



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
ESTADÍSTICA
MATEMÁTICAS Y FÍSICA

TESIS

DISEÑO Y PRUEBA DE DISPOSITIVOS Y COMPUERTAS LÓGICAS EN THZ

PRESENTA

Ing. Andrea Gutiérrez García

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS CON OPCIÓN A LA COMPUTACIÓN,
MATEMÁTICAS APLICADAS

TUTOR

Dra. Mariana Alfaro Gómez
Dr. José Antonio Guerrero Díaz de León

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL

Dr. Daniel Alberto May Arrijoja
Dr. José Luis López González

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

Mtro. Jorge Martín Alférez Chávez (A)
DECANO (A) DEL CENTRO CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como **CO-TUTOR** designado del estudiante **ANDREA GUTIÉRREZ GARCÍA** con ID 137647 quien realizó la tesis titulado: DISEÑO Y PRUEBA DE DISPOSITIVOS Y COMPUERTAS LÓGICAS EN THZ, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 14 de marzo de 2023.

Dra. Mariana Alfaro Gómez
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

CARTA DE VOTO APROBATORIO
(INDIVIDUAL)

Mtro. Jorge Martín Alférez Chávez (A)
DECANO (A) DEL CENTRO CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como **CO-TUTOR** designado del estudiante **ANDREA GUTIÉRREZ GARCÍA** con ID 137647 quien realizó la tesis titulado: DISEÑO Y PRUEBA DE DISPOSITIVOS Y COMPUERTAS LÓGICAS EN THZ, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 16 de marzo de 2023.

Dr. José Antonio Guerrero Díaz de León
Co-Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL**

Mtro. Jorge Martín Alférez Chávez
DECANO DEL CENTRO CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como asesor designado del estudiante **ANDREA GUTIÉRREZ GARCÍA** con ID 137647 quien realizó la tesis titulado: *DISEÑO Y PRUEBA DE DISPOSITIVOS Y COMPUERTAS LÓGICAS EN THZ*, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 2 de Marzo de 2023



Dr. Daniel Alberto May Arrijo
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

MTRO. EN C. JORGE MARTÍN ALFÉREZ CHÁVEZ
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS BÁSICAS

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado de la estudiante **ANDREA GUTIÉRREZ GARCÍA** con ID **137647** quien realizó **LA TESIS** titulado: **DISEÑO Y PRUEBA DE DISPOSITIVOS Y COMPUERTAS LÓGICAS EN THZ**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“Se Lumen Proferre”

Aguascalientes, Ags., a 15 de marzo del 2023.



DR. JOSÉ LUIS LÓPEZ GONZÁLEZ
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRAMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 09/03/2023

NOMBRE: Andrea Gutiérrez García **ID** 137647

PROGRAMA: MAESTRÍA EN CIENCIAS CON OPCIÓN A LA COMPUTACIÓN, MATEMÁTICAS APLICADAS **LGAC (del posgrado):** SI

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico

TITULO: DISEÑO Y PRUEBA DE DISPOSITIVOS Y COMPUERTAS LÓGICAS EN THZ

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Se ampliaron las posibilidades de en un futuro desarrollar filtros de THz para las telecomunicaciones, alentando la independencia tecnológica nacional. Así como tener posibilidades de integrar estos componentes en circuitos fotónicos complejos. Gracias al desarrollo un dispositivo en THz que tiene tiene como ventaja una gran tolerancia de fabricación y que es un dispositivo

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
NO				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NO				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
NO				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
SI				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado: SI x
No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dra. Juan de los ríos Rincón

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Agradecimientos

“Agradezco al CONACYT y a la Benemerita Universidad Autónoma de Aguascalientes por el apoyo económico brindado, así como al CIO por permitirme hacer uso de sus instalaciones y equipo.

Agradezco infinitamente a la Dra. Mariana Alfaro Gómez por ser una excelente guía en esta tesis. De igual forma agradezco a mi comité tutorial, el Dr. Daniel Alberto May Arriola, el Dr. José Luis López González y el Dr. José Antonio Guerrero Díaz de León por sus valiosas observaciones y ayuda que hicieron posible la realización de este proyecto de tesis.

Por último, agradezco el apoyo de mis papás, mis hermanas y de mi novio que siempre han creído en mí y me han impulsado a realizar mis sueños y metas.

Al ver el resultado que se obtuvo solo puedo decir: ¡Gracias a todos por su apoyo! “

Índice

ÍNDICE DE TABLAS.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	7
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	11
2.1 LOS TERAHERTZ	11
2.2 ESPECTROSCOPIA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.....	12
2.3 TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D.....	15
2.4 MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D.....	17
2.4.1 <i>Materiales de impresión 3D para la banda de THz</i>	18
2.5 APLICACIONES DE THZ CON IMPRESIÓN 3D	19
2.6 GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS.....	21
CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CON THZ-TDS.....	24
3.1 METODOLOGÍA.....	24
3.2 RESULTADOS	26
3.3 CONCLUSIÓN.....	32
CAPÍTULO 4 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO MMI.....	33
4.1 DISEÑO Y METODOLOGÍA.....	34
4.2 RESULTADOS.....	39
4.2.1 <i>Fabricación</i>	43
4.3 CONCLUSIÓN.....	44
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	45
5.1 TRABAJO FUTURO.....	46
REFERENCIAS	47

