmas se tendrán 3 pares de diafragmas elípticos iguales, es decir, el primer diafragma y el último serán iguales, el segundo diafragma con el quinto y el tercero con el cuarto. Este procedimiento será similar para el polarizador basado en guía de onda circular de 8 y 10 diafragmas elípticos. (No se realizan para 4 diafragmas pues esta simulación sería igual a una de las simulaciones del subtema anterior).

Para estas simulaciones nuevamente se utiliza la herramienta "optimize" del software MWO y las metas establecidas para optimizar el polarizador son:

- ancho de banda de 14 GHz (26 GHz - 40 GHz)
- coeficiente de reflexión del menor valor posible, para ambos modos de polarización (el paralelo a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas y el paralelo a los ejes menores de las elipses de los diafragmas).
- diferencia de fase de 90° entre los modos de polarización con un error de fase de $\pm 2^\circ$ en la salida del polarizador.

Finalmente, los resultados obtenidos de las simulaciones se muestran en la tabla 2.5, de la cual la representación de los diafragmas de los extremos la constituyen la inductancia $L1$ y la capacitancia $C1$, en tanto que el segundo y el penúltimo diafragma lo componen la inductancia $L2$ y la capacitancia $C2$, el mismo proceso se continúa para los demás diafragmas del polarizador.

Además, de los resultados se destaca, que si se permite que cada diafragma posea sus propias características y se optimizan, el polarizador que se puede obtener posee un mayor ancho de banda de operación con un coeficiente de reflexión muy pequeño para ambos modos de polarización (0.00019 aproximadamente) y una diferencia de fase entre los modos de propagación de 90° con un error de fase de $\pm 2^\circ$.

Tabla 2.5 Características y resultados de polarizadores con pares de diafragmas elípticos iguales.

Características	Polarizadores con diferente número de diafragmas elípticos.		
	6 Diafragmas	8 Diafragmas	10 Diafragmas
C1 [pF]	0.00805768	0.00276195	0.0011157
L1[nH]	2.92859	7.90199	20.3032
C2 [pF]	0.0264851	0.011913	0.00559814
L2[nH]	0.902429	1.89766	3.93951
C3 [pF]	0.040187	0.0262381	0.01433
L3[nH]	0.598244	0.971062	1.618
C4 [pF]	-	0.0372271	0.0246033
L4[nH]	-	0.742571	1.0174
C5 [pF]	-	-	0.0314491
L5 [nH]	-	-	0.836523
Longitud eléctrica [°]	89.8055	79.9672	84.0016
Diferencia de fase [°]	88 - 92	88.3 - 91.5	88.1 - 91.2
$\Gamma_{\text{máx}}$	0.006	0.00133	0.000194
Banda de frecuencias [GHz]	26 - 40	26 - 40	26 - 40

2.5 Conclusiones del capítulo.

El propósito de este capítulo fue proponer optimizar el comportamiento del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos, para conseguirlo se planteó un circuito eléctrico que simula el comportamiento de un diafragma elíptico; posteriormente se realizaron simulaciones en MWO con el fin de conocer el número y las características que deben tener los diafragmas elípticos para conseguir las metas propuestas para el polarizador.

En resumen los resultados obtenidos es el siguiente:

- Polarizador con diafragmas elípticos idénticos,
 - Con 2 diafragmas se tiene un ancho de banda (BW) de 6 GHz, un coeficiente de reflexión máximo ($\Gamma_{\text{máx}}$) de 0.369 y un error de fase de ± 5.2 .
 - Con 4 diafragmas se tiene un $BW = 6 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.158$ y un error de fase de $\pm 5.5^\circ$.
 - Con 6 diafragmas se tiene un $BW = 10 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.118$ y un error de fase de $\pm 5^\circ$.
 - Con 8 diafragmas se tiene un $BW = 10 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.096$ y un error de fase de $\pm 5^\circ$.
 - Con 10 diafragmas se tiene un $BW = 10 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.0794$ y un error de fase de $\pm 5^\circ$.

- Polarizador con diafragmas elípticos centrales idénticos y extremos diferentes,
 - Con 4 diafragmas se tiene un $BW = 6 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.0128$ y un error de fase de $\pm 1.1^\circ$.
 - Con 6 diafragmas se tiene un $BW = 10 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.0264$ y un error de fase de $\pm 5^\circ$.
 - Con 8 diafragmas se tiene un $BW = 10 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.0262$ y un error de fase de $\pm 5^\circ$.

- Con 10 diafragmas se tiene un $BW = 10 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.0248$ y un error de fase de $\pm 5^\circ$.
- Polarizador compuesto por pares de diafragmas elípticos idénticos,
 - Con 6 diafragmas se tiene un $BW = 14 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.006$ y un error de fase de $\pm 2^\circ$.
 - Con 8 diafragmas se tiene un $BW = 14 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.00133$ y un error de fase de $\pm 1.7^\circ$.
 - Con 10 diafragmas se tiene un $BW = 14 \text{ GHz}$, un $\Gamma_{\text{máx}} = 0.000194$ y un error de fase de $\pm 1.9^\circ$.

También vale la pena recordar que en las simulaciones no se consideró la dispersión y que la distancia entre cada par de diafragmas es igual en todo el polarizador.

Después de analizar los resultados, se deduce que el polarizador tiene mejores características, si:

- El número de diafragmas que componen al polarizador es mayor, y si
- Cada diafragma posee sus propias características.

Por lo tanto, para posteriores simulaciones sólo se van a utilizar 10 diafragmas elípticos y se va a considerar que cada diafragma posee sus propias características, por supuesto sin perder la simetría longitudinal, pues simplifica el análisis (debido a que solo se analiza la mitad del polarizador).

Finalmente, se concluye que entre más variables se optimicen en MWO, se tiene una oportunidad de lograr mejores resultados, que se traduce en un coeficiente de reflexión bajo para ambos modos de polarización y una diferencia de fase entre los modos de propagación cercana a 90° , lo anterior para una amplio ancho de banda.

CAPÍTULO III.- Simulación del polarizador.

El objetivo de este capítulo es simular el polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en un software capaz de simular situación de campo electromagnético, permitiendo su análisis rápido y preciso en alta frecuencia.

3.1 Simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Para realizar la simulación en el software especializado en campo electromagnético, primero se requiere hacerlo en MWO utilizando el método de circuitos equivalentes, esto debido, a que al considerar el campo electromagnético en la simulación se consume una gran cantidad de tiempo; y por lo tanto, efectuar una optimización directamente en este software llevaría muchísimo tiempo, y seguramente no se obtendrían buenos resultados.

Considerando lo anterior, el plan de trabajo consiste en realizar el diseño del polarizador utilizando MWO y el software especializado en campo electromagnético; así que primeramente se va simular y optimizar el polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en MWO, para después trasladar los resultados al software especializado.

3.1.1 Especificaciones generales de la simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Para esta primera etapa de la simulación del polarizador, se consideró que:

- el polarizador está formado por diez diafragmas elípticos,
- el efecto causado por la dispersión se toma en cuenta de manera explícita,

- se considera la representación del diafragma elíptico como un circuito paralelo LC en MWO (diferente a lo que se venía manejando),
- después de la optimización se traslada de la representación del diafragma elíptico al software especializado
- las distancias entre cada par de diafragmas son diferentes, sin olvidar conservar la simetría en el eje longitudinal, es decir, como se tienen diez diafragmas y se quiere conservar la simetría, se tendrán cinco longitudes diferentes, y por último,
- cada diafragma cuenta con características propias (también en este caso se conserva la simetría longitudinal, por lo tanto, se tendrán 5 diafragmas diferentes).

De las consideraciones anteriores, sabemos que el efecto de la dispersión nos va a modificar el comportamiento que se espera del polarizador; sin embargo el que la distancia entre cada par de diafragmas sea diferente, da la oportunidad de mejorar los resultados del polarizador, esto debido a que al software se le proporcionan más variables para optimizar.

3.1.1.1 Representación del diafragma elíptico como circuito LC.

Como el objetivo dispuesto para este capítulo, es simular el polarizador en el software especializado en campo electromagnético, se debe utilizar un circuito eléctrico que asemeje el comportamiento que se obtiene al simular un diafragma en dicho software, el elegido es el circuito paralelo LC.

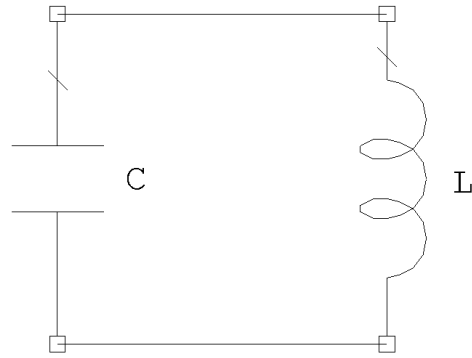


Figura 3.1 Circuito LC paralelo

3.1.1.2 Simulación de los diafragmas elípticos en el software especializado.

Para trasladar los diafragmas elípticos al software especializado, se consideran las siguientes características:

- Una guía de onda circular con un radio de 3.6 mm.
- Un diafragma elíptico con espesor de 0.017 mm.
- Una capa exterior metálica de 7.2 mm de radio exterior y 3.6 mm de radio interior.

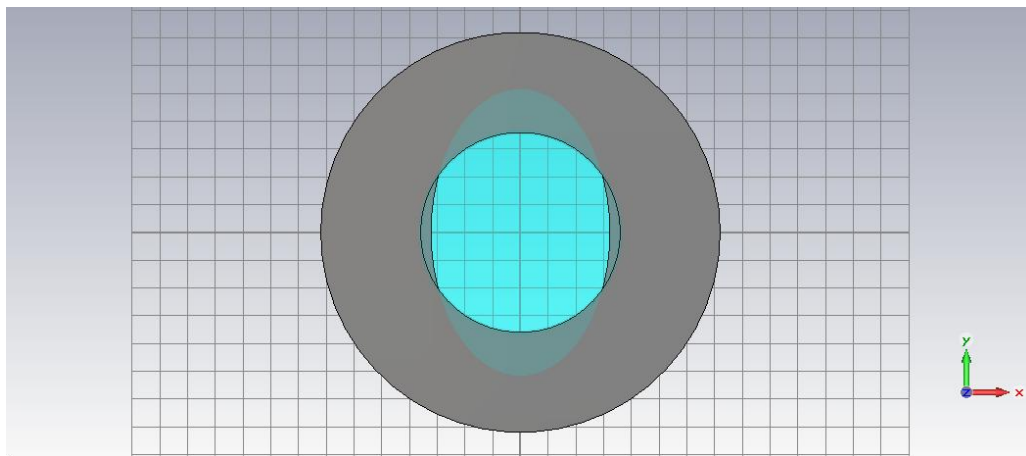


Figura 3.2 Forma geométrica del diafragma elíptico.

La forma geométrica estándar que va a tener cada uno de los diafragmas se muestra en la figura 3.2. Donde la capa exterior tiene la finalidad de impedir que la parte del diafragma elíptico que no está dentro de la guía de onda circular

afecte el comportamiento de cada diafragma y en consecuencia el del polarizador. Además, con la finalidad de encontrar las características de cada uno de los diafragmas elípticos (representados por circuitos paralelos LC), únicamente se va a modificar el eje mayor y el eje menor de la elipse.

3.1.2 Análisis de los diafragmas elípticos de la simulación del polarizador.

Para encontrar las características que debe poseer cada diagrama que compone al polarizador, primero se optimiza el polarizador en MWO, de dicha optimización se revisa el coeficiente de reflexión de los dos modos de polarización de cada diafragma, esto con la finalidad de obtener las características de cada diafragma y establecerlas como metas para la optimización que realiza el software especializado del diafragma.

Sin embargo, el traslado de los diafragmas de un software a otro, no es una tarea fácil; pues es complicado obtener las mismas características de un diafragma en las dos herramientas, y como en este caso se debe obtener la representación de cinco diafragmas, la tarea se vuelve imposible. Por lo tanto, para obtener un satisfactorio traslado de los diafragmas elípticos de MWO al software especializado, se buscó encontrar algún indicio que revelara que características debe poseer el circuito paralelo LC (valores de inductancia o capacitancia), para que sea sencillo su traslado a la forma geométrica del diafragma; sin embargo no se logró encontrar relación alguna.

Así que se simuló la dispersión del modo TE₁₁ para ambos modos de polarización del diafragma en el software especializado y en MWO, para alcanzar similitud para cada uno de los diafragmas que componen al polarizador. Se aseguró la similitud antes mencionada optimizando la geometría de cada uno de los diafragmas y modificando las metas de optimización del circuito equivalente del polarizador en MWO.

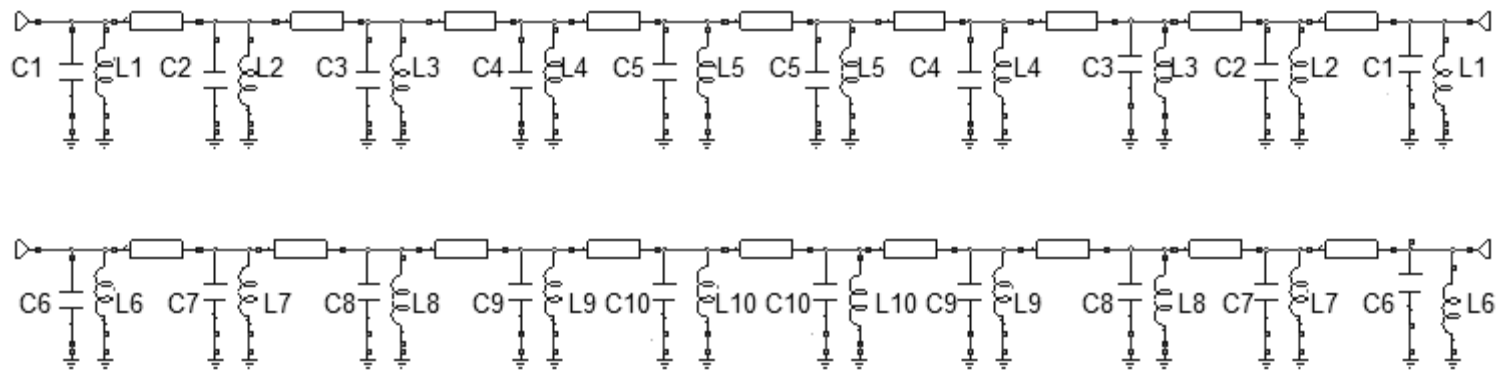


Figura 3.3 Circuito equivalente del polarizador para ambas polarizaciones (la parte superior del circuito corresponde al campo paralelo a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas y la parte inferior al campo paralelo a los ejes menores de las elipses de los diafragmas).

Cuando los resultados no eran similares, se colocaban nuevas metas en MWO para que los diafragmas tuvieran un comportamiento equivalente al mostrado en el software especializado, posteriormente se optimizaba nuevamente en el software especializado. El procedimiento descrito anteriormente se realizó varias veces, con el fin lograr mejores resultados, lo cual se logró; pero lógicamente al hacer más parecidos los diafragmas en ambas herramientas, se ve limitado el funcionamiento del polarizador y no se permite alcanzar los resultados esperados.

Como ya se mencionó esta simulación del polarizador está compuesta por 10 diafragmas elípticos, sin embargo sólo se analizan las características de 5 diafragmas, pues se debe recordar que el polarizador se diseña con simetría en el eje longitudinal. El circuito equivalente de polarizador en MWO, se muestra en la figura 3.3 y los valores de las inductancias y capacitancias se presentan en los siguientes subtemas.

3.1.2.1 Primer diafragma.

Para simular las características del primer diafragma del polarizador en MWO, se utilizan los valores de las inductancias y capacitancias obtenidos de la optimización del polarizador en MWO, los cuales se muestran en la tabla 3.1. Es importante mencionar que $C1$ y $L1$ simulan el comportamiento del campo que atraviesa con polarización paralela al eje mayor de la elipse del diafragma, por su parte $C6$ y $L6$ simulan el del campo con polarización paralela al eje menor de la elipse del diafragma.

Tabla 3.1 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el primer diafragma de la simulación del polarizador en MWO.

Parámetro	Símbolo	Valor
Capacitancia 1	C1	0.000878567 [pF]
Inductancia 1	L1	41.1036 [nH]
Capacitancia 6	C6	9.02152e-05 [pF]
Inductancia 6	L6	72.1395 [nH]

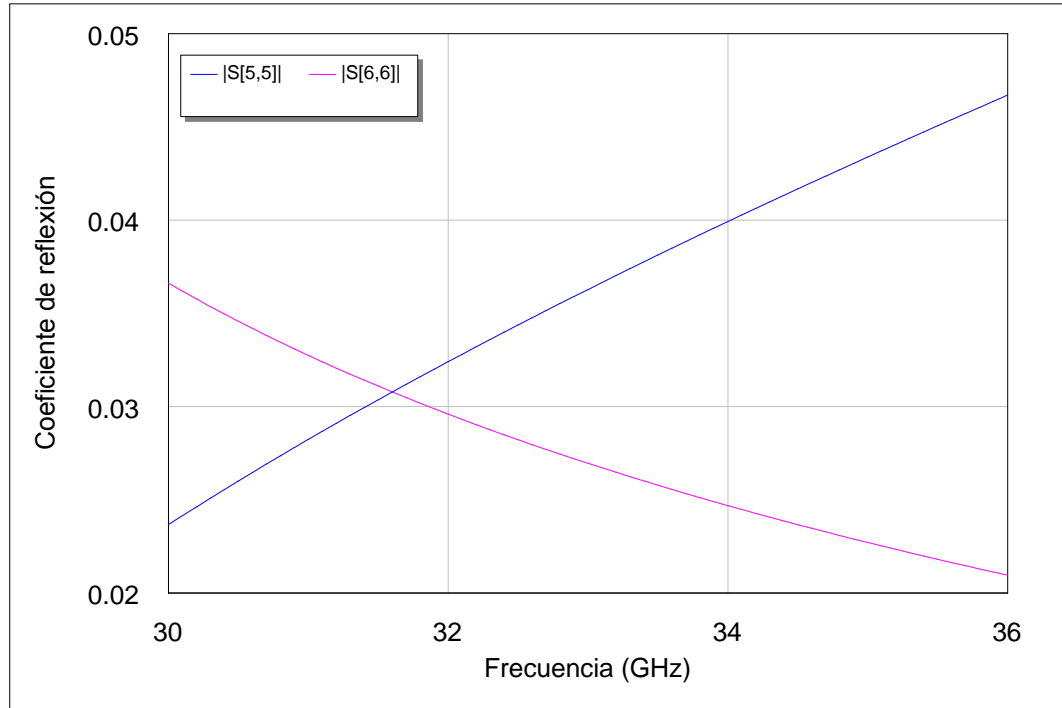


Figura 3.4 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del primer diafragma, $S[5,5]$ (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del primer diafragma $S[6,6]$ (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.

De dichos valores, se consigue el resultado expuesto en la gráfica de la figura 3.4, donde $S[5,5]$ (línea azul) es el coeficiente de reflexión del campo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del primer diafragma que representa discontinuidades capacitivas, mientras que $S[6,6]$ (línea rosa) es el coeficiente de reflexión del campo con polarización paralela al eje menor de la elipse del primer diafragma que constituye discontinuidades inductivas.

Con el fin de simular un comportamiento similar al de la figura 3.4 en el software especializado, se va a utilizar la forma geométrica de la figura 3.2 y se va a considerar el eje mayor y el eje menor de la elipse como las variables a optimizar, con esta premisa se llegó a:

- Eje menor (eje x)= 3.154 mm
- Eje mayor (eje y)= 7.19 mm

Después de realizar la simulación correspondiente en el software especializado, se consiguieron los resultados mostrados en la figura 3.5, donde $S_{1(1),1(1)}$ representa el coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del primer diafragma, por su parte $S_{1(2),1(2)}$ es el coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del primer diafragma.

Al comparar los resultados obtenidos para el primer diafragma (tabla 3.2), se concluye que los resultados de las simulaciones en ambos programas son parecidos solamente para el rango de frecuencia de 31 a 33 GHz, lo cual no es suficiente para los objetivos planteados; pues estas variaciones conllevan un comportamiento indeseado en el polarizador.

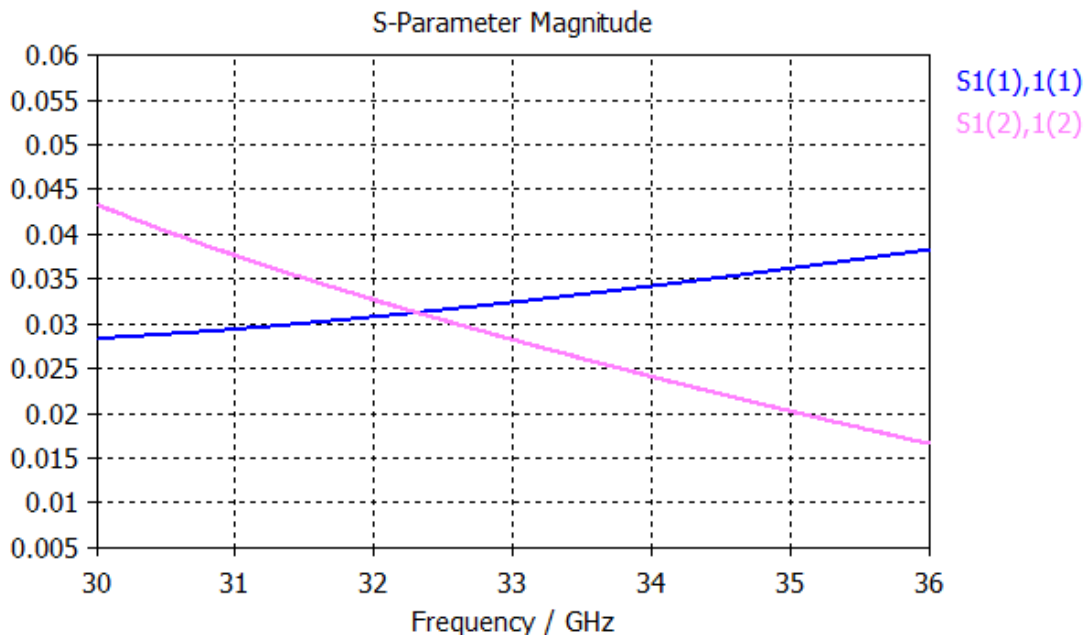


Figura 3.5 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del primer diafragma $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del primer diafragma $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.

Cabe mencionar que la tabla maneja ese rango de frecuencias, porque es en el que nos interesa trabajar, ya que en este el coeficiente de reflexión para ambos modos de propagación tiene valores pequeños.

Un parámetro del software especializado que nos ayuda a conocer que tan buena es la optimización, es el de "Best goal function value", el cual entre más cercano es a cero indica que la optimización es mejor. De este primer diafragma se consigue el siguiente valor:

- Best goal function value = 0.0355

Tabla 3.2 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación que atraviesan el primer diafragma de la simulación del polarizador.

Frecuencia [GHz]	Coeficiente de reflexión en MWO		Coeficiente de reflexión en el software especializado en campo electromagnético	
	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma
30	0.023	0.036	0.028	0.043
31	0.028	0.032	0.029	0.037
32	0.032	0.029	0.030	0.032
33	0.036	0.027	0.033	0.028
34	0.040	0.024	0.034	0.024
35	0.043	0.022	0.035	0.020
36	0.046	0.021	0.038	0.016

3.1.2.2 Segundo Diafragma.

El proceso para adaptar al segundo diafragma, es igual al que se realiza para el primer diafragma; y lo mismo sucede para los demás diafragmas. Para simular en MWO el comportamiento del modo de propagación que atraviesa con polarización paralela al eje mayor del segundo diafragma se utiliza los valores de $C2$ y $L2$, en tanto que para el modo de propagación que atraviesa con polarización paralela al eje menor se utiliza $C7$ y $L7$; los resultados se muestran en la figura 3.6.

Tabla 3.3 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el segundo diafragma de la simulación del polarizador en MWO.

Parámetro	Símbolo	Valor
Capacitancia 2	C2	0.0013656 [pF]
Inductancia 2	L2	20.7931 [nH]
Capacitancia 7	C7	0.00036196 [pF]
Inductancia 7	L7	47.0715 [nH]

Los resultados de la optimización en el software especializado se observan en la figura 3.7, los cuales se lograron con las siguientes medidas en los ejes de la elipse:

- Eje menor (eje x) = 3.230 mm
- Eje mayor (eje y)= 7.19 mm

Al analizar la tabla comparativa 3.4, podemos ver que el principal problema surge en el modo de polarización vertical, ya que sólo para 32 GHz se consigue que el coeficiente de reflexión sea similar para la dos herramientas, ocasionando que el resto del rango de frecuencias se obtengan resultados indeseados. Sin embargo, se rescata que para el modo de polarización horizontal, sí se tienen resultados similares en las dos herramientas para todo el rango de frecuencias.

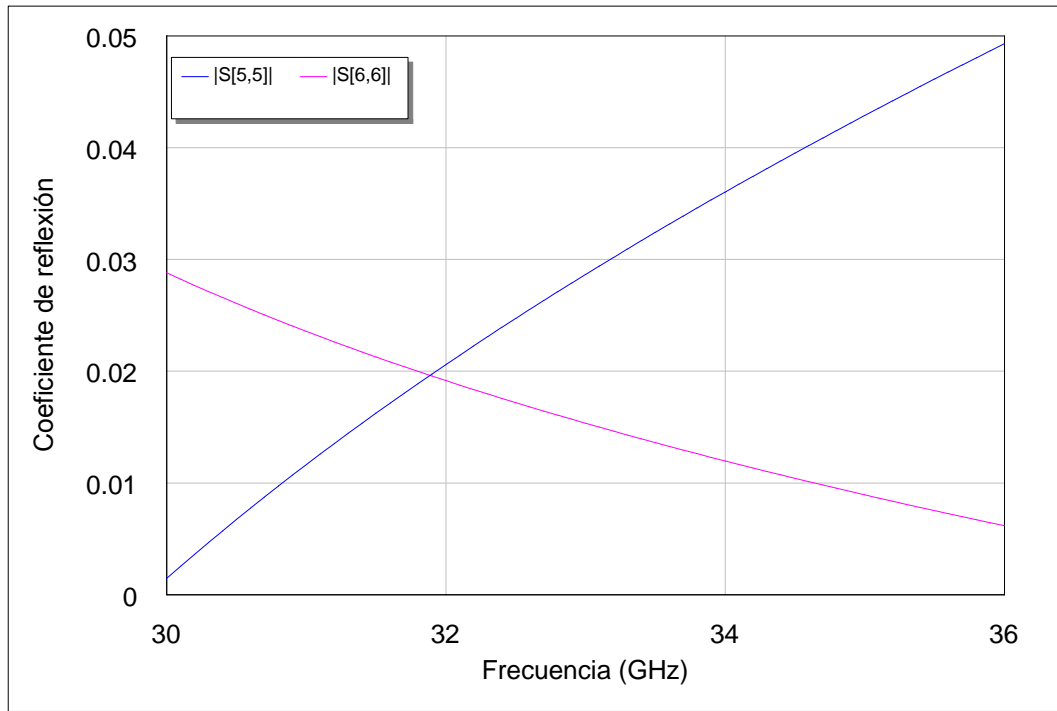


Figura 3.6 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del segundo diafragma S[5,5] (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del segundo diafragma S[6,6] (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.

Para darnos una idea del acercamiento que se consigue, se observa el valor del parámetro "Best goal function value".

- Best goal function value = 0.046

Se puede ver que en la optimización de este diafragma se consigue peores resultados que para el primer diafragma.

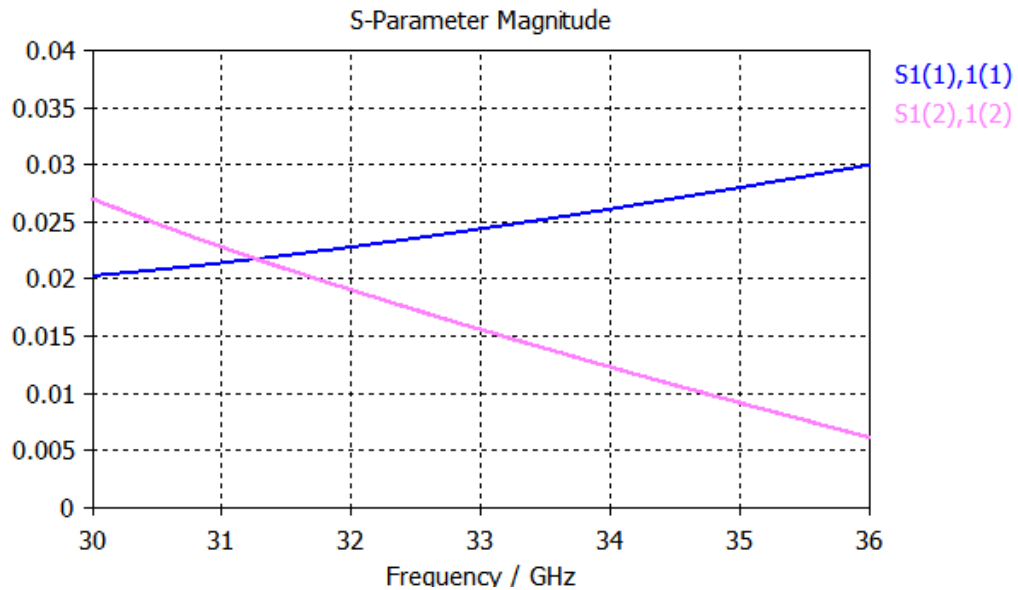


Figura 3.7 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del segundo diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del segundo diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.

Tabla 3.4 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación que atraviesan el segundo diafragma de la simulación del polarizador.

Frecuencia [GHz]	Coeficiente de reflexión en MWO		Coeficiente de reflexión en el software especializado en campo electromagnético	
	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma
30	0.001	0.028	0.020	0.026
31	0.011	0.23	0.021	0.022
32	0.020	0.019	0.022	0.019
33	0.029	0.015	0.024	0.015
34	0.036	0.012	0.026	0.012
35	0.042	0.008	0.027	0.009
36	0.049	0.006	0.029	0.006

3.1.2.3 Tercer diafragma.

Para realizar la simulación del tercer diafragma en MWO, se utilizó los valores de inductancia y capacitancia que se establecen en la tabla 3.5, donde para el comportamiento del modo de propagación con polarización paralela al eje mayor de la elipse del tercer diafragma se utiliza los valores de $C3$ y $L3$, en tanto que para el modo de propagación con polarización paralela al eje menor de la elipse del tercer diafragma se utiliza $C8$ y $L8$; los resultados se muestran en la figura 3.8.

Después de la optimización en el software especializado se obtuvo los siguientes resultados mostrados en la figura 3.9, y para los ejes de la elipse se encontraron las siguientes medidas:

- Eje menor (eje x) = 2.884 mm
- Eje mayor (eje y) = 5.627 mm

En cuanto a la eficiencia de la optimización, veremos que se consiguió:

- Best goal function value = 0.052

La cifra del parámetro anterior nos da una idea de que la optimización realizada es peor que las obtenidas anteriormente, esto se comprueba al analizar la tabla 3.6, en la que se ve que el resultado del modo de polarización vertical es muy diferente al que se pretendía conseguir, sin embargo lo rescatable es que el modo de polarización horizontal sí tiene comportamiento similar al esperado.

Tabla 3.5 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el tercer diafragma de la simulación del polarizador en MWO.

Parámetro	Símbolo	Valor
Capacitancia 3	C3	0.00134519 [pF]
Inductancia 3	L3	38.084 [nH]
Capacitancia 8	C8	0.000472339 [pF]
Inductancia 8	L8	18.0823 [nH]

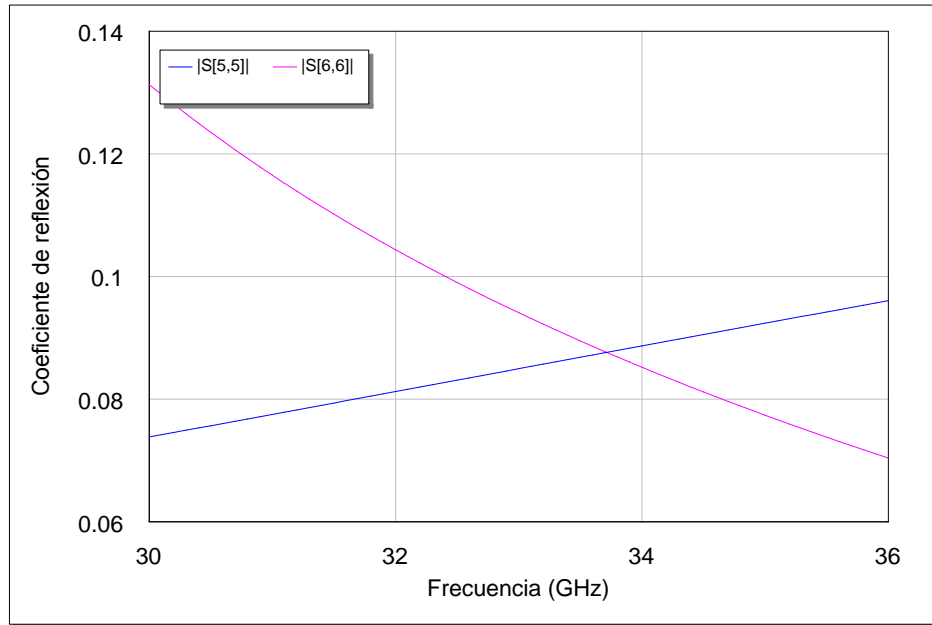


Figura 3.8 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del tercer diafragma S[5,5] (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del tercer diafragma S[6,6] (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.