Índice de tablas

Tabla 1 Características de impresión utilizados en las piezas. 25
Tabla 2 Valores del primer barrido paramétrico. 35
Tabla 3 Valores del segundo barrido paramétrico. 36
Tabla 4 Valores del barrido paramétrico para encontrar la posición y el ancho del área modulada por el índice de refracción..... 37
Tabla 5 Valores del segundo barrido paramétrico para encontrar la posición y el ancho del área modulada por el índice de refracción..... 37



Índice de figuras

Figura 1 THz en el espectro electromagnético. Se encuentra entre las ondas de microondas y las infrarrojas, tiene un rango de frecuencia de 300 GHz a 10 THz así como una longitud de onda de 1 mm a 10 μm 12

Figura 2 Configuración de transmisión del sistema THz-TDS, se muestra el pulso de fs (línea roja) dividido por un divisor de haz que se encuentra guiado por varios espejos desde el emisor hasta el receptor, la línea verde es el pulso de THz, la cual sale del transmisor a través de lentes, pasa por la muestra y llega hasta el receptor.....15

Figura 3 A) Diagrama de impresora 3D- El objeto se manda de la computadora a la impresora que tiene un cabezal el cual funde el material imprimible y lo deposita en la cama caliente B) Imagen de una impresora Creality Ender 5 3D.....17

Figura 4 Índice de refracción y coeficiente de absorción de 7 materiales de impresión 3D- Busch, S. F., Weidenbach, M., et al. "Optical Properties of 3D Printable Plastics in the THz Regime and their Application for 3D Printed THz Optics"[20].....19

Figura 5 Esquema del modulador MMI y sus parámetros de diseño- May-Arrijoja, D. A., LiKamWa, P. et al. "Ultra-compact multimode interference InGaAsP multiple quantum well modulator. Optical and Quantum Electronics" [21].....21

Figura 6 Características de propagación del haz (a) sin modulación de índice, y (b) con una modulación de índice de refracción más bajo- May-Arrijoja, D. A., LiKamWa, P. et al. "Ultra-compact multimode interference InGaAsP multiple quantum well modulator. Optical and Quantum Electronics" [21]].....22

Figura 7 Piezas BendLay impresas con diferente altura de capa y densidad de relleno.....25

Figura 8 Espectro de las piezas con diferente densidad de relleno de los materiales A) PLA, B) Bendlay y c) ABS.....26

Figura 9 Espectro de las piezas con diferente altura de capa de los materiales A) PLA, B) Bendlay y c) ABS.....27

Figura 10 Índice de refracción @500 GHz de materiales PLA, BendLay y ABS. Índice de refracción para diferentes A) densidad de relleno y B) altura de capa.....28

Figura 11 Coeficiente de absorción @500 GHz de materiales PLA, BendLay y ABS. Coeficiente de absorción para diferentes A) densidad de relleno y B) altura de capa.28

Figura 12 Índice de refracción @0.15 THz de materiales PLA, BendLay y ABS. Índice de refracción para diferentes A) densidad de relleno y B) altura de capa.....29

Figura 13 Coeficiente de absorción @0.15 THz de materiales PLA, BendLay y ABS. Coeficiente de absorción para diferentes A) densidad de relleno y B) altura de capa.....29

Figura 14 Índice de refracción con respecto a A) altura de capa, B) densidad de relleno y frecuencia para Bendlay.....30

Figura 15 Coeficiente de absorción con respecto a A) altura de capa, B) densidad de llenado y frecuencia para Bendlay.....31

Figura 16 Esquema del interruptor y sus parámetros de diseño.....34

Figura 17 Gráficas en 2D del barrido paramétrico en donde se busca el óptimo del largo y ancho para la guía de onda monomodal.....35

Figura 18 Gráfica 2D del barrido paramétrico para las variaciones geométricas del ancho de la cavidad y largo de la cavidad para conocer cuáles medidas son las óptimas para la mayor transmisión del campo eléctrico.....36

Figura 19 Simulación de transmisión a 0.15 THz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.5.....36

Figura 20 Gráfica 2D del barrido paramétrico para las variaciones geométricas del ancho del relleno y la posición en el eje “y” del relleno para conocer cuáles medidas son las óptimas para la menor transmisión del campo eléctrico.....38

Figura 21 Simulación de mínima transmisión del relleno a 0.15 THz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.5 para el dispositivo y 1.6 para el relleno.....38

Figura 22 Esquema del interruptor fotónico 1X1 y sus parámetros de diseño.....39

Figura 23 Gráfica 2D del barrido paramétrico para las variaciones geométricas de largo y ancho de la cavidad para conocer cuáles medidas son las óptimas para la mayor transmisión del campo eléctrico.....40

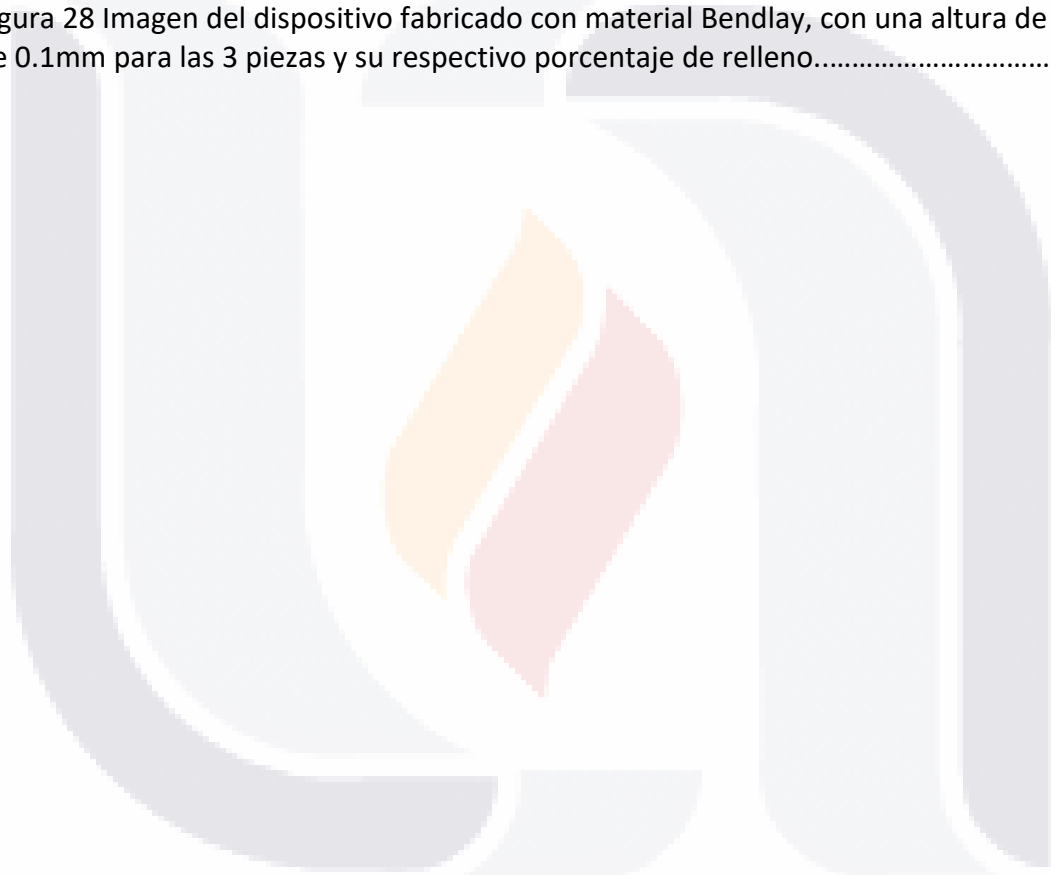
Figura 24 Simulación de transmisión a 0.15Thz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.45.....41

Figura 25 Gráfica 2D del barrido paramétrico para las variaciones geométricas de ancho de relleno con la posición en el eje Y para conocer cuáles medidas son las óptimas para una mínima transmisión.....42

Figura 26 Simulación de mínima transmisión del relleno a 0.15 THz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.45 para el dispositivo y 1.565 para el relleno.....42

Figura 27 Esquema del interruptor o switch fotónico de 1x1 y sus parámetros de diseño...43

Figura 28 Imagen del dispositivo fabricado con material Bendlay, con una altura de capa de 0.1mm para las 3 piezas y su respectivo porcentaje de relleno.....43



Resumen

En esta tesis mostraremos la caracterización de tres materiales poliméricos con diferentes características de impresión a frecuencias de entre 0 a 1.5 THz. Se construyeron 8 piezas de cada material con diferente altura de capa y diferente densidad de relleno, utilizando una impresora 3D. Las propiedades ópticas que obtuvimos fue el índice de refracción y el coeficiente de absorción de las piezas, utilizando un espectrómetro en el dominio del tiempo de THz con una configuración de transmisión.

También presentamos un interruptor o switch óptico 1 x 1 cuya operación está basada en el efecto de interferencia multimodal. Se demuestra por medio de una simulación el funcionamiento del switch a una frecuencia de 0.15 THz, así como un estudio previo para obtener la geometría óptima del mismo. Para este estudio se utilizó el software de COMSOL Multiphysics, en donde se simuló la propagación de radiación en la banda de THz dentro del interruptor. Determinamos las características geométricas de su diseño y se estudió los cambios en la propagación ocasionados por las diferencias en el índice de refracción en áreas específicas de la cavidad.

Los resultados de esta tesis muestran como el switch cumple con las características de un MMI y tiene como ventaja una gran tolerancia de fabricación y es un dispositivo compacto. También nos muestra como las impresoras 3D son una tecnología muy eficiente para desarrollar filtros de THz para las telecomunicaciones.

Abstract

In this work, we present the characterization of some thermoplastic materials commonly used in 3D printing with respect to different printing specifications of infill density and layer height. We characterize the refractive index and absorption coefficient of the samples in the THz range from 0 to 1.5 THz using a THz time-domain spectrometer.

We also present the design of a 1×1 optical switch based on multimode interference effects. The operation of the switch at a frequency of 0.15 THz is demonstrated through simulations and previous studies to achieve its optimal geometry. In this study, COMSOL Multiphysics software was used to simulate radiation propagation at the terahertz region inside the switch. The geometric characteristics of its construction were identified, and the propagation changes caused by the difference in refractive index in specific regions of the cavity were investigated.

The results of this work show how the switch fulfills the design requirements of an MMI, having large manufacturing tolerance and compact dimensions. It also shows how 3D printing is a very effective technology for developing THz filters for telecoms.

Capítulo 1 Introducción

Durante varios siglos el estudio de la luz ha fascinado a científicos y filósofos. Uno de ellos fue Christian Huygens (1629-1695) quien demostró que la luz poseía una naturaleza ondulatoria, explicando así las leyes de la óptica. Poco después, científicos como Thomas Yong y Augustin Jean Fresnel demostrarían que la teoría ondulatoria de Huygens era comprobable y explicaba la interferencia y la difracción de la luz [1].