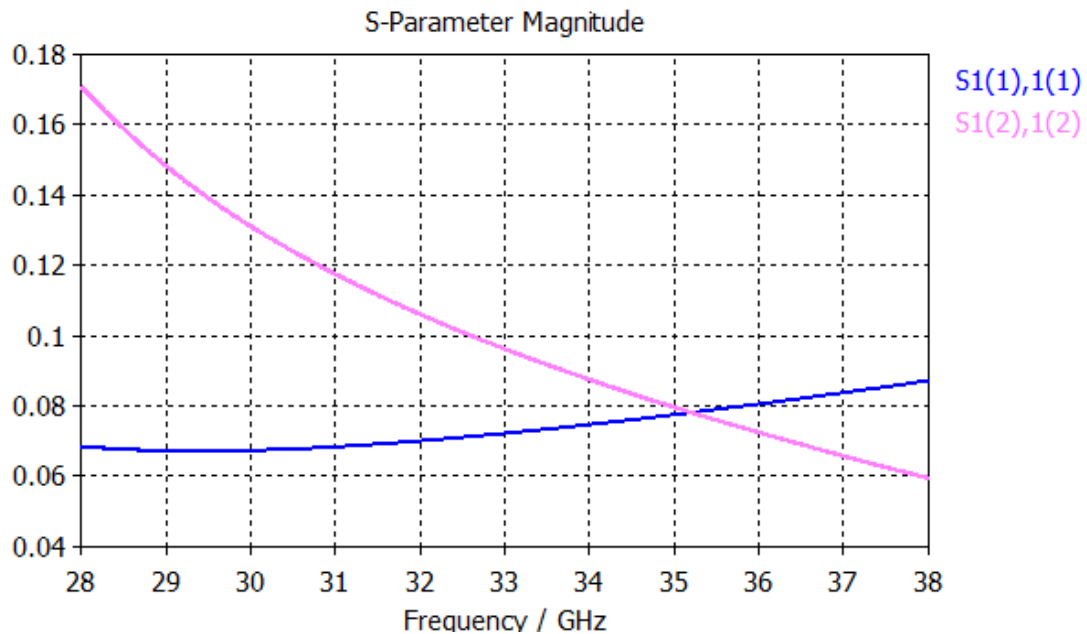


Figura 3.9 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del tercer diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del tercer diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.

Tabla 3.6 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación del tercer diafragma de la simulación del polarizador.

Frecuencia [GHz]	Coeficiente de reflexión en MWO		Coeficiente de reflexión en el software especializado en campo electromagnético	
	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma
30	0.073	0.131	0.067	0.130
31	0.077	0.117	0.068	0.117
32	0.081	0.104	0.069	0.105
33	0.084	0.094	0.072	0.096
34	0.088	0.085	0.074	0.087
35	0.092	0.077	0.077	0.079
36	0.096	0.070	0.080	0.072

3.1.2.4 Cuarto diafragma.

Al utilizar las capacitancias e inductancias de la tabla 3.7, en la simulación del cuarto diafragma, se consiguieron las características del mismo, las cuales se muestran en la figura 3.10. Después de la optimización en el software especializado se consiguieron las características de la figura 3.11 y se obtuvo que para el diseño geométrico del cuarto diafragma se van a utilizar las siguientes medidas:

- Eje menor (eje x)= 2.846 mm
- Eje mayor (eje y)= 7.098 mm

Al analizar la tabla comparativa 3.8 se ve que se consiguieron buenos resultados, pues el coeficiente de reflexión para ambos modos de polarización difiere como máximo cinco milésimas. Lo observado se corrobora con el parámetro anteriormente mencionado:

- Best goal function value = 0.01852

Hasta el momento, en el cuarto diafragma se ha logrado la mejor optimización.

Tabla 3.7 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el cuarto diafragma de la simulación del polarizador en MWO.

Parámetro	Símbolo	Valor
Capacitancia 4	C4	0.000902787 [pF]
Inductancia 4	L4	97.2278 [nH]
Capacitancia 9	C9	0.0006 [pF]
Inductancia 9	L9	15.976 [nH]

Tabla 3.8 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación que atraviesan el cuarto diafragma de la simulación del polarizador.

Frecuencia [GHz]	Coeficiente de reflexión en MWO		Coeficiente de reflexión en software especializado en campo electromagnético	
	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma
30	0.0747	0.14	0.072	0.135
31	0.075	0.124	0.073	0.121
32	0.0757	0.111	0.075	0.109
33	0.0768	0.0993	0.077	0.099
34	0.0781	0.0887	0.079	0.090
35	0.0796	0.0803	0.082	0.082
36	0.0811	0.0721	0.085	0.075

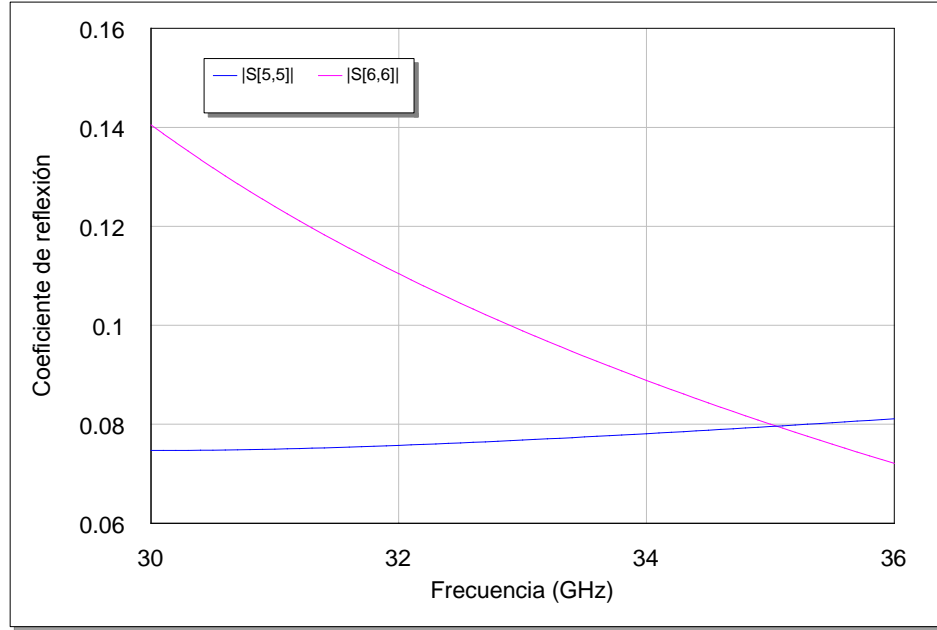


Figura 3.10 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del cuarto diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del cuarto diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.

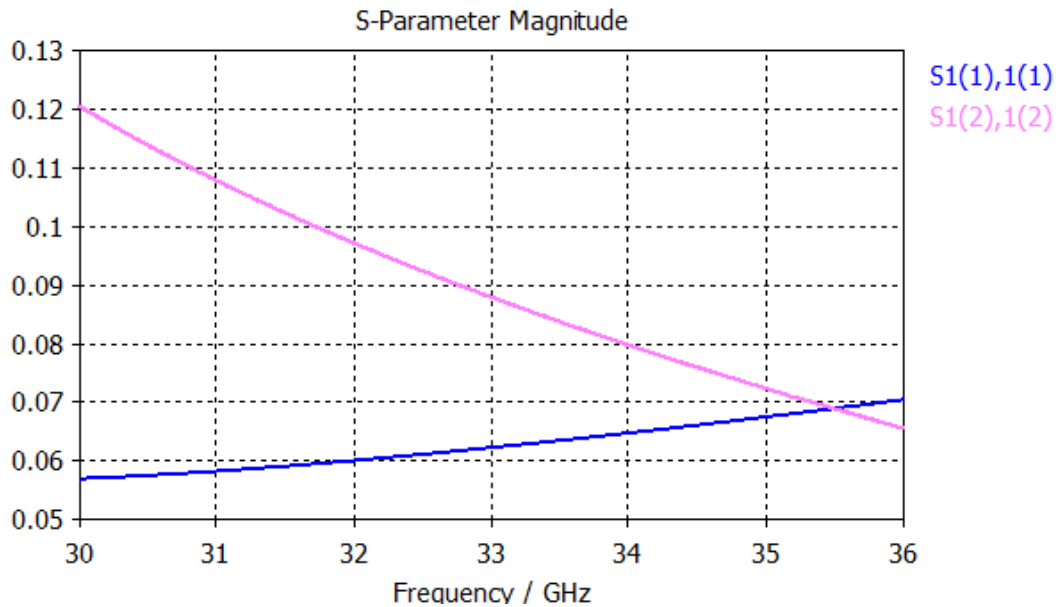


Figura 3.11 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor del cuarto diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor del cuarto diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia del cuarto diafragma de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.

3.1.2.5 Quinto diafragma.

Para la simulación del quinto diafragma se utilizó las inductancias y las capacitancias expresadas en la tabla 3.9, así el diafragma tiene las características de la figura 3.12

La optimización que arrojó el software especializado, es la mostrada en la figura 3.13 y las medidas de la elipse son las siguientes:

- Eje menor (eje x)=2.621 mm
- Eje mayor (eje y)= 7.153 mm

Al analizar la tabla comparativa 3.10, se ve que para ambos modos de polarización al principio los valores son muy parecidos, pero a medida que aumenta la frecuencia estos se van haciendo dispares. Sin embargo esta fue la mejor optimización que se consiguió realizar.

- Best goal function value =0.01352

Tabla 3.9 Inductancias y capacitancias que se utilizan en el quinto diafragma de la simulación del polarizador en MWO.

Parámetro	Símbolo	Valor
Capacitancia 5	C5	0.00152248 [pF]
Inductancia 5	L5	50.3631 [nH]
Capacitancia 10	C10	0.00360382 [pF]
Inductancia 10	L10	12.3511 [nH]

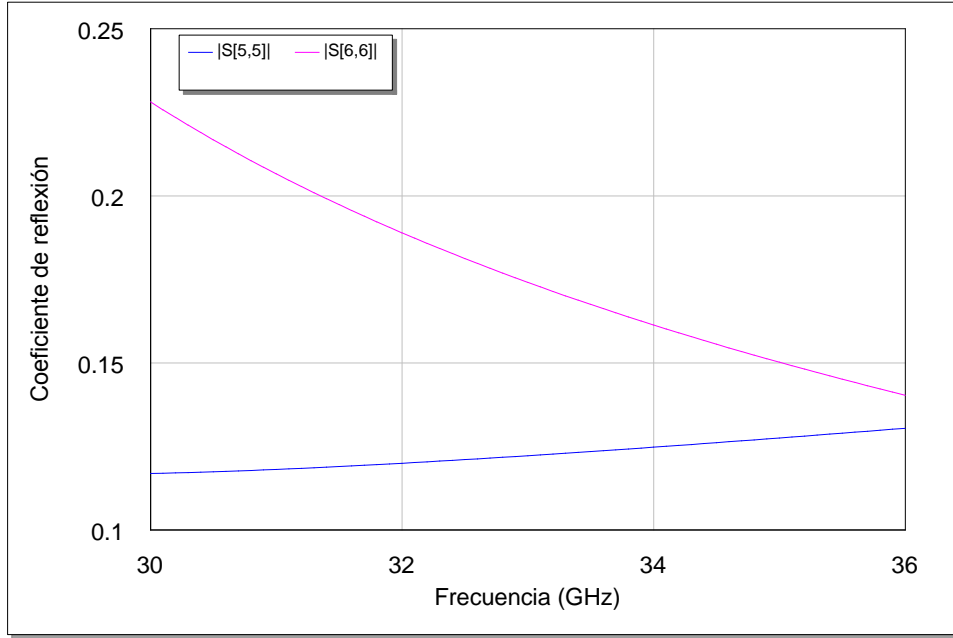


Figura 3.12 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del quinto diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del quinto diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en MWO.

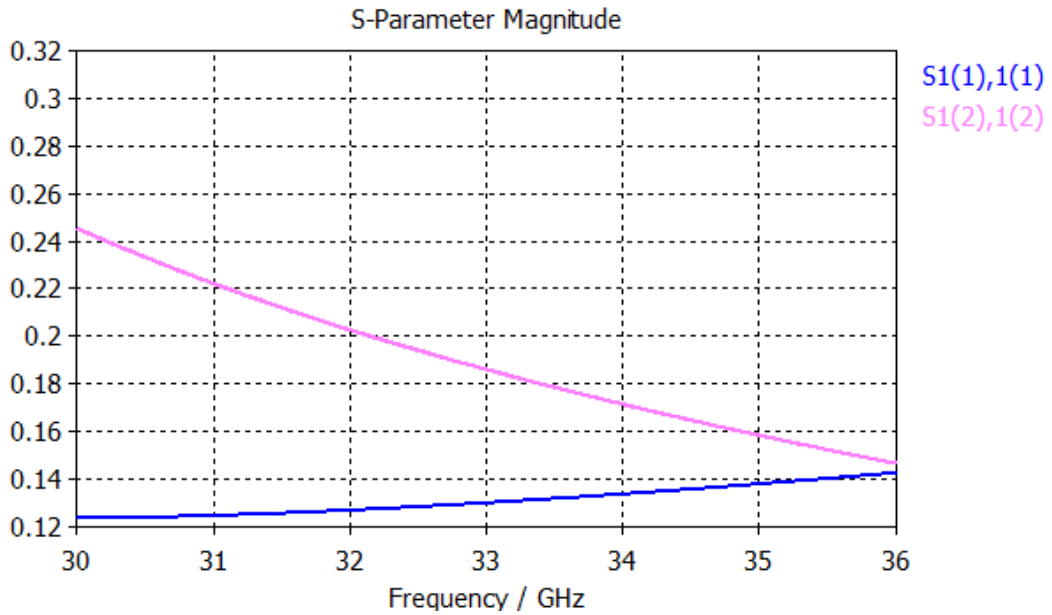


Figura 3.13 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela al eje mayor del quinto diafragma S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela al eje menor del quinto diafragma S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia de la simulación del polarizador en el software especializado en campo electromagnético.

Tabla 3.10 Comparativa del comportamiento del coeficiente de reflexión para los dos modos de propagación que atraviesan el quinto diafragma de la simulación del polarizador.

Frecuencia [GHz]	Coeficiente de reflexión en MWO		Coeficiente de reflexión en software especializado en campo electromagnético	
	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje mayor de la elipse del diafragma	Modo de polarización paralelo al eje menor de la elipse del diafragma
30	0.117	0.228	0.123	0.245
31	0.118	0.208	0.124	0.221
32	0.12	0.19	0.126	0.202
33	0.122	0.174	0.129	0.185
34	0.125	0.161	0.133	0.171
35	0.127	0.15	0.137	0.158
36	0.13	0.14	0.142	0.146

3.1.3 Longitudes entre diafragmas elípticos de la simulación del polarizador.

De la optimización obtenida en MWO, se consiguieron las distancias que existen entre cada par de diafragmas elípticos, las cuales se muestran en la tabla 3.11; donde f_c es la frecuencia de corte del polarizador (analizada en el subtema 2.1.2), f_0 es la frecuencia central a la que opera el polarizador, $Long$ es la distancia que separa al primer diafragma del segundo, $Long1$ es la distancia que separa al segundo diafragma del tercero, $Long2$ es la distancia que separa al tercer diafragma del cuarto, $Long3$ es la distancia que separa al cuarto diafragma del quinto y $Long4$ es la distancia que separa al quinto diafragma del sexto, y como el polarizador presenta simetría en el eje longitudinal, las longitudes entre los diafragmas se repiten.

Tabla 3.11 Características generales de la simulación del polarizador en MWO

Parámetro	Valor
f_c [GHz]	24.3999
f_0 [GHz]	33
Long [mm]	3.75638
Long1 [mm]	6.33088
Long2 [mm]	4.33564
Long3 [mm]	5.50565
Long4 [mm]	4.34119

3.1.4 Análisis de los resultados obtenidos de la simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

El propósito de esta simulación es conseguir en el software especializado un comportamiento lo más parecido a cada diafragma del polarizador realizado en MWO. Para analizar que tan buenos son los resultados que se obtuvieron, a continuación se muestran los resultados gráficos de la simulación, tanto para MWO (fig. 3.14), como para el software especializado (fig. 3.15) y también se realiza la comparación de ambos resultados (tabla 3.12).

Tabla 3.12 Comparativa de resultados de la primera aproximación del polarizador.

Parámetro	Valor	
	Simulación en MWO	Simulación en el software especializado en campo electromagnético
Diferencia de fase [°]	85 - 94.3	88.69 - 104.13
$\Gamma_{\text{máx}}$	0.0163	0.0335
Banda de frecuencias [GHz]	31 - 34.6	30.6 - 33.65

Al comparar los resultados, podemos ver que dista mucho uno de otro, y como se esperaba, el peor resultado se obtiene en el software especializado; lo anterior es

ocasionado principalmente porque en algunos casos los diafragmas ni siquiera se parecen a los requeridos.

En los resultados de la simulación en MWO, se cumple con una diferencia de fase de $90 \pm 5^\circ$ en el rango de 31 GHz a 34.6 GHz con un coeficiente de reflexión máximo de 0.0163 para los dos modos de polarización. Mientras que en los resultados del software especializado en campo electromagnético, el valor del coeficiente de reflexión es menor a 0.05 y la diferencia de fase entre los modos de es $90^\circ \pm 5^\circ$, para el rango de frecuencias de entre 32 GHz y 34 GHz; lo que nos deja únicamente con una banda de operación de 2 GHz donde el polarizador funciona eficientemente.