La luz está compuesta por un campo eléctrico y un campo magnético con un rango de longitud de onda de 400 a 700 nanómetros. A lo largo de los años los estudios de la luz han evolucionado. Gracias a los investigación de varios científicos, que combinando la teoría sobre campos eléctricos y magnéticos obtuvieron la teoría llamada electromagnetismo. La radiación electromagnética puede generarse de diferentes formas y utilizarse en diferentes áreas según la longitud de onda de la oscilación y la frecuencia de la radiación [2].

Por esta razón, los estudios y aplicaciones potenciales de la radiación electromagnética tienen un amplio rango de investigación, siendo así un tema de interés para los científicos.

Por ejemplo, para las tecnologías de comunicación como lo son el radio, TV, teléfonos y las líneas de transmisión, utilizan bajas frecuencias (10^5 Hz – 10^{11} Hz) y longitudes de onda largas. En cambio, las longitudes cortas con altas frecuencia (10^{15} Hz – 10^{22} Hz) se usan para los rayos X [3][4].

No obstante, por muchos años una pequeña parte del espectro permaneció inexplorada debido a la falta de tecnología que permite emitir y detectar este rango de frecuencia. A esta parte inexplorada se le llamó “brecha de terahertz”, la cual se encuentra entre el borde de la banda de microondas y el borde de luz infrarroja lejana (300 GHz a 10 THz). Gracias al invento del láser ultrarápido, los científicos tuvieron acceso a esta brecha. Este descubrimiento logró la generación y detección de los terahertz (THz) utilizando antenas

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

fotoconductoras y daría pie a avances tecnológicos, como el desarrollo de la espectroscopia en el dominio del tiempo (THz-TDS por sus siglas en inglés), entre otras [5].

El estudio y desarrollo de la tecnología en THz requiere tener diferentes dispositivos como reflectores, lentes, divisores y guías de onda. Muchos materiales que se usan para dispositivos ópticos en el rango visible e infrarrojo resultan opacos para las frecuencias de THz. Los materiales poliméricos son una amplia variedad de materiales no conductores que pueden ser penetrados por las ondas de THz, ya que resultan transparentes en esta banda. Muchos de los polímeros utilizados en las impresiones 3D son favorables para esta región, siendo suficiente una impresora 3D básica para la fabricación de dispositivos de THz de manera rápida y económica [3][6][7].

Algunos de los dispositivos de THz que se pueden desarrollar con tecnología de impresión 3D son las guías de onda. Un ejemplo de guía de onda son los dispositivos de interferencia multimodo o MMI por sus siglas en inglés (Multimode Interference), estos dispositivos constan de modificar el índice de refracción en un área específica dentro de la guía, causando un efecto de múltiples autoimágenes [8][9].

Las guías de onda han tenido un gran auge dentro de las telecomunicaciones, por lo que el objetivo principal de este trabajo es modelar, simular y fabricar un dispositivo fotónico que opere con la banda de THz. Así como comparar las propiedades ópticas de las diferentes características de impresión 3D. Por ello presentamos un interruptor o switch óptico de interferencia multimodal de 1x1. También se comparan las propiedades ópticas a frecuencias de THz del PLA, ABS y Bendlay cuando se modifican las especificaciones de impresión. Esto con el fin de probar dicho dispositivo con impresión 3D, utilizando diferentes características de impresión.

Se demuestra por medio de una simulación el funcionamiento del dispositivo de MMI a una frecuencia de 0.15 THz, así como un estudio previo para obtener la geométrica óptima del

mismo. La comparación de las propiedades de los 3 materiales se muestra experimentalmente a las frecuencias de 500 GHz y a 0.15 THz.



Capítulo 2 Antecedentes

2.1 Los terahertz

La radiación de terahertz (THz) son ondas electromagnéticas que se encuentran entre las frecuencias de microondas e infrarrojas (300 GHz – 10 THz). Estas ondas pueden penetrar una amplia variedad de materiales no conductores [3][10].

La Figura 1 muestra la banda THz en el espectro electromagnético. Esta radiación a 1 THz tiene una longitud de onda de 300 μm con un periodo de 1 ps. Su energía fotónica es de 4.1 meV, tiene una temperatura de 48 k y cuenta con un número de onda de 33 cm^{-1} . El espectro de THz también se conoce como rayos T, T-luz, T-lux, ondas de terahertz, luz de terahertz y THz, los pulsos cortos de los THz son generalmente utilizados para la espectroscopia.

La frecuencia más baja de los terahertz se encuentra en un régimen electrónico de radiación milimétrica o bien de microondas. En cambio, en frecuencias más altas se encuentra en un régimen óptico, que corresponde al límite de la región espectral del infrarrojo lejano, mejor conocido como FIR por sus siglas en inglés (Far Infrared) [11].

Muchos de los tejidos y materiales comunes cuentan con la característica de que son semitransparentes para los THz. Los plásticos, ropa, sustancias biológicas y papel son algunos de los tejidos que resultan transparentes para esta frecuencia [12].

Debido a los avances tecnológicos ligados a las telecomunicaciones, es imprescindible contar con dispositivos fotónicos en la banda de THz. Ya que la sociedad moderna exige que las comunicaciones digitales tengan mayor ancho de banda, alta velocidad y que sean inalámbricas. Sin embargo, durante muchos años no era posible desarrollar estos dispositivos, porque no se contaba con el equipo necesario.

La invención del láser ultrarrápido nos dio acceso al desarrollo de dispositivos fotónicos en THz. Con el láser ultrarrápido se puede generar y detectar los THz utilizando antenas fotoconductoras (PCA) o con estructuras irradiadas con pulso óptico de femtosegundos (fs) [6]. La espectroscopia en el dominio del tiempo de THz es una técnica desarrollada años después gracias a la realización de dispositivos mejorados y eficientes como el láser ultrarrápido.

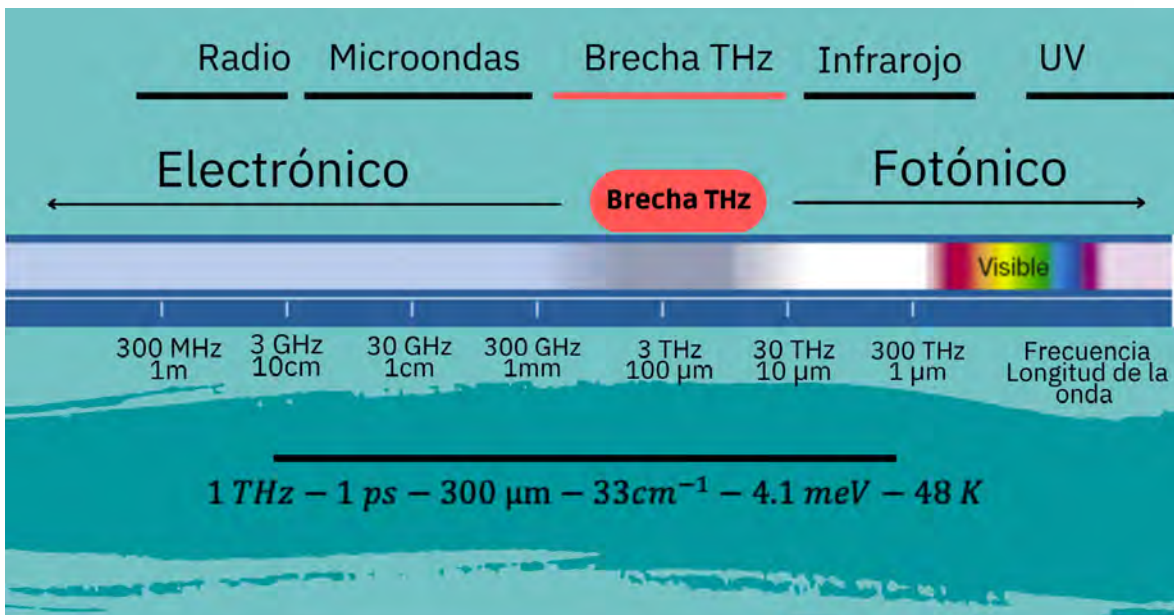


Figura 1 THz en el espectro electromagnético. Se encuentra entre las ondas de microondas y las infrarrojas, tiene un rango de frecuencia de 300 GHz a 10 THz así como una longitud de onda de 1 mm a 10 μm .

2.2 Espectroscopia en el dominio del tiempo

Dentro de las técnicas espectroscópicas, la espectroscopia en el dominio del tiempo resulta única en comparación con el resto. Esta técnica tiene dos características singulares, una es que el ancho de banda espectral está contenido en un pulso óptico de ciclo único, y la otra es que está funciona con una configuración de bomba-sonda de circuito cerrado. Esto quiere decir que la fuente láser de femtosegundos se divide en dos rayos (la bomba y la sonda) y se activa por la presencia combinatoria de terahertz (generados por la bomba) y el pulso de sonda (generada por la sonda que muestrea y detecta el perfil del pulso) [2][13].

Los THz-TDS usan un láser con un pulso de duración normalmente inferior a 100 femtosegundos. El titanio-zafiro es un medio activo común para los láseres ultrarápidos, este material tiene una emisión de 650 nm a 1,100 nm de ancho de banda.

Con la configuración de transmisión del sistema THz-TDS es posible medir la dispersión, el índice de refracción y el coeficiente de absorción, entre otras propiedades de la muestra [2][12]. El índice de refracción define la velocidad con la que la luz viaja a través de dos medios y el coeficiente de absorción se define como la relación entre la energía incidente y la energía absorbida. Esto como resultado de registrar la amplitud y la fase de la radiación.

Para ello se obtienen los espectros de la amplitud de $E_{ref}(\omega)$ y $E_{sam}(\omega)$ calculando la transformada de Fourier [14], donde *ref* corresponde a la referencia y *sam* a la muestra. La cual se obtiene de los campos eléctricos de la referencia y la muestra: $E_{ref}^{\sim}(\omega) = E_{ref}(\omega)e^{i\phi_{ref}(\omega)}$ y $E_{sam}^{\sim}(\omega) = E_{sam}(\omega)e^{i\phi_{sam}(\omega)}$.

Dándonos como resultado los espectros de la amplitud de $E_{ref}(t)$ y $E_{sam}(t)$. Al tener la transformada de Fourier podemos medir el índice de refracción [15][16], que se obtiene a través de la Ecuación 1.

$$n(\omega) = 1 + \frac{c(\phi_{sam}(\omega) - \phi_{ref}(\omega))}{\omega d} \quad (1)$$

Donde *c* es la velocidad de la luz en metros sobre segundos, el término $\phi_{sam}(\omega)$ es la fase de la transformada de Fourier de la muestra y $\phi_{ref}(\omega)$ de la referencia, por último *d* es el espesor de la muestra en metros.