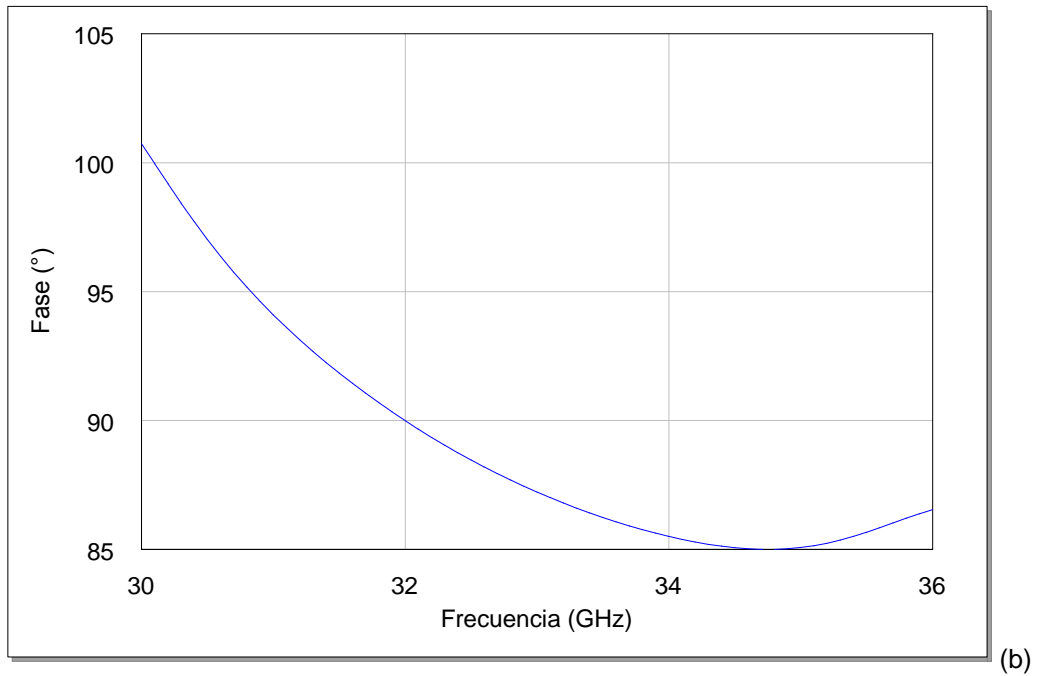
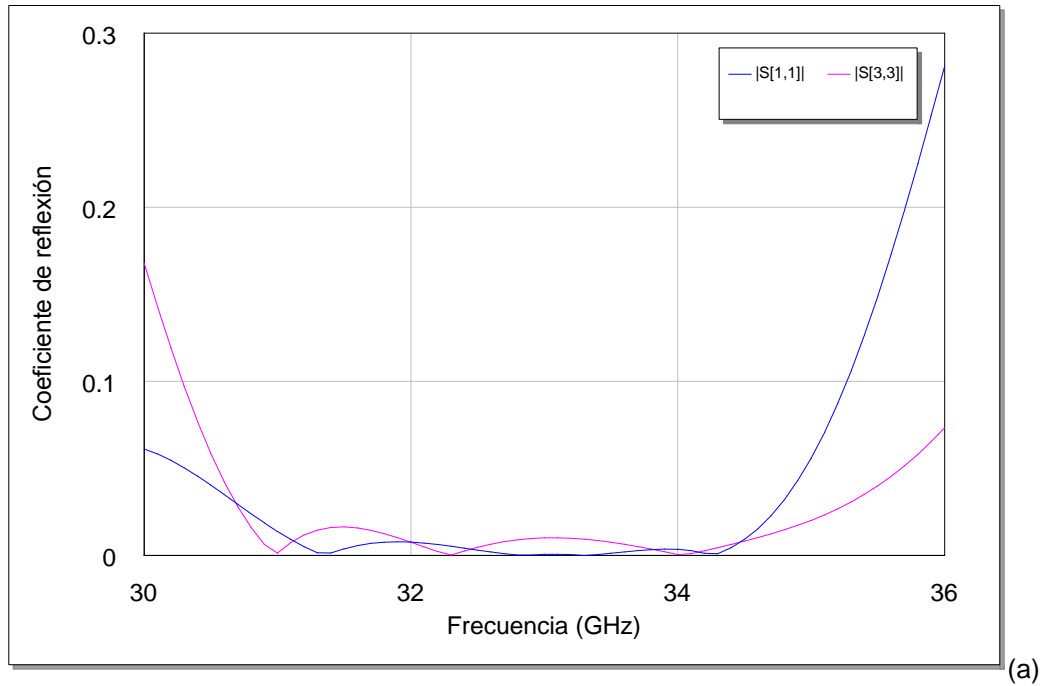
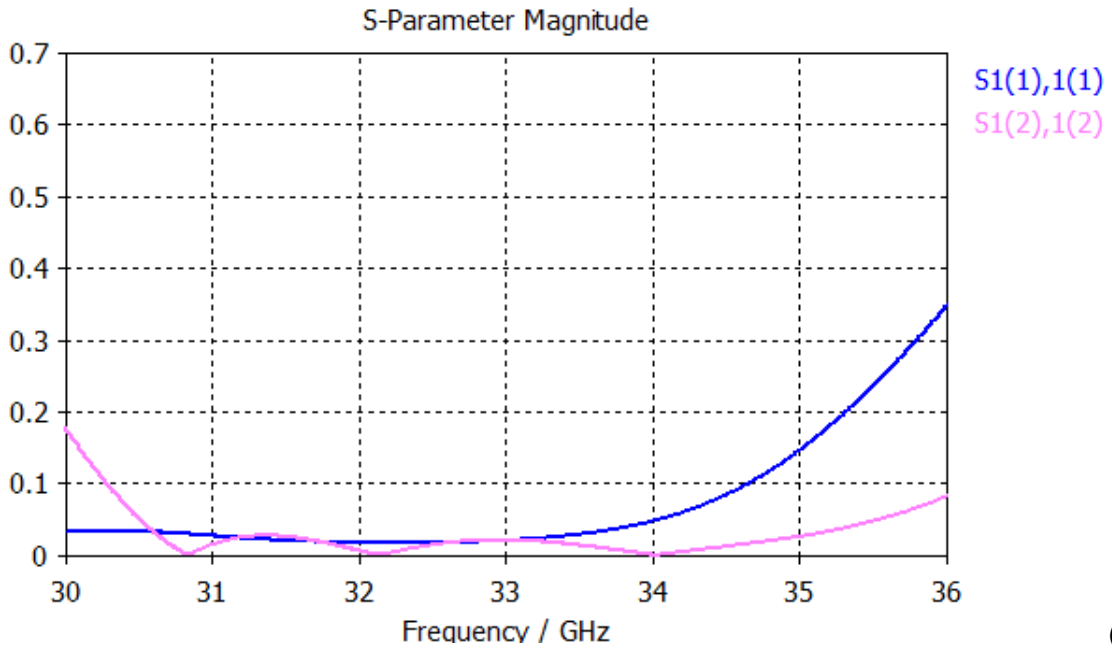
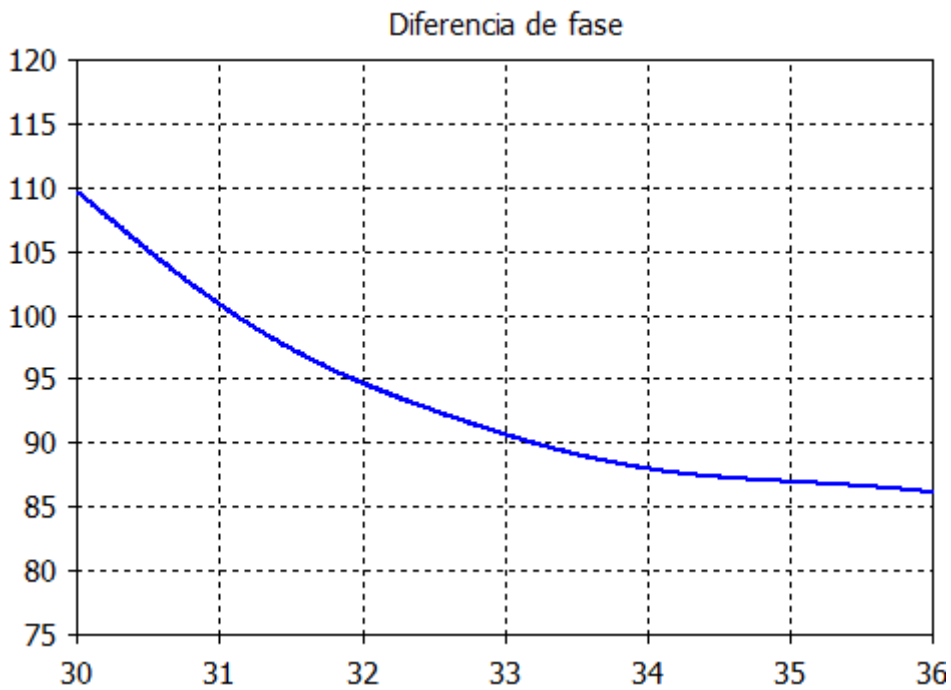


Figura 3.14 (a) Coeficiente de reflexión del modo de polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S[1,1]$ (línea azul) y del modo de polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S[3,3]$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en MWO.



(a)



(b)

Figura 3.15 (a) Coeficiente de reflexión del modo de polarización con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la simulación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado en campo electromagnético.

3.2 Optimización de las longitudes del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Para optimizar las características del polarizador se realiza el proceso inverso, es decir, los resultados de los diafragmas obtenidos en el software especializado se van a trasladar a MWO, de esta forma se va a conseguir simular en MWO el polarizador que se logró en el software especializado. Lo anterior se realiza con la finalidad de optimizar las longitudes del polarizador, pues las distancias entre cada par de diafragmas ahora se consideran como únicas variables para optimizar.

3.2.1 Longitudes entre diafragmas elípticos de la optimización del polarizador.

En tabla 3.13 se muestra únicamente las medidas de las longitudes ya optimizadas del polarizador, pues las demás características permanecen idénticas a las encontradas en la simulación en el software especializado del subtema anterior.

Tabla 3.13 Longitudes optimizadas para la tercera aproximación del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Parámetro	Valor
Long [mm]	5.81682
Long1 [mm]	5.70703
Long2 [mm]	5.40919
Long3 [mm]	5.55261
Long4 [mm]	5.01492

3.2.2 Análisis de los resultados obtenidos de la optimización del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Como ya se comentó, el objetivo principal de optimizar las distancias entre los diafragmas del polarizador, es mejorar los resultados obtenidos en la simulación del polarizador.

Al limitar las características de los diafragmas, en MWO resultó que en el rango de frecuencias de 31 GHz a 33.4 GHz se cumple la diferencia de fase de $90 \pm 5^\circ$ (fig. 3.16(b)) y se tiene un coeficiente de reflexión máximo de 0.0469 (fig. 3.16(a)); dejando un ancho de banda a 2.4 GHz. En tanto que, en los resultados conseguidos en el software especializado (fig. 3.17), la diferencia de fase cumple con el objetivo de $90^\circ \pm 5^\circ$ en el rango de 32 GHz a 35.25 GHz y un coeficiente de reflexión aceptable 0.0469 de 30 GHz a 33.2 GHz; dejando un rango de operación de 1.2 GHz.

Este resultado en el software especializado no es bueno, pero se notó un cambio importante en los resultados de la diferencia de fase entre los modos de polarización, pues se consiguió acercarla algunos grados al objetivo. Sin embargo al no haber tomado en cuenta los factores de fabricación, no tiene sentido seguir trabajando en estas simulaciones.

Cabe señalar que los resultados de la simulación del coeficiente de reflexión respecto a la frecuencia, son iguales para MWO y en el software especializado, pero en el caso de la diferencia de fase en el software especializado se incrementa más de 4° con respecto a la simulación de MWO, esto no debería ocurrir pues las consideraciones en ambas simulaciones son iguales. Sin embargo el observar lo anterior permite contemplarlo para simulaciones futuras.

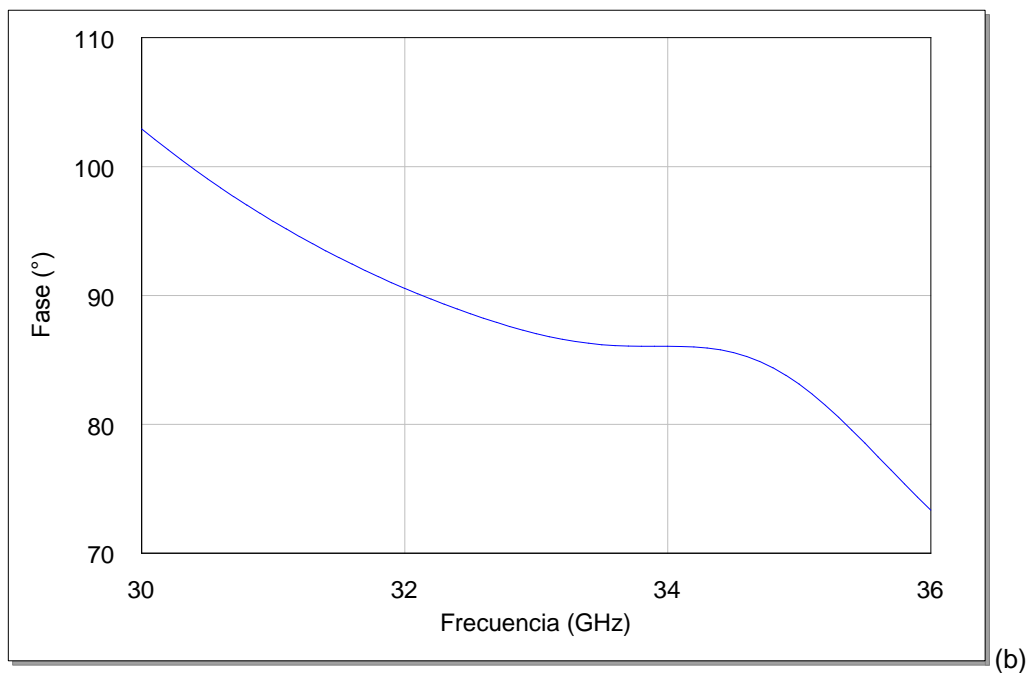
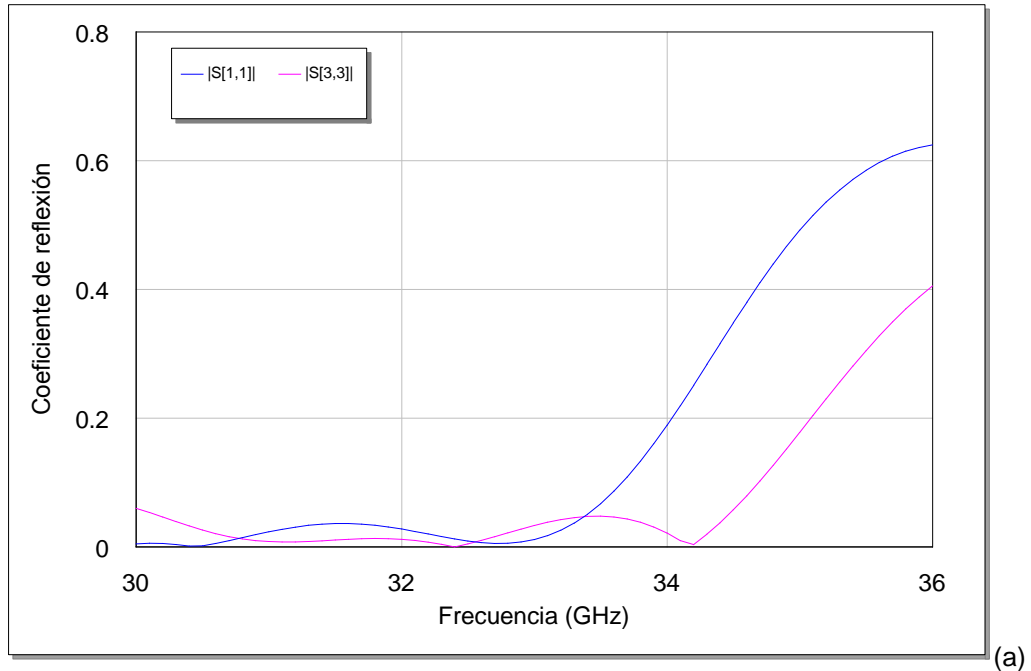
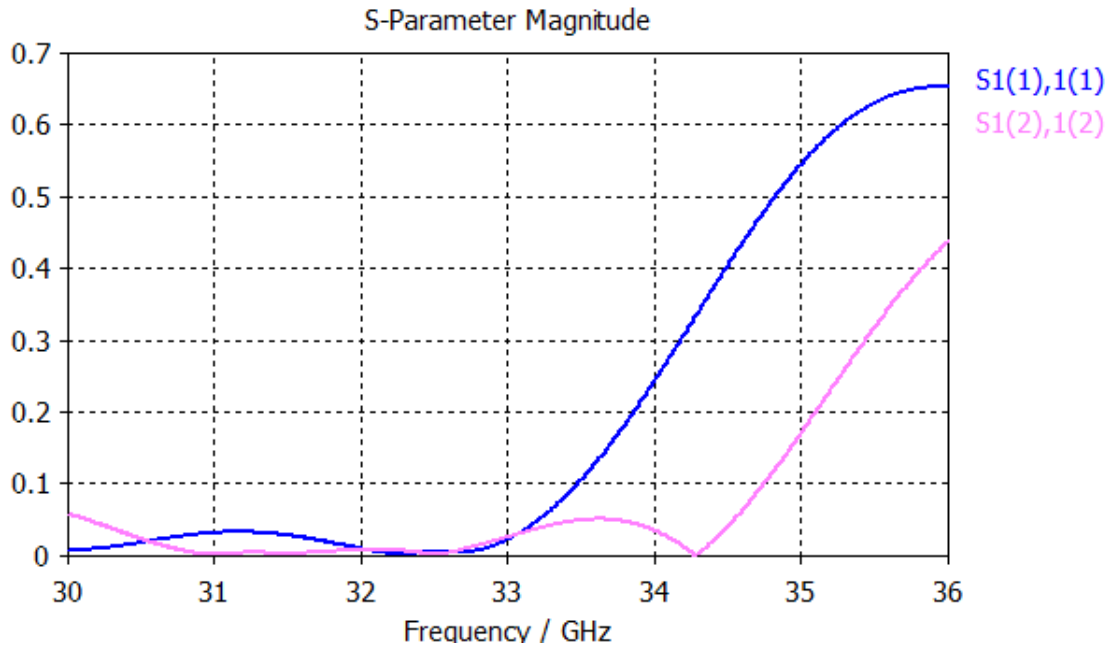
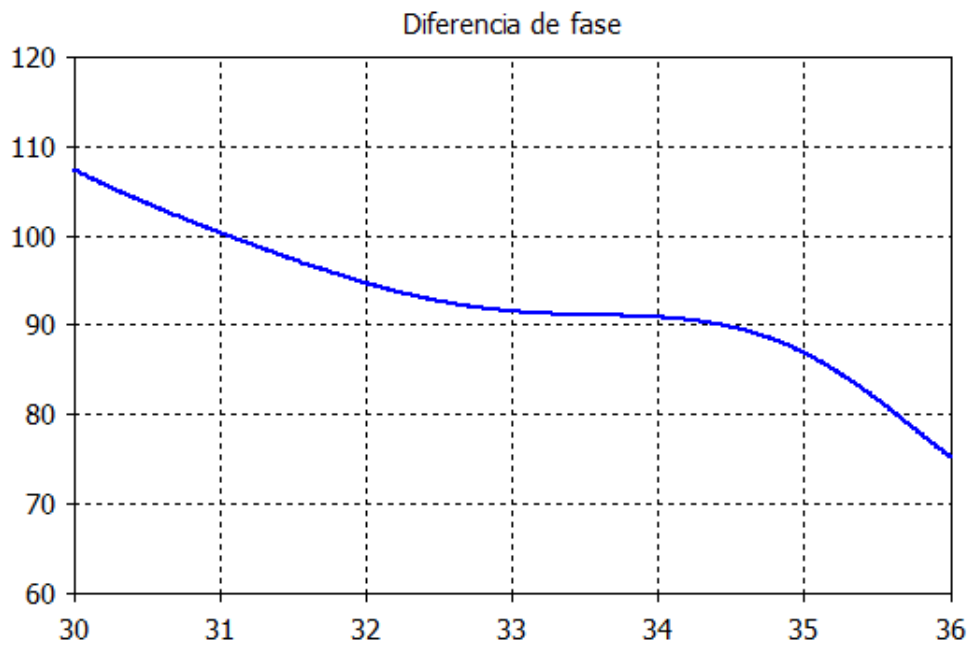