Otra de las propiedades que se pueden medir es el coeficiente de extinción (Ecuación 2). Así como el coeficiente de absorción que está directamente relacionado con el coeficiente de extinción (Ecuación 3).

$$\kappa(\omega) = -\frac{c}{2\omega d} \ln \left[\frac{1}{t_{12}(\omega)t_{21}(\omega)} \frac{E_{sam}(\omega)}{E_{ref}(\omega)} \right] \quad (2)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega\kappa(\omega)}{c} \quad (3)$$

Donde $t_{12}(\omega)$ y $t_{21}(\omega)$ es el coeficiente de transmisión de Fresnel del aire a la muestra y de la muestra al aire, respectivamente.

La configuración de transmisión del sistema THz-TDS se muestra en la Figura 2. La cual muestra el pulso láser de femtosegundos que está dividido por un divisor de haz que se encuentra guiado por varios espejos desde el emisor hasta el receptor. La mitad del pulso óptico original (bomba) se usa para generar la radiación de THz, mientras la otra mitad (sonda) se usa para el proceso de detección. Este sistema también consta de una etapa de retardo que está dada al superponer el pulso THz con el pulso óptico en diferentes tiempos [6].

Esta técnica resulta muy útil para caracterizar algunos materiales. El estudio de los materiales en contacto con los THz tienen aplicaciones tecnológicas en diferentes áreas, como en la industria, la medicina, las telecomunicaciones, seguridad, entre otras [13].

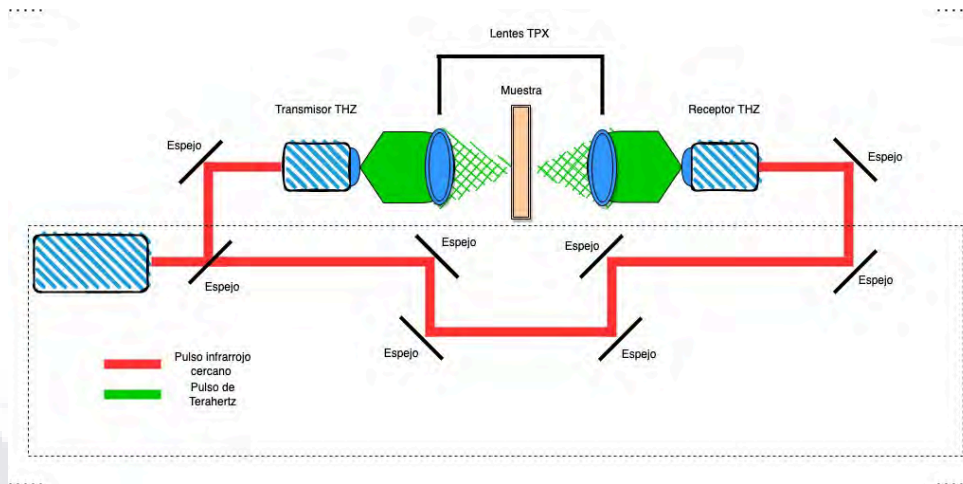


Figura 2 Configuración de transmisión del sistema THz-TDS, se muestra el pulso de fs (línea roja) dividido por un divisor de haz que se encuentra guiado por varios espejos desde el emisor hasta el receptor, la línea verde es el pulso de THz, la cual sale del transmisor a través de lentes, pasa por la muestra y llega hasta el receptor.

2.3 Tecnología de impresión 3D

Las tecnologías de impresión 3D trabajan con materiales transparentes a los THz que podemos usar para desarrollar dispositivos ópticos. El término creación rápida de prototipos (RP) es usado para describir un proceso de creación de un prototipo, sistema o representación rápida, antes de su lanzamiento final. Este resulta ser un modelo o prototipo base, del cual saldrán más modelos, incluyendo el producto final. Las empresas usan este término con el fin de obtener retroalimentación dentro de la etapa de desarrollo y así poder probar nuevas ideas.

Se formalizó el término RP a fabricación aditiva (o AM por sus siglas en inglés, Additive Manufacturing) y lo que popularmente se llama impresión 3D. El término creación rápida de prototipos, en un contexto de desarrollo de productos, se usa para referirse a tecnologías que crean prototipos físicos directamente a partir de la tecnología digital. A lo largo del tiempo, los usuarios de RP se dieron cuenta de que este término no describe de manera eficaz las aplicaciones más recientes de la tecnología. Han notado que estas tecnologías avanzan a pasos agigantados y gracias a eso los prototipos resultantes de estas máquinas

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

tienen un vínculo más estrecho que el producto final, siendo así que muchas de las piezas finales se fabricaban directamente de estas máquinas [17].

La fabricación aditiva usa un sistema de Diseño Asistido por Computadora Tridimensional mejor conocido como CAD 3D (Three-Dimensional Computer-Aided Design). Esta tecnología simplifica el proceso de producir objetos 3D complejos a partir directamente de datos CAD. Los AM solo necesitan algunos detalles dimensionales básicos y los materiales que se utilizarán para la construcción.