Figura 3.16 (a) Coeficiente de reflexión del modo de polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S[1,1]$ (línea azul) y del modo de polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S[3,3]$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la optimización del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en MWO.



(a)



(b)

Figura 3.17 (a) Coeficiente de reflexión del modo de polarización con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la optimización del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado en campo electromagnético.

Tabla 3.14 Comparativa de resultados de la simulación del polarizador.

	Valor	
	Simulación en MWO	Simulación en el software especializado en campo electromagnético
Diferencia de fase [°]	86.3-102	91.3 - 105
$\Gamma_{\text{máx}}$	0.0469	0.0469
Banda de frecuencias [GHz]	30.2- 33.4	30.2 - 33.2

3.3 Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se plasmó el resultado de la simulación y optimización realizada del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos, donde en la primera simulación se consiguió un ancho de banda de operación de 2 GHz, en tanto que en la optimización se obtuvo un ancho de banda de 1.2 GHz. Así que contrario a lo que se esperaba, en el caso del ancho de banda no se obtuvo mejor resultado en la optimización.

Sin embargo, al optimizar las longitudes entre los diafragmas se logró principalmente mejorar la diferencia de fase; lo cual nos sirve para darnos cuenta que sí es posible modificar los características del polarizador para favorecer los resultados.

Además, a través de la realización de simulaciones se observó que trasladar el polarizador de MWO al software especializado, es una labor engorrosa, pues no se consigue optimizar fácilmente en este último; ocasionando que no se puedan alcanzar los resultados obtenidos en MWO; en cambio es muy sencillo realizar el proceso inverso. Lo anterior se debe a que en MWO diafragmas tienen más flexibilidad en sus características, en tanto que el software especializado los diafragmas se ven limitados por la forma geométrica de los mismos.

Igualmente, es importante mencionar que no se consideraron detalles de fabricación, por lo tanto no es buena idea partir de estas simulaciones para la realización del diseño del polarizador. Sin embargo, el análisis de estas permite deducir el procedimiento para realizar el diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos, que es el siguiente:

- Optimización en MWO del polarizador.
- Obtención de las características de cada diafragma que compone al polarizador de la optimización llevada a cabo en MWO.
- Trasladar los diafragmas al software especializado.
- Realizar las modificaciones pertinentes a los diafragmas en MWO, para poder trasladarlos con mayor facilidad al software especializado.
- Trasladar los diafragmas del software especializado a MWO, y optimizar las longitudes entre cada par de diafragmas.
- Armar en el software especializado el polarizador con los diafragmas y las longitudes alcanzadas, y
- Finalmente, optimizar en el software especializado.

CAPÍTULO IV.- Optimización del polarizador.

El propósito del presente capítulo es el mejorar las características del polarizador, lo cual se realiza mediante el proceso de optimización. Sin embargo, este proceso es tardado, por lo que es recomendable que antes de llevarse a cabo, se consideren el mayor número de inconvenientes que se presentarán al momento de la fabricación; para así lograr la mayor mejora posible de las características del polarizador.

4.1 Requerimientos para la fabricación del polarizador.

Para fabricar los diafragmas elípticos del polarizador es necesario utilizar la técnica conocida como fotolitografía, que es el proceso de transferencia de una máscara de cierta forma geométrica a la superficie de un substrato dieléctrico, mediante el uso de luz.

4.1.1 Substrato dieléctrico (RO-5880).

El substrato que se utiliza para la fabricación de los diafragmas, es de Rogers Corporation y se trata del material RO-5880, que tiene las siguientes características:

Tabla 4.1 Características del substrato RO-5880

Parámetro	Valor
Permitividad relativa ϵ_r	2.2
Permeabilidad magnética relativa μ_r	1
Espesor (l_{sus})	0.127 mm

De la tabla 4.1 el parámetro permitividad relativa (constante dieléctrica) representa la capacidad que tiene el material atravesado de utilizar la energía de la onda electromagnética para crear polarización. Así que una permitividad dieléctrica

grande implica que con el mismo campo eléctrico se obtienen polarizaciones mayores. En tanto que el término permeabilidad magnética es la capacidad de un medio para atraer y hacer pasar a través de él campos magnéticos.

4.1.1.1 Características del sustrato dieléctrico.

Para lograr mejorar el rendimiento del polarizador, se debe entender claramente cuál es el comportamiento del sustrato dieléctrico, por lo que se simulan sus características (coeficiente de reflexión para el modo de polarización vertical y para el modo de polarización horizontal), obteniendo los resultados mostrados en la figura 4.1:

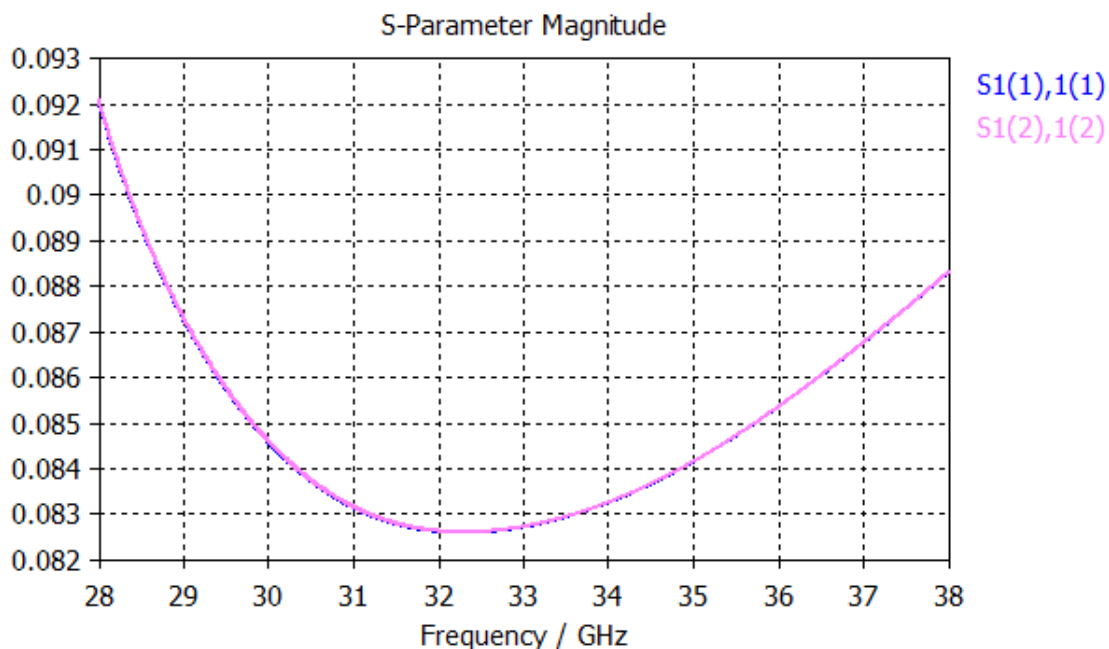


Figura 4.1 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas S1(1),1(1) (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas S1(2),1(2) (línea rosa) respecto a la frecuencia del sustrato dieléctrico del material RO-5880 en el software especializado.

Para que el rendimiento del polarizador sea óptimo, se trasladan los resultados del sustrato dieléctrico a MWO, simulándolo como una guía de onda circular rellena de RO-5880 y utilizando las fórmulas de guía de onda circular.

Recordando que se debe agregar el efecto de la dispersión en la simulación en MWO, la longitud eléctrica del substrato El_{sus} se calcula como:

$$\begin{aligned}
 El_{sus} &= l_{sus} \cdot \sqrt{k^2 - k_c^2} \\
 &= k \cdot l_{sus} \cdot \sqrt{1 - \frac{k_c^2}{k^2}} \\
 &= k \cdot l_{sus} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f\sqrt{\epsilon_r}}\right)^2}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

donde:

l_{sus} .- es la longitud de la guía de onda circular.

k .- es el número de onda.

k_c .- es el número de onda de corte.

f .- es la frecuencia operativa.

f_c .- es la frecuencia de corte.

ϵ_r .- es la permitividad relativa del substrato RO-5880

Así que, para que MWO considere el efecto de la dispersión, se va a multiplicar la longitud eléctrica del substrato (El_{sus}) por la frecuencia central (f_0) y se divide entre la frecuencia operativa (f).

$$\begin{aligned}
 El_{sus\ d} &= \frac{k \cdot l_{sus} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f\sqrt{\epsilon_r}}\right)^2}}{f} \cdot f_0 \\
 &= \frac{2\pi \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot l_{sus} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f\sqrt{\epsilon_r}}\right)^2}}{c \cdot f} \cdot f_0
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

$$= \frac{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot l_{sus} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f\sqrt{\epsilon_r}}\right)^2}}{c} \cdot f_0$$

Mientras que la impedancia característica se calcula como:

$$Z_0 = \frac{120\pi \cdot 2}{\sqrt{2.2 \left(1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2\right)}} \quad (4.3)$$

Considerando un radio de 3.6 mm. y una permitividad relativa de 2.2, se calcula la frecuencia de corte para el modo TE_{11} , partiendo de la ecuación 2.32,

$$f_{c_{11}} = \frac{\rho_{11}}{2\pi \cdot a\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (4.4)$$

$$f_{c_{11}} = \frac{\rho_{11} \cdot c}{2\pi \cdot a\sqrt{\epsilon_r}}$$

donde:

a.- es el radio de la guía de onda circular.

c.- es el valor de la velocidad de la luz en el vacío ($2.9979 \times 10^8 [m/s]$)

$\rho'_{11} = 1.841$ (obtenido de la tabla 2.1)

$$f_c = \frac{(1.841)(2.9979 \times 10^8 [m/s])}{2\pi \cdot 3.6 [mm] \sqrt{2.2}}$$

$$f_c = 16.4504 [GHz]$$

Los resultados anteriores se utilizan para simular en MWO cada diafragma del polarizador con su respectivo substrato de RO-5880. El resultado de la simulación se muestra en la figura 4.2, y al compararla con la figura 4.1, se observa que tienen un comportamiento similar, el cual para posteriores simulaciones se considerará aceptable.

También vale la pena resaltar que el substrato provoca reflexión, en algunos casos incluso mayor a la que provocan los diafragmas, por lo que para lograr un mejor resultado se volverá a optimizar el polarizador en MWO, posteriormente se trasladará al software especializado y posteriormente se optimizará en este último. Sin embargo, antes de realizar lo descrito anteriormente, se efectuará la compensación de las longitudes, esto es para evitar más inconvenientes con el diseño al momento de la fabricación.

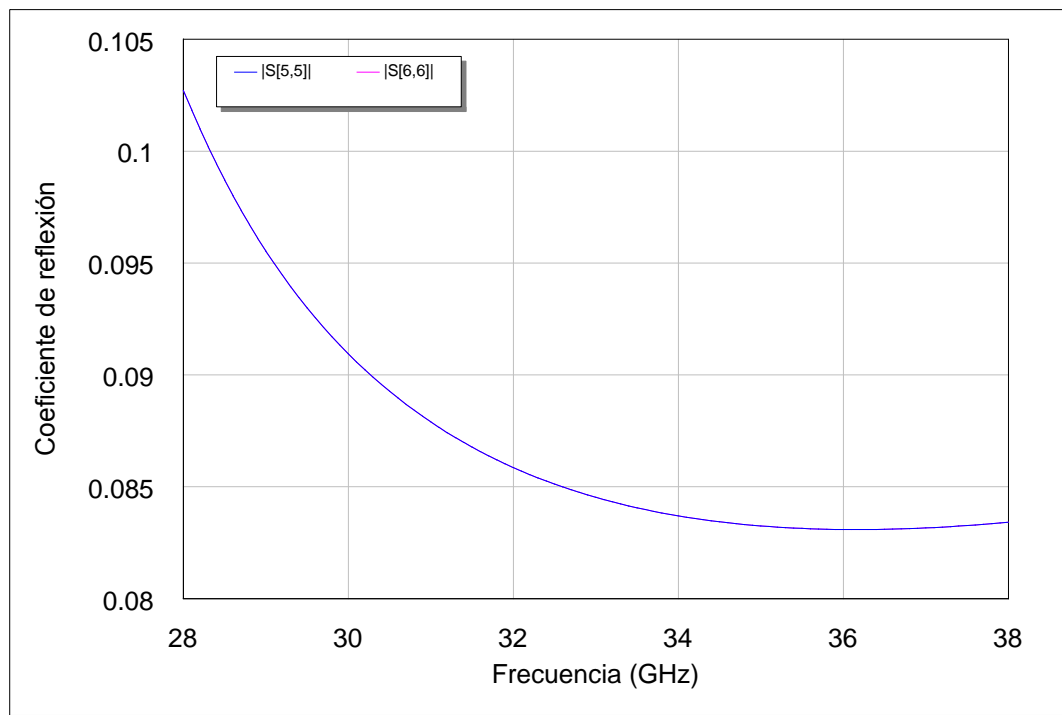


Figura 4.2 Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a las elipses de los diafragmas S[5,5] (línea azul) y del modo con polarización paralela a las elipses de los diafragmas S[6,6] (línea rosa) respecto a la frecuencia del substrato dieléctrico del material RO-5880 en MWO.

4.1.2 Compensación de las longitudes por la colocación del sustrato.

Si no se considera el grosor del sustrato colocado, las longitudes establecidas no serán las correctas y en consecuencia se perjudicará principalmente la diferencia de fase del polarizador. El que las longitudes sean incorrectas se debe a que el sustrato de material dieléctrico se ve como una guía de onda circular, así que se debe tratar de compensar esta consideración modificando las longitudes, esto se logra al restar a las longitudes de separación entre diafragmas (l_{long1} , l_{long2} , l_{long3} , l_{long4} y l_{long5}) lo conseguido de la siguiente expresión:

$$l_{diafragma} = l_{sus} \cdot \sqrt{\epsilon_r - 1} \quad (4.5)$$

donde:

$$l_{sus} = 0.127 \text{ mm.}$$
$$\epsilon_r = 2.2$$

Por lo que, la longitud que se resta a cada distancia que separa a los diafragmas es de 0.139 mm.

4.2 Simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Para el diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos, se tomó como referencia la optimización del polarizador realizada en MWO del capítulo anterior, pero se le agregó la consideración del sustrato dieléctrico y la compensación de las longitudes eléctricas.

4.2.1 Características generales de la simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Al momento de trasladar los diafragmas de la nueva optimización en MWO al software especializado, se encontró que la tarea es aún más engorrosa que en el capítulo anterior; y sólo se encontró un buen resultado en uno de los diafragmas (las inductancias y capacitancias que lo simulan se muestran en la tabla 4.2). Con

la premisa de encontrar un buen diseño para el polarizador, este diafragma se utilizó para formar el polarizador con diez diafragmas elípticos iguales a este, pero con diferente longitud de separación entre ellos (tabla 4.3); y conservando la simetría longitudinal.

Para obtener las longitudes a utilizar se optimizó en MWO, los resultados que arrojaron las consideraciones anteriores se muestran en la figura 4.3 con la respectiva compensación de longitudes vista en el subtema 4.1.2.

Tabla 4.2 Inductancias y capacitancias del diafragma utilizado para la simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Parámetro	Símbolo	Valor
Capacitancia 1	C1	0.00121324 [pF]
Inductancia 1	L1	47.6591 [nH]
Capacitancia 2	C2	0.000458431 [pF]
Inductancia 2	L2	18.0596 [nH]

De la tabla 4.2, $C1$ y $L1$ corresponden a la capacitancia e inductancia respectivamente, del modo con polarización paralela al eje mayor de la elipse del diafragma utilizado en la simulación final del polarizador, en tanto, que $C2$ y $L2$ corresponden a la capacitancia e inductancia respectivamente del modo con polarización paralela al eje menor de la elipse del mismo diafragma.

Se debe mencionar que para simular cada substrato dieléctrico, es necesario considerar que al momento de la fabricación el radio del substrato tendrá un valor de 4 mm, debido a que el substrato va dentro de un cilindro de metal y dentro se coloca la guía de onda circular de radio de 3.6 mm. Sin embargo en MWO se puede seguir considerando el radio del substrato dieléctrico como 3.6 mm, porque el radio no es un parámetro que en este software modifique el comportamiento del substrato dieléctrico.

Las medidas del diafragmas elípticos utilizado son las siguientes:

- eje menor (eje x)= 2.850 mm
- eje mayor (eje y)= 7.2 mm

Tabla 4.3 Parámetros utilizados en la simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Características	Valor
f_c [GHz]	24.3999
f_0 [GHz]	33
Long [mm]	8.7156
Long1 [mm]	1.0464
Long2 [mm]	7.6462
Long3 [mm]	0.91474
Long4 [mm]	7.3625

4.2.2 Análisis de los resultados obtenidos de la simulación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

En la figura 4.3(b) se observa que la diferencia de fase lograda entre el modo de polarización vertical y el horizontal, tiene un error de fase de $\pm 5.4^\circ$. Se logró también un ancho de banda de 5.17 GHz, pero se tiene la desventaja que el coeficiente de reflexión máximo para ambos modos de polarización se incrementó a 0.168. Los resultados conseguidos se establecen en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Resultados de la aproximación final del polarizador

Características	Valores
Diferencia de fase [°]	84.6 -90.64
$\Gamma_{\text{máx}}$	0.168
Banda de frecuencias [GHz]	30.97- 36.14

Como los resultados obtenidos en la diferencia de fase y en el ancho de banda del polarizador son satisfactorios, partiremos de este polarizador para optimizarlo y mejorar el coeficiente de reflexión para ambos modos de polarización.

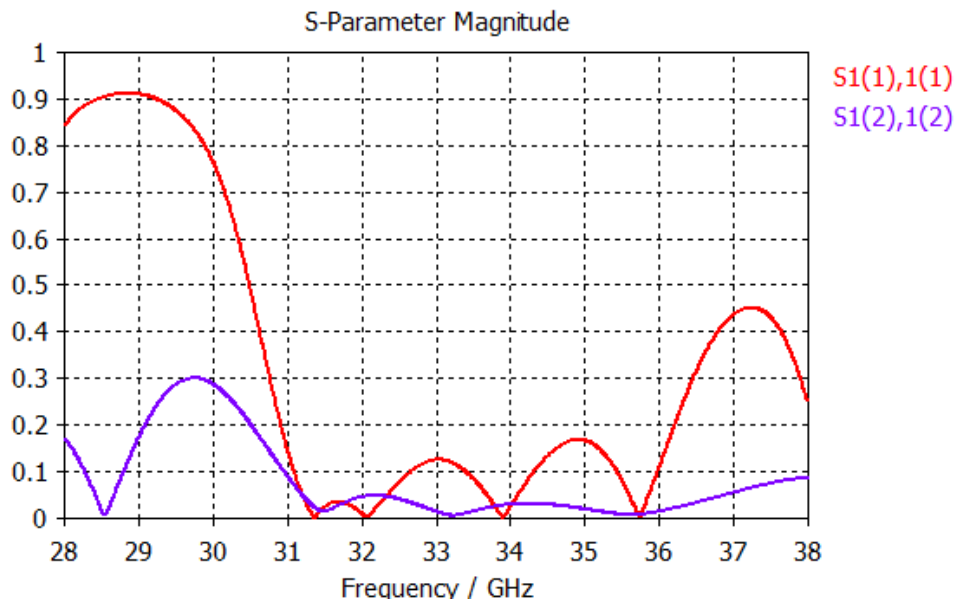
4.3 Diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Para el diseño final del polarizador se requirió optimizar en el software especializado, con la consigna de disminuir en ambos modos de polarización el coeficiente de reflexión, pero sin descuidar el ancho de banda y la diferencia de fase.

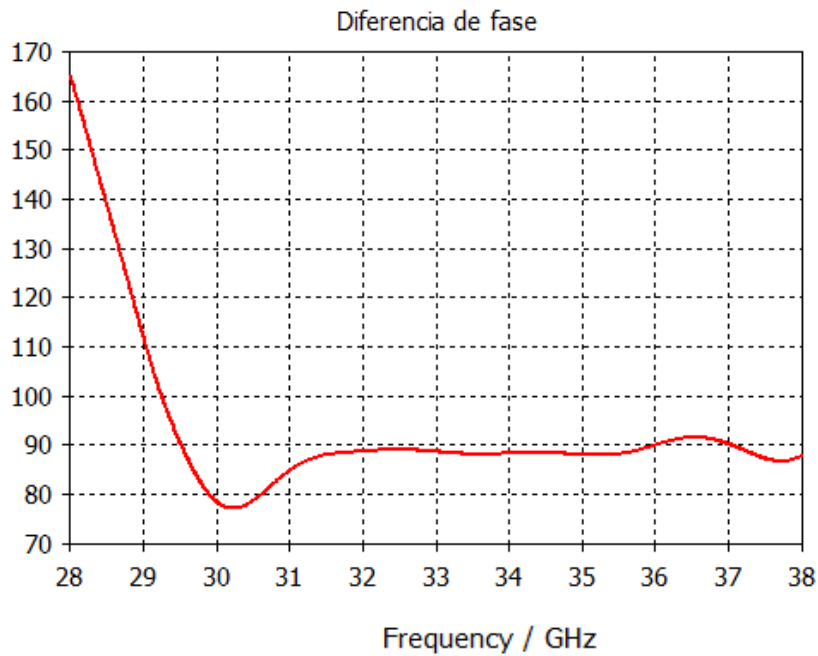
4.3.1 Características generales del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Para la optimalización lograda se realizó el siguiente procedimiento:

- Se partió de la simulación del polarizador con diafragmas elípticos idénticos (subtema 4.2).
- Se optimizaron en el software especializado, los ejes mayores y menores de cada elipse que compone cada uno de los diafragmas del polarizador.
- Se trasladaron los diafragmas obtenidos a MWO, con la finalidad de optimizar las longitudes entre cada par de diafragmas.



(a)



(b)

Figura 4.3 (a) Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, de la optimización del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado.

- Finalmente, se simuló en el software especializado, el polarizador con los diafragmas elípticos optimizados en este software y las longitudes optimizadas en MWO.

El resultado de la optimización de las longitudes en MWO, se exhibe en la tabla 4.5; en tanto que, las medidas de los ejes menores y mayores de las elipses que componen cada diafragma del polarizador se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.5 Parámetros utilizados en el diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Características	Valor
f_c [GHz]	24.3999
f_0 [GHz]	33
Long [mm]	2.32542
Long1 [mm]	6.47327
Long2 [mm]	1.78572
Long3 [mm]	6.82213
Long4 [mm]	1.58168

Tabla 4.6 Medidas de los ejes de los diafragmas que componen el diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Número de diafragma	Eje mayor [mm]	Eje menor [mm]
1	6.965	2.854
2	7.100	2.806
3	6.657	2.991
4	6.822	2.843
5	7.043	2.827

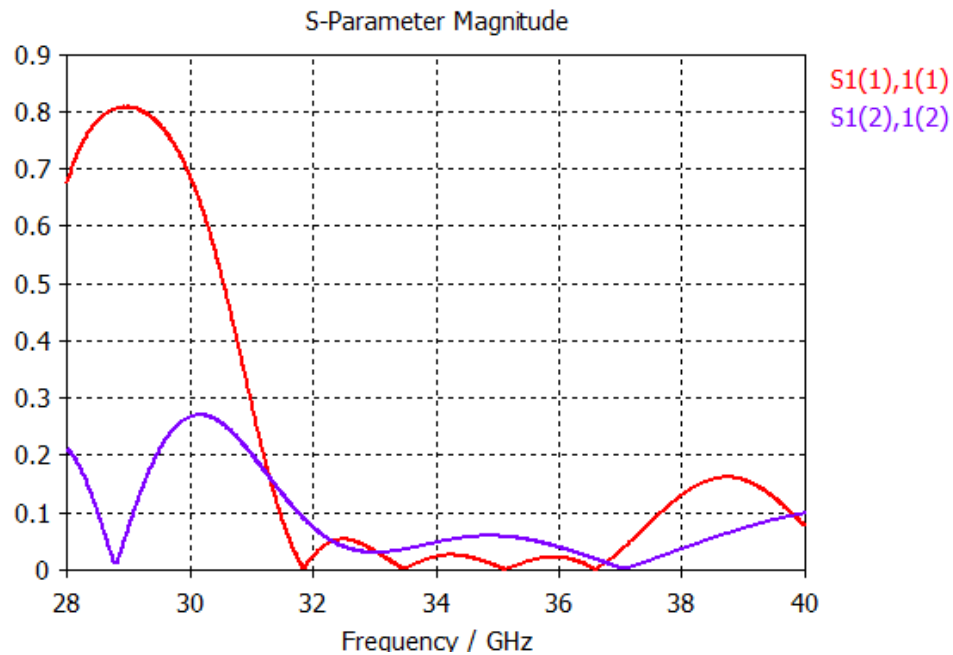
4.3.2 Análisis de los resultados obtenidos del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

De la figura 4.5(a), se debe recordar que $S_{1(1),1(1)}$ representa el coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas, por su parte $S_{1(2),1(2)}$ es el coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas, por lo tanto, para la banda de operación de 31.92 GHz a 37.04 GHz el coeficiente de reflexión máximo para ambos modos de polarización es de 0.056 y como se ve en la figura 4.5(b) se tiene un error de fase de $\pm 3.52^\circ$. Estos resultados se observan más claramente en la tabla 4.7.

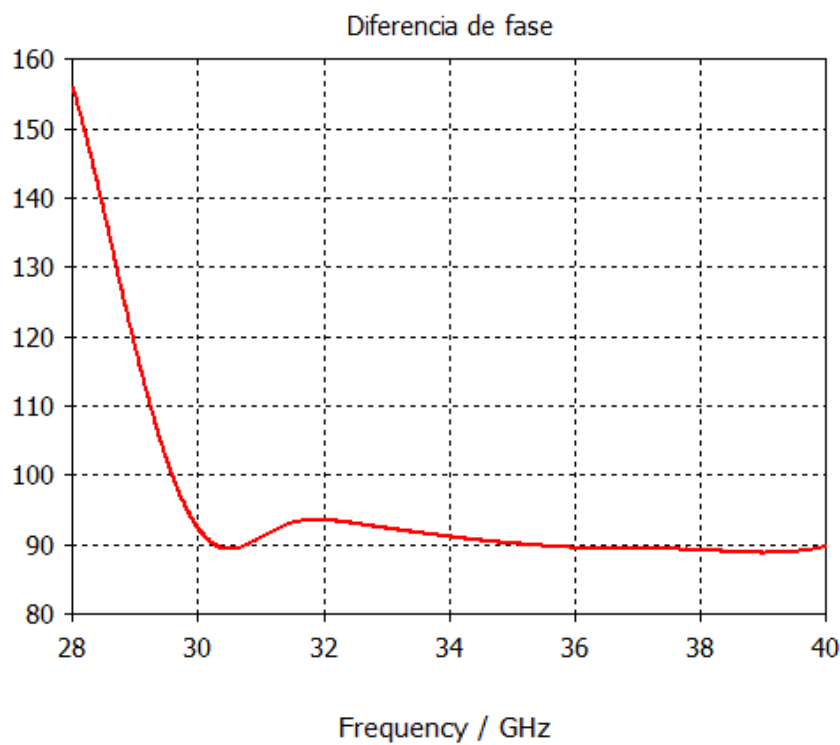
Tabla 4.7 Resultados de la aproximación final del polarizador

Características	Valores
Diferencia de fase [°]	89.28 -93.52
$\Gamma_{m\acute{a}x}$	0.056
Banda de frecuencias [GHz]	31.92- 37.04

Existe otro parámetro relacionado con el funcionamiento del polarizador que es el de "pérdidas de retorno" o "return loss" (RL) en terminología inglesa, el cual es una forma de expresar el grado de adaptación de una carga; donde a mayor RL mejor adaptación y viceversa, dado que este concepto indica pérdidas no se debe usar el signo menos para no caer en redundancias. Para la banda de frecuencia de operación, tanto RL1 (pérdidas de retorno para el modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas) como RL2 (pérdidas de retorno para el modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas) tienen un valor mayor a 24.63 dB y se considera aceptable cuando un polarizador posee un valor de pérdidas de retorno mayor a -23 dB; por lo tanto, el valor de pérdidas de retorno para el polarizador en su banda de frecuencias de operación es muy bueno.



(a)



(b)

Figura 4.4 (a) Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas $S_{1(1),1(1)}$ (línea azul) y del con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas $S_{1(2),1(2)}$ (línea rosa) respecto a la frecuencia y (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado.

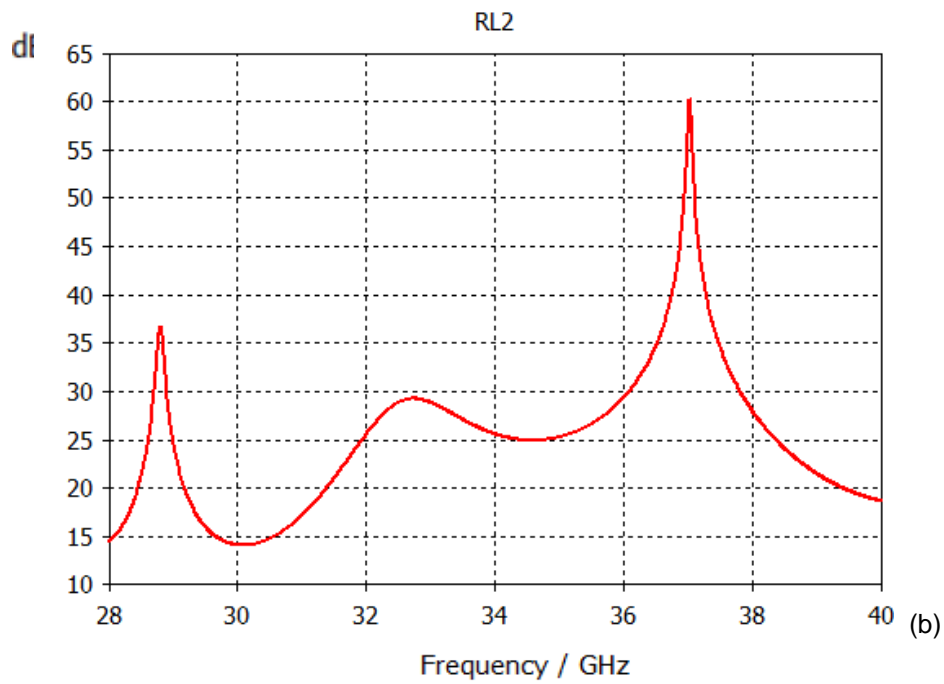
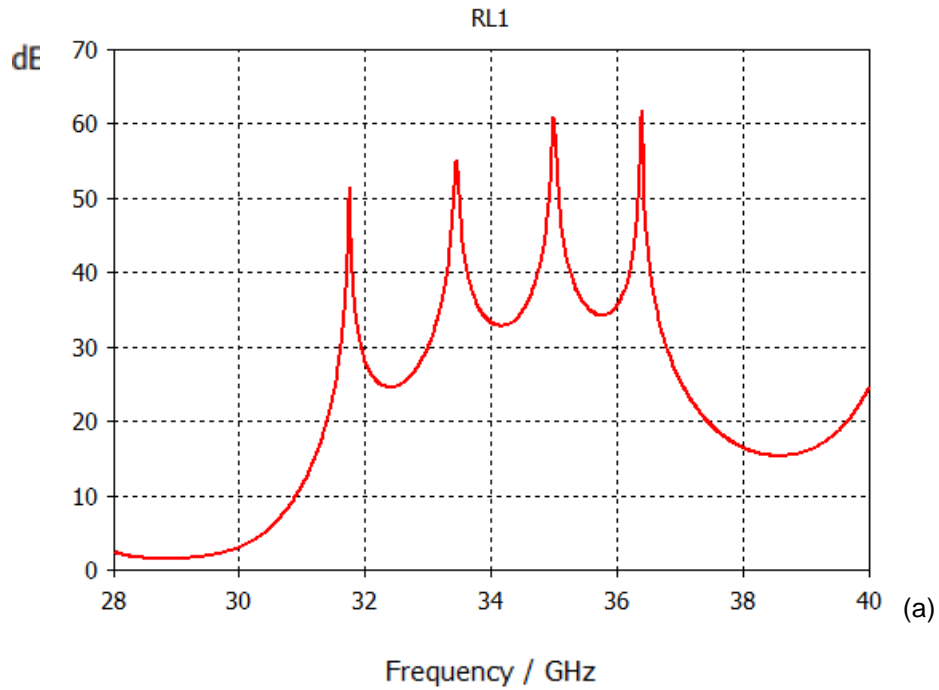


Figura 4.5 (a) Pérdidas de retorno del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas con respecto a la frecuencia y (b) pérdidas de retorno del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas con respecto a la frecuencia, del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado.