La impresión 3D es uno de los tantos métodos de fabricación aditiva, la estereolitografía, la impresión por chorro de tinta y la sinterización selectiva por láser son algunos métodos adicionales, entre otros. La impresión tridimensional tiene varios beneficios, el más importante es que solamente utiliza la cantidad de material necesaria para la construcción de la pieza, de esta manera se utiliza menos material que el de la fabricación sustractiva. Esta tecnología resulta ser muy económica y fácil de usar, construye los elementos de forma muy rápida. Esta técnica consta de agregar capas y capas de material hasta crear la pieza, desde la parte inferior de la máquina, fundiendo el material termoplástico. Para una mejor comprensión de cómo funcionan las impresoras 3D, en la Figura 3A) se muestra un diagrama de la misma y en la Figura 3B) la imagen de una impresora 3D [18][19].

Otro beneficio de las impresoras 3D es que hay una amplia cantidad de materiales que se pueden utilizar en estos dispositivos. Estos materiales pueden tener diferentes aplicaciones en la industria.

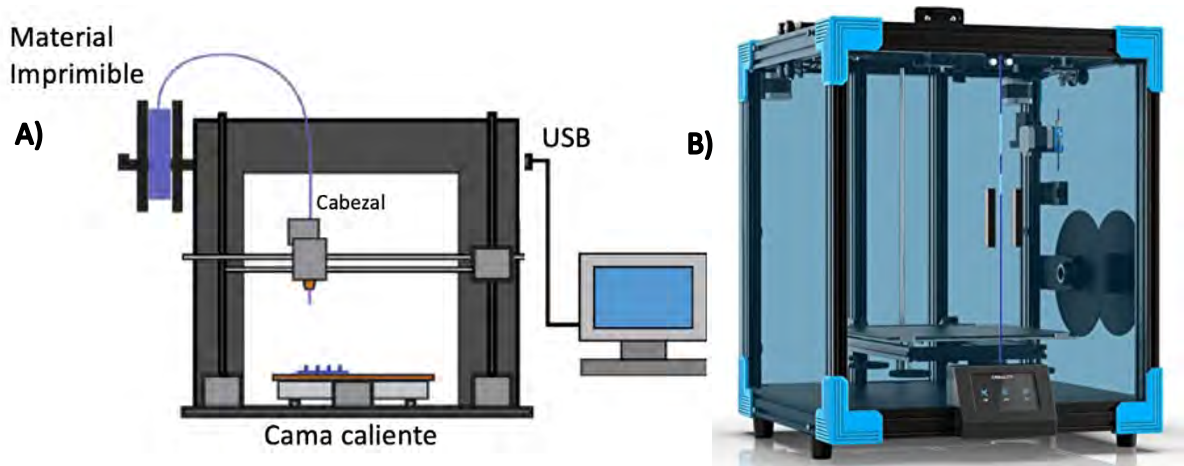


Figura 3 A) Diagrama de impresora 3D- El objeto se manda de la computadora a la impresora que tiene un cabezal el cual funde el material imprimible y lo deposita en la cama caliente B) Imagen de una impresora Creality Ender 5 3D .

2.4 Materiales de impresión 3D

Los materiales que se usan en las impresoras 3D normalmente necesitan un manejo cuidadoso, ya que se debe evitar la exposición al exceso de luz o la humedad. Los softwares normalmente se ajustan a los diferentes materiales para poderlos reconocer, ajustando los parámetros de impresión.

Gracias a las diferentes características que tienen los materiales, por ejemplo, los filamentos de extrusión de material necesitan una tolerancia diametral muy ajustada que normalmente no se encuentra disponible en las extrusoras convencionales. Por muy iguales que parezcan los materiales , se necesita una configuración de construcción cuidadosa y una optimización de parámetros del proceso [20].

Algunos de los materiales más comunes para la impresión 3D por deposición de material fundido es el ácido poliláctico, el acrilonitrilo butadieno estireno y el Nylon. El Bendlay y Poliestireno son materiales poco comunes pero sí son comerciales. Por otro lado, el

polietileno de alta densidad y polipropileno son materiales poco comunes y menos comerciales [20].

Estos materiales de impresión 3D son transparentes para las frecuencias en THz, por lo que el desarrollo de dispositivos en impresoras 3D resulta muy útil para trabajar con esta frecuencia. La tecnología de THz no solo necesita fuentes y detectores, sino que también es indispensable tener dispositivos para guiar las ondas como guías de onda, lentes, etc. Gracias al fácil manejo de las impresoras 3D es fácil producir dichos dispositivos, y siendo que los materiales poliméricos que utilizan las impresoras son transparentes a los THz se pueden producir estos dispositivos de manera fácil y económica.

2.4.1 Materiales de impresión 3D para la banda de THz

El estudio de Busch, S. F., Weidenbach, M., et al [20]. ha revelado que algunos de los termoplásticos que usan las impresoras 3D por deposición de material fundido, son muy útiles para producir tecnologías a frecuencia de THz. Este estudio caracterizó 7 materiales poliméricos, los cuales son acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA), Nylon, Bendlay, poliestireno, polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP). El HDPE y el PP tienen la característica de ser materiales no estándar y muy blandos.

Las características que se obtuvieron son el índice de refracción y el coeficiente de absorción. La Figura 4 A) nos muestra el índice de refracción de los diferentes materiales, los cuales fueron analizados con un espectrómetro de THz. Como se puede observar, ningún material muestra dispersión en cuanto a los índices de refracción. El HDPE y el PP tienen el índice más bajo.

La gráfica B) nos muestra el coeficiente de absorción, de igual forma el HDPE y el PP son los menos absorbentes con valores aproximándose a 0. El Nylon y PLA tienen los valores más altos, siendo los materiales más absorbentes y con el índice de refracción más alto.