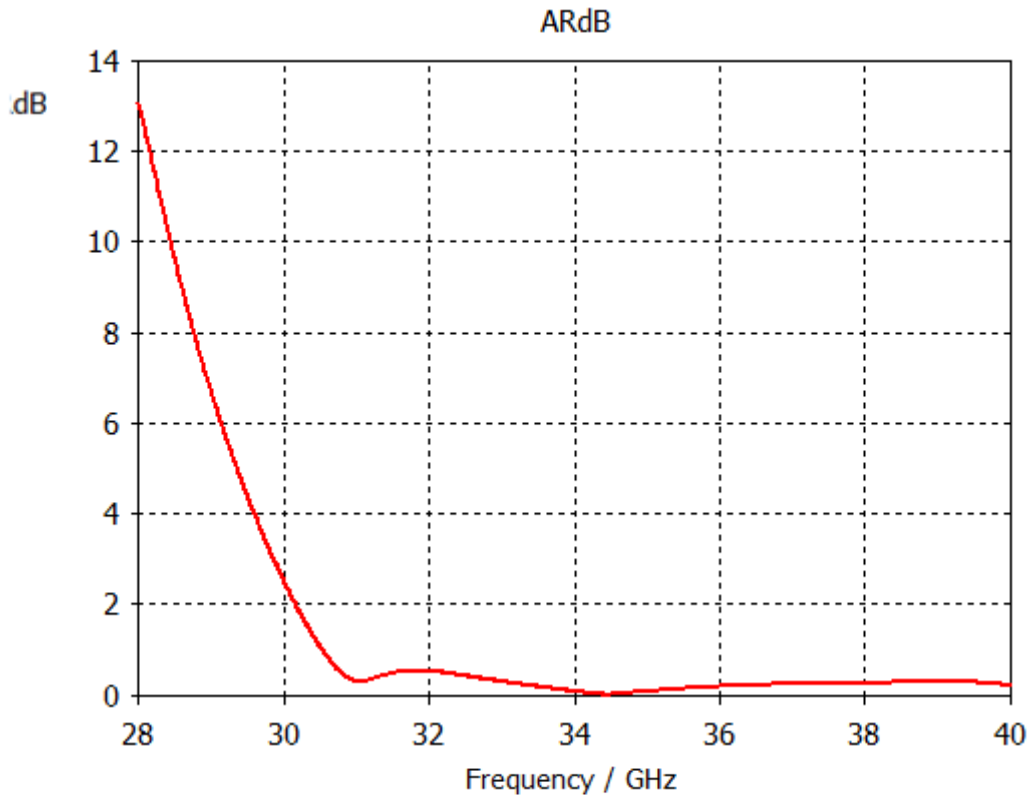


Figura 4.6 Razón axial con respecto a la frecuencia del diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos en el software especializado.

Por último, se analizará el valor de la razón axial (AR) del polarizador, que está definida como la razón del eje mayor con respecto al eje menor de la polarización elíptica y nos permite saber que tan elíptica es la polarización, y entre más cercana es a cero (en dB), es más parecida a una polarización circular. Para el diseño final del polarizador, se tiene una AR máxima de 0.53 dB en el rango de frecuencias de operación (figura 4.), y en el caso de los polarizadores comerciales se tiene un AR máxima de 0.3 dB

4.4 Conclusiones del capítulo.

Este capítulo tenía como objetivo, obtener el diseño final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos; para lo cual se utilizaron la simulaciones mostradas en el capítulo tres y en este mismo capítulo. Principalmente, el diseño final del polarizador, se basó en la simulación del polarizador con diafragmas elípticos iguales, a partir de la cual se realizó la optimización.

Los resultados de la simulación del polarizador con diafragmas elípticos iguales, son los siguientes:

- error de fase de $\pm 5.4^\circ$,
- ancho de banda de 5.17 GHz, y
- coeficiente de reflexión máximo para ambos modos de polarización de 0.168.

En tanto, para el diseño final del polarizador se obtuvo lo siguiente:

- error de fase de $\pm 3.52^\circ$,
- ancho de banda de 5.12 GHz, y
- coeficiente de reflexión máximo para ambos modos de polarización de 0.056.

Como se puede ver de ambos resultados, la optimización realizada para el diseño final del polarizador resultó exitosa; porque se mejoró considerablemente el coeficiente de reflexión máximo, el error de fase disminuyó aproximadamente $\pm 1.9^\circ$ y el único pero es el ancho de banda disminuyó 50 MHz.

Finalmente, se debe mencionar que los resultados de la simulación del diseño final del polarizador se realizó considerando algunos de los inconvenientes que se presentan al momento de la fabricación, y por tanto, los resultados son lo más parecidos que se pueden alcanzar a los que se obtendrán después de la fabricación del polarizador.

CAPÍTULO V. Fabricación, armado y medición del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

5.1 Proceso de fabricación.

La fabricación del polarizador está compuesta principalmente por dos pasos. El primer paso consiste en la fabricación de las rondanas que componen al polarizador; en tanto, que el segundo paso es la fabricación de las máscaras de los diafragmas elípticos del polarizador que se colocan entre cada par de rondanas.

5.1.1 Rondanas del polarizador.

Como ya se mencionó, el primer paso de la fabricación del polarizador consiste en la fabricación de las rondanas, las cuales se enviaron a fabricar; a los fabricantes se les proporcionaron los planos de las figuras 5.1 y 5.2.

La figura 5.1, muestra el plano de 10 de las piezas que componen al polarizador; entre las cuales su única diferencia se presenta en la variable "A". Esta variable es la longitud de las rondanas, lo que se ha llamado en las simulaciones longitud entre cada par de diafragmas y sus valores se muestran en la tabla 5.1. Además se muestra el número de piezas que se requieren fabricar con esa medida (recordando la simetría longitudinal).

La figura 5.2 contiene el plano de una de las rondanas del polarizador, la cual se utiliza para proteger el primer diafragma elíptico del polarizador y evitar así, efectos indeseables en el comportamiento del polarizador. Cabe mencionar que

todas las medidas anotadas en los planos están en milímetros y que el material con el que se van a fabricar es latón.

Tabla 5.1 Medidas para la variable "A" y número de piezas requeridas para el polarizador.

A [mm]	Número de piezas
2.47	2
6.62	2
1.93	2
6.97	2
1.73	1
1	1

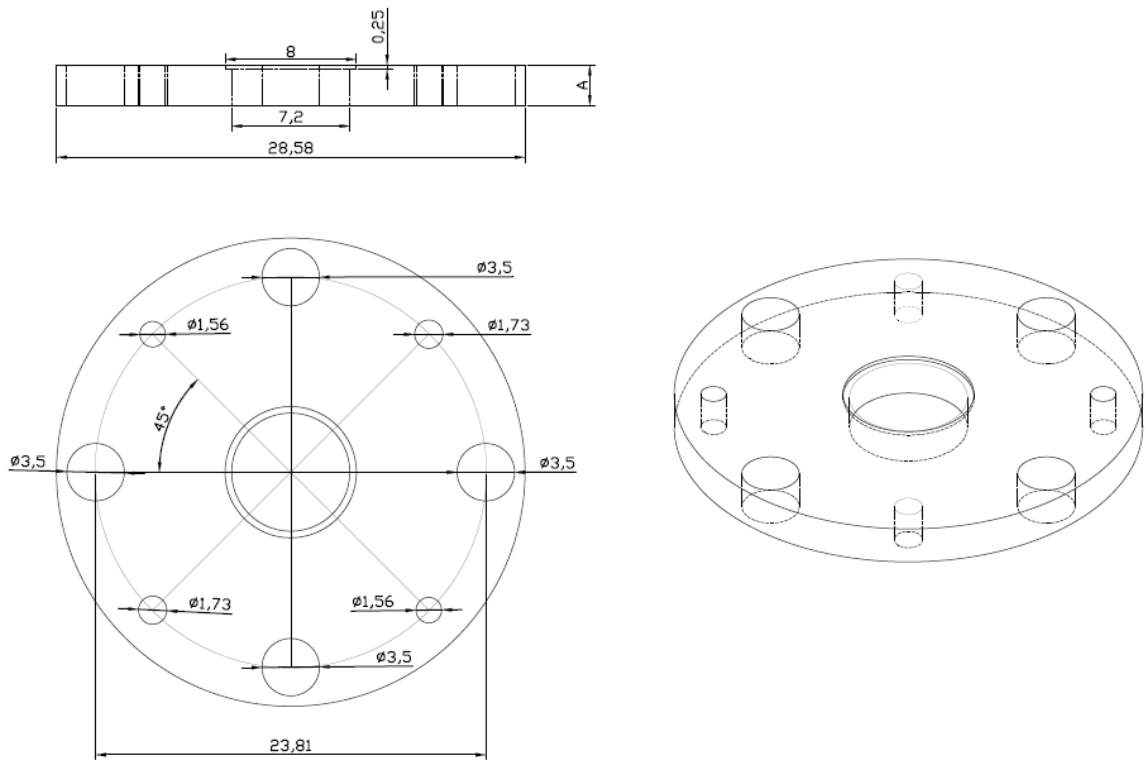


Figura 5.1 Plano de diez de las rondanas que componen al polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

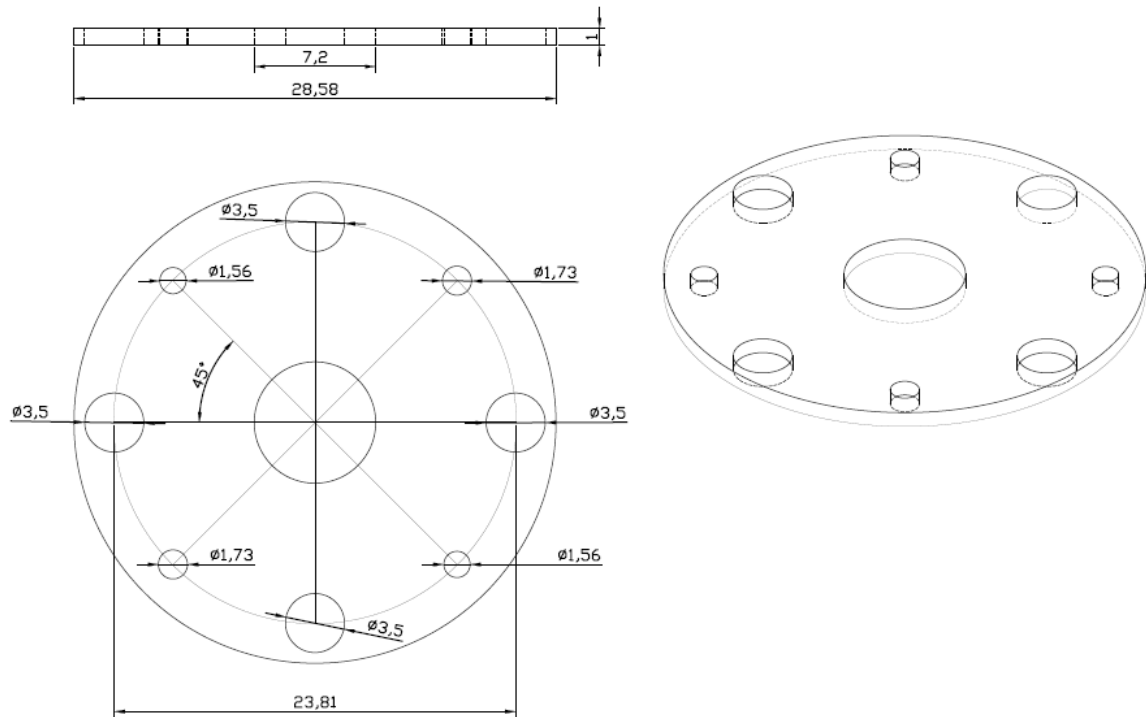


Figura 5.2 Plano de la rondana base que forma parte del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Sin embargo, las medidas que muestran las rondanas ya fabricadas no son exactamente iguales que las mostradas en los planos; lo cual es de esperarse, debido a que las dimensiones de las rondanas son milimétricas y su fabricación es muy complicada. En la figura 5.3 se pueden ver las rondanas físicamente y con los diafragmas elípticos montados.

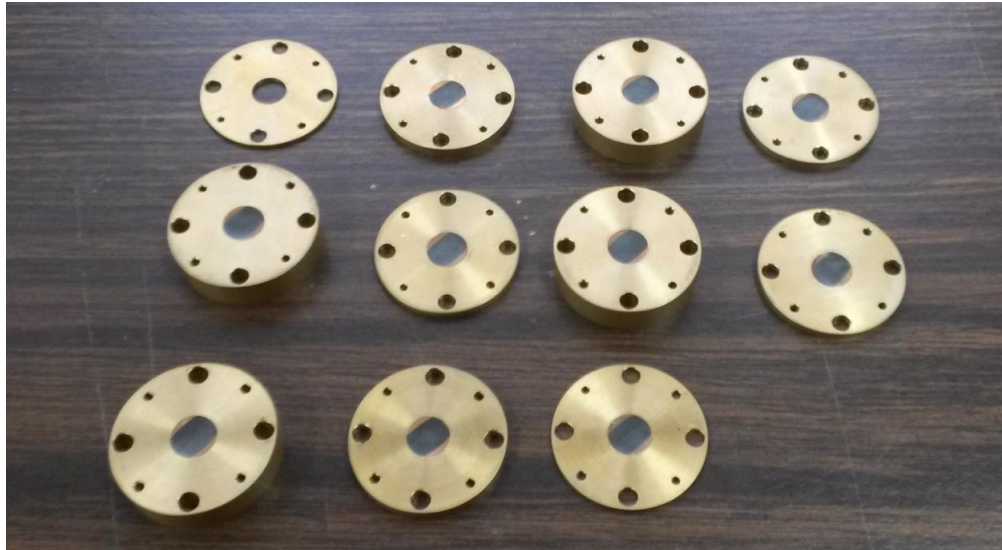


Figura 5.3 Rondanas y diafragmas elípticos, que forman al polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

5.1.2 Máscaras de los diafragmas elípticos.

La fabricación de las máscaras de los diafragmas elípticos del polarizador se llevó a cabo en las instalaciones de UNAMems, para lo cual primeramente se realizaron los dibujos de las máscaras, dichos dibujos se muestran en la figura 5.4. Donde todos los círculos tienen un radio de 8 mm y la diferencia entre ellos, son las medidas de la elipse que contienen y que se pueden revisar en la tabla 4.6.

Posteriormente se realizó el proceso conocido como fotolitografía, mediante el cual se montan los diafragmas elípticos en el substrato dieléctrico RO-5880; el resultado obtenido se muestra en la figura 5.5. Restando únicamente cortar las piezas y colocarlas en su respectiva rondana.

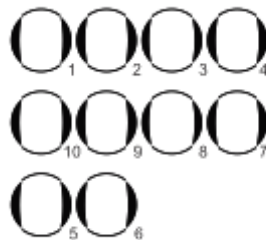


Figura 5.4 Dibujo de las máscaras de los diafragmas elípticos del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

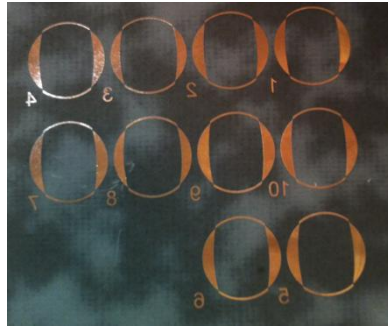


Figura 5.5 Máscaras fabricadas de los diafragmas elípticos del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

5.2 Presentación final del polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos.

Para armar el polarizador primero se colocan los diafragmas elípticos a 45° en sus respectivas rondanas. Posteriormente se sitúan las rondanas con el siguiente orden: primero la rondana de protección, posteriormente se coloca la rondana la longitud que corresponde a la separación entre el primer y segundo diafragma, luego se coloca la rondana con la longitud que corresponde a la separación entre el segundo y tercer diafragma, este proceso se lleva a cabo con las 10 rondanas. Para realizar eficazmente el armado del polarizador se puede recurrir al capítulo 4.3.1, más específicamente a las tablas 4.5 y 4.6.

Otro detalle que se debe mencionar es, que para el armado se requirió de tornillos especiales que pudieran mantener a todas las rondanas juntas.

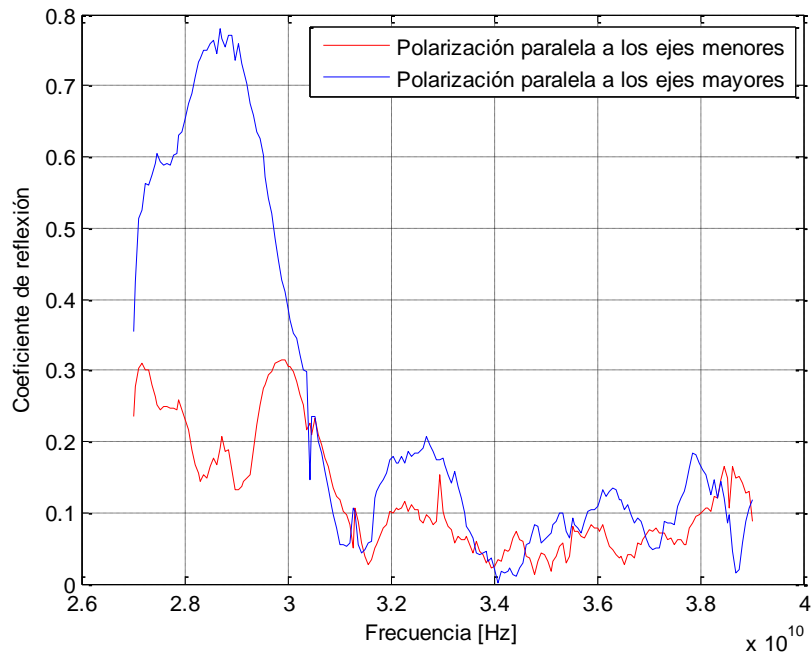


Figura 5.6 Polarizador basado en guía de onda circular con diafragmas elípticos armado.

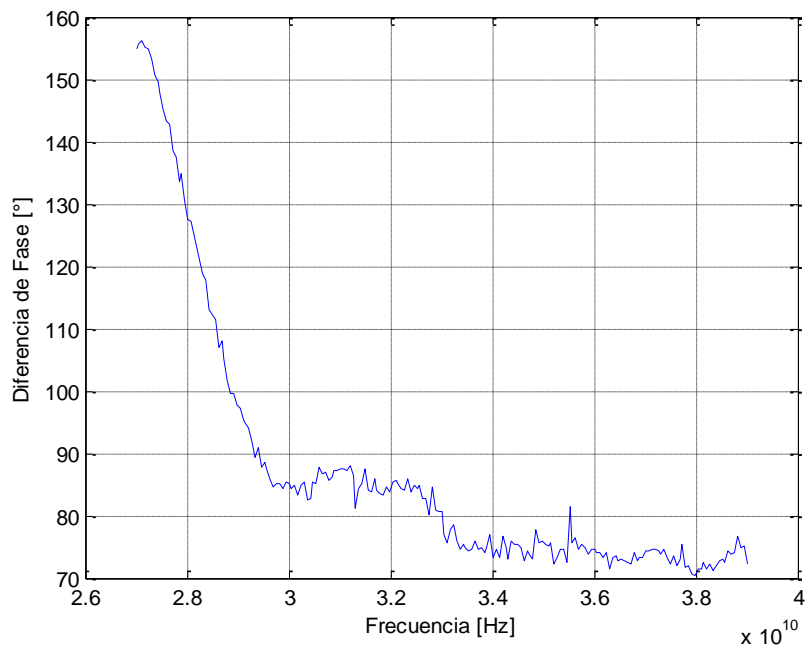
5.3 Resultados experimentales del polarizador.

Para revisar si el diseño realizado del polarizador fabricado es eficiente, se realizaron mediciones de la magnitud del coeficiente de reflexión y de la diferencia de fase en el rango de frecuencias de 27 GHz hasta 39 GHz; estas mediciones se plasman en la figura 5.7.

Al analizar las mediciones del polarizador fabricado, se observa que el coeficiente de reflexión máximo para el modo de polarización con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas es de 0.16 y para el modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas es de 0.2, con una diferencia de fase entre los modos de polarización que va desde 70.7° hasta 88.09° ; lo anterior para una banda de frecuencias que va desde los 30.6 GHz y hasta los 39 GHz.



(a)



(b)

Figura 5.7 (a) Coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas (línea azul) y del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas (línea roja) respecto a la frecuencia (b) Diferencia de fase respecto a la frecuencia, del polarizador en guía de onda circular con diafragmas elípticos fabricado.

En la figura 5.7 (b) se observa que la diferencia de fase se mantiene en el intervalo mencionado desde los 29.5 GHz, pero al recorrerlos a menor frecuencia se afecta principalmente el coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas, pues el coeficiente del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas no sobrepasa el valor de 0.31.

5.4 Conclusiones del capítulo.

Para analizar la eficiencia del polarizador, se comparan los resultados del polarizador diseñado y del fabricado, en una frecuencia de operación de 30.6 GHz a 39 GHz.

Al revisar los resultados del coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas (fig. 5.8) se observa que experimentalmente se tiene un valor máximo de 0.2, en tanto que teóricamente es de 0.17; así que el resultado se considera bueno pues ambos comportamientos tienen características similares. En cuanto al coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas (fig. 5.9), el valor máximo teórico es de 0.47 y el experimental es de 0.2, sin embargo esta discrepancia es conveniente pues aumenta el ancho de banda del polarizador experimental.

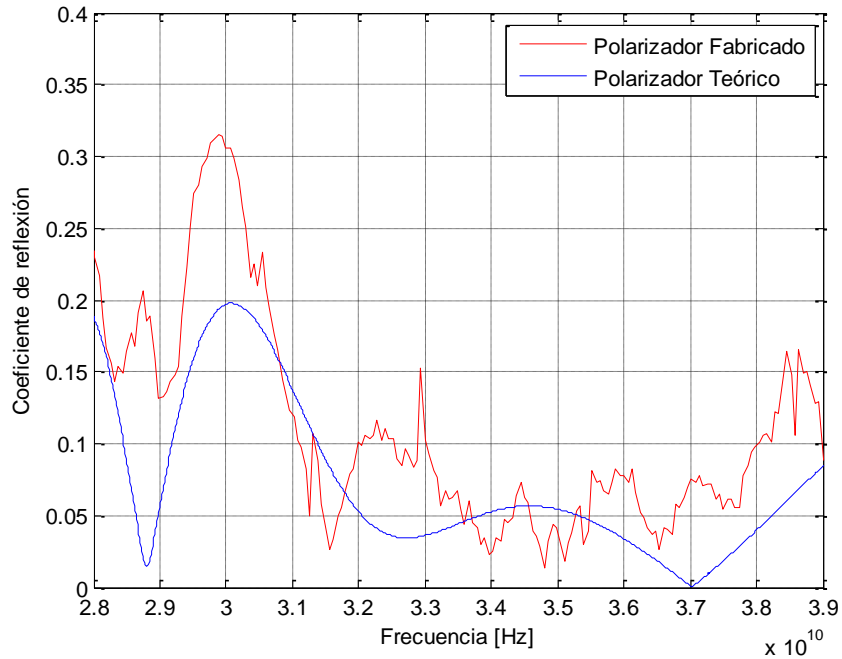


Figura 5.8 Comparación de la magnitud del coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes menores de las elipses de los diafragmas respecto a la frecuencia, del polarizador teórico (línea azul) y del fabricado (línea roja).

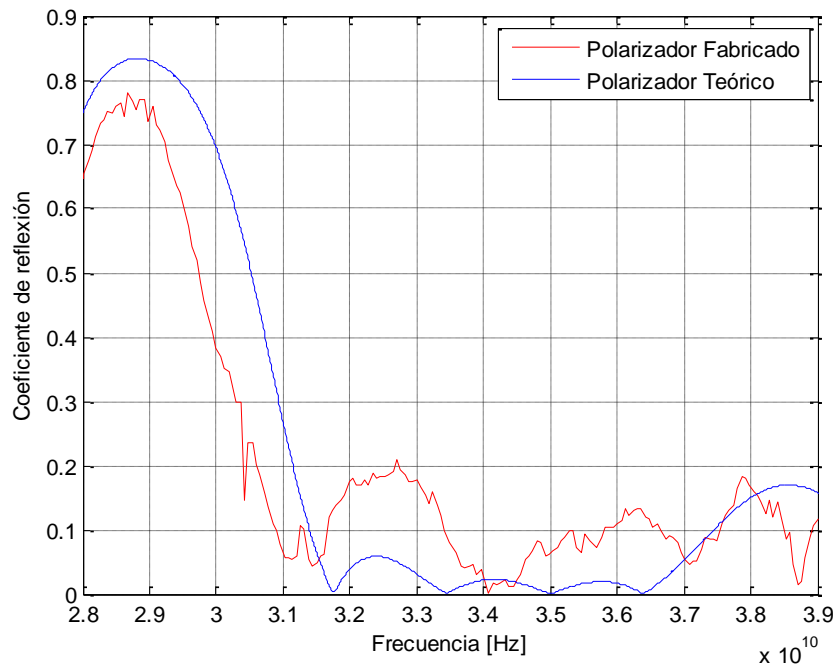


Figura 5.9 Comparación de la magnitud del coeficiente de reflexión del modo con polarización paralela a los ejes mayores de las elipses de los diafragmas respecto a la frecuencia, del polarizador teórico (línea azul) y del fabricado (línea roja).

Como se puede ver hasta el momento, los resultados comparados son buenos; pero al momento de analizar los resultados de la diferencia de fase a la salida del polarizador (fig. 5.10), se tiene que en los valores experimentales se encuentra en el intervalo de 70.7° y 88.09° , mientras que en los valores teóricos va de los 88.75° a los 93.5° . Por lo tanto, la discordancia entre los resultados llega a ser casi de 20° y este resultado no es conveniente para el funcionamiento del polarizador.

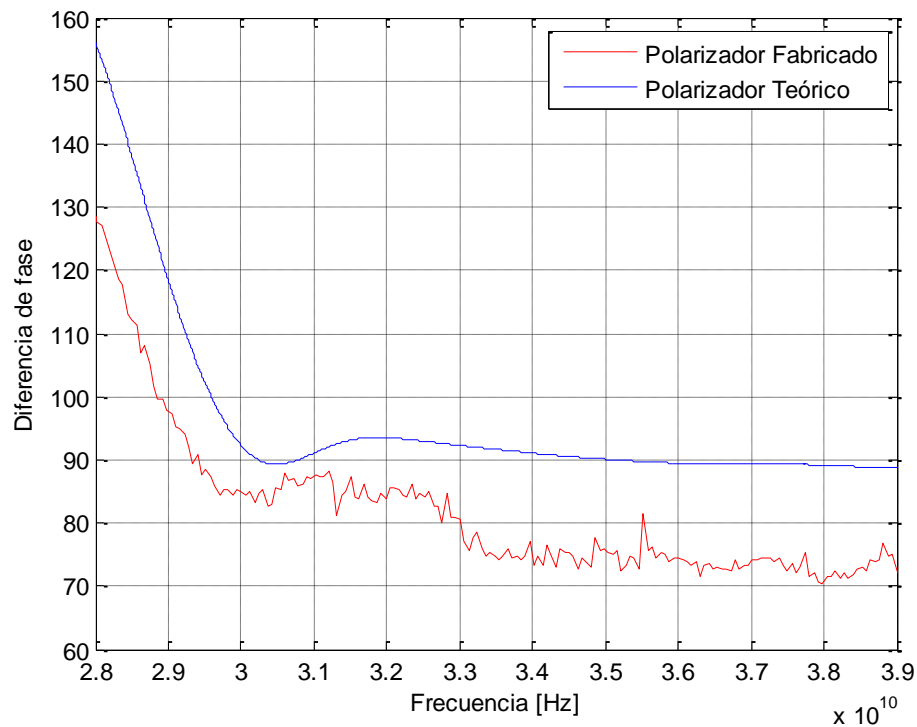


Figura 5.10 Diferencia de fase respecto a la frecuencia del polarizador teórico y del fabricado.

La discrepancia entre los valores teóricos y los experimentales, puede atribuirse a los errores en la fabricación del polarizador. Las espigas en los resultados se deben a fallas en la calibración del analizador de redes.

Los errores de fabricación son: la imprecisión en las medidas de las rondanas, un posible sobreataque en el proceso de fabricación de los diafragmas, una mala alineación en los diafragmas y otro problema es que los diafragmas elípticos no

tengan contacto eléctrico con las rondanas. Respecto a las fallas en la calibración, se deben a la falta de equipo y que no todo el material se encuentra en unas buenas condiciones.

La mayoría de estos errores no está en nuestras manos solucionarlos, pero para la falta de contacto eléctrico es posible cubrir los diafragmas elípticos con pintura epóxica, de esta manera se asegura el contacto eléctrico.

CONCLUSIONES.

Después de analizar los tipos distintos tipos de polarizadores existentes, se eligió el diseño del polarizador a fabricar; el diseño seleccionado corresponde a un polarizador basado en guía de onda circular con diez diafragmas elípticos, el cual se dividió en 11 rondanas para su fabricación.

Una vez elegido el diseño del polarizador, se realizó su análisis en MWO para determinar los valores teóricos de la reactancia inductiva y la capacitiva, que representan cada diafragma elíptico; también se determinó la longitud de separación entre cada par de diafragmas. Posteriormente con ayuda de un software especializado en la simulación de campo electromagnético, se encontraron los modelos reales para las reactancias encontradas. La reactancia capacitiva y la reactancia inductiva se representan por medio de un diafragma elíptico.

A continuación, se realizó la optimización del dispositivo, donde las variables fueron los ejes mayor y menor de la elipse que componen a cada diafragma y la separación entre elementos, hasta encontrar un modelo final con una diferencia de fase cercana a los 90° , un amplio ancho de banda y un coeficiente de reflexión mínimo.

Las características finales del dispositivo teórico, son las siguientes:

- El polarizador está basado en guía de onda circular de 3.6 mm de radio.
- Su longitud total es de 37.24 mm.
- Mantiene la diferencia de fase entre los campos ortogonales en el intervalo de 89.28° a 93.52° .
- El coeficiente de reflexión se mantiene debajo del valor de 0.056 en el rango de las frecuencias de operación.
- Opera en la banda Ka.

- Tiene un rango de frecuencias operación, que va desde 31.92 GHz a 37.04 GHz.
- Posee un ancho de banda de 5.12 GHz.

Las características finales del dispositivo fabricado, son las siguientes:

- El polarizador está basado en guía de onda circular de 3.6 mm de radio.
- Su longitud total es de 37.24 mm.
- Mantiene la diferencia de fase entre los campos ortogonales en el intervalo de 70.7° a 88.09°
- El coeficiente de reflexión se mantiene debajo del valor de 0.2 en el rango de las frecuencias de operación.
- Opera en la banda Ka.
- Tiene un rango de frecuencias operación, que va desde 30.6 GHz a 39 GHz.
- Posee un ancho de banda de 8.4 GHz.

Bibliografía.

- [1] Constantine A. Balanis
“Advanced Engineering Electromagnetics”
John Wiley & Sons
1989
- [2] Wayne Tomasi
“Sistemas de comunicaciones electrónicas”
Prentice Hall
2003
- [3] Isidoro Gormaz González
“Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios”.
Paraninfo
2007
- [4] Adrián Iván Pacheco Ávila
“Diseño de un polarizador en banda X”
2005
- [5] Shih-Wei Wang, Chih-Hung Chien, Chun-Long Wang y Ruey-Beei W.
“A circular Polarizer Designed with a Dielectric Septum Loading”
IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques
VOL. 52, NO. 7, pp 1719-1723
Julio, 2004
- [6] P. J. Meier y S. Arnow
“Wide-Band Polarizer in Circular Waveguide Loaded with Dielectric Discs”
IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques
VOL. MTT-13, NO. 6, pp 763-767
Noviembre, 1965
- [7] Giorgio Bertin, Bruno Piovano, Luciano Accatino y Mauro Mongiardo,
“Full-Wave Design and Optimization of Circular Waveguide Polarizers with Elliptical Irises”
IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques

VOL. 50, NO. 4, pp 1077-1083

Abril, 2002

- [8] Giuseppe Virone, Riccardo Tascone, Oscar Antonio Peverini y Renato Orta.

"Optimum-Iris-Set Concept for Waveguide Polarizers"

IEEE Microwave and Wireless Components Letters

VOL. 17, NO. 3, pp 202-204

Marzo, 2007

- [9] David M. Pozar

"Microwave Engineering"

John Wiley & Sons

Tercera edición, 2005

- [10] David Keun Cheng

"Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería"

Pearson

- [11] Antonio Arnau Vives

"Sistemas electrónicos de comunicaciones"

Universidad Politécnica de Valencia

- [12] Geofísica con radar

José Paulino Fernández Álvarez

Universitarios Ediuno

- [13] Rodolfo Neri Vela

"Comunicaciones por Satélite"

Thomson

2003

Mesografía.

[14] Modos de propagación en guías de ondas circulares

Enlace:

<http://www.lu3hba.com.ar/ARTICULOS%2010/Modos%20de%20propagaci%C3%B3n%20en%20gu%C3%ADas%20de%20ondas%20circulares.pdf>

Fecha de consulta: 11 de Junio de 2013

[15] CST Microwave Studio

Enlace: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>

Fecha de consulta: 17 de Junio de 2013

[16] Fotolitografía

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20018/fichero/proyecto%252FCap%C3%ADtulos%252FCap%C3%ADtulo+3.pdf>

[17] Material RO-5880 de Rogers Corporation

<http://www.rogerscorp.com/documents/606/acm/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.aspx>

[18] Catálogo de Quinstar