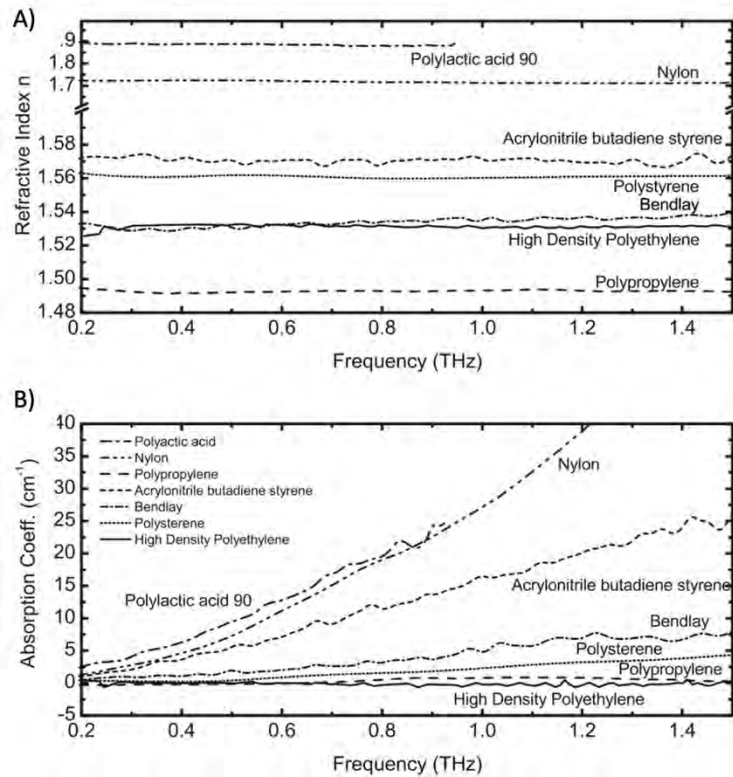


Figura 4 Índice de refracción y coeficiente de absorción de 7 materiales de impresión 3D- Busch, S. F., Weidenbach, M., et al. "Optical Properties of 3D Printable Plastics in the THz Regime and their Application for 3D Printed THz Optics"[20].

El poliestireno es un material fácil de manejar para su impresión, gracias a sus propiedades fisicoquímicas. Como se puede observar gracias a la caracterización de los autores [20], el poliestireno resulta transparente en THz así como el BendLay. El HDPE y el PP a pesar de que tiene menos absorción e índice de refracción, son muy difíciles de usar, esto los vuelve menos prácticos.

2.5 Aplicaciones de THz con impresión 3D

Gracias a la invención de la espectroscopia en el dominio del tiempo, se ha podido estudiar la interacción de esta radiación con la materia. Dejando así un panorama más amplio de áreas en la que se pueda trabajar con los THz. Como en las comunicaciones inalámbricas, ciencias de la salud, astronomía, entre muchas otras. A continuación nombraré algunas de

estas aplicaciones que tienen un gran impacto en este trabajo debido a que se asemejan al mismo.

E. Medina et al. [17] demostró la fabricación y caracterización de unas guías de onda rectas a potencias promedio, en las cuales mediante un láser con salida de fibra óptica se inyectó luz a las guías de onda. Trazó guías de onda rectas monomodo con cambios en el índice de refracción del orden de 1×10^{-3} . Este autor también fabricó y caracterizó un multiplexor/demultiplexor a partir de un acoplador direccional. Esto con el fin de integrar esto en futuros desarrollos en materiales utilizados para las telecomunicaciones [17].

El desarrollo de dispositivos en THz sintonizables y filtros para las telecomunicaciones tienen un gran auge y un sinnúmero de aplicaciones, tal como lo describió M. Ortiz [14], quien desarrolló cuatro dispositivos de THz. El primero es un filtro de modo guiado, que dependiendo de las dimensiones físicas, se puede utilizar para filtrar 200GHz, 250GHz o 300GHz. Los otros tres dispositivos son compuertas lógicas impresas en 3D para la realización de operaciones lógicas, las cuales son OR, AND, XOR, estas están operando a 130GHz [14].

Los estudios de THz utilizando impresoras 3D han dado muchos frutos, como la primera lente GRIN impresa en 3D. Este lente fue desarrollado por A. Hernández [6] y funciona sin importar cuál sea la polarización, al menos para las frecuencias por debajo de 800 GHz. Por otro lado, también tenemos un prisma similar al prisma de Wollaston. Este prisma usa la birrefringencia inducida en una estructura de plástico y aire en capas; esto produce refracción en diferentes direcciones para diferentes polarizaciones. Otro dispositivo de Hernández, A es una placa impresa con variaciones de birrefringencia para la generación de haces vectoriales cilíndricos a frecuencias de THz. Por último tenemos el lente convergente de índice de refracción escalonado basado en dieléctricos artificiales. El funcionamiento de este dispositivo se basa en el modo TE₁ del PPWG (parallel-plate waveguides). Esta

tecnología es importante para la fabricación de dispositivos de THz de próxima generación [6].

Como se ha visto en este capítulo, la espectroscopia de THz tiene muchas aplicaciones relacionadas con lo desarrollado en esta tesis. Algunos de los dispositivos desarrollados por estos dos autores (Ortiz, M y Hernández, A) usan tecnología de impresión 3D, lo cual reduce costos de fabricación y usa materiales transparentes para la frecuencia de THz.

2.6 Guías de onda ópticas

Un ejemplo de guía de onda son los dispositivos de interferencia multimodal. Esto es esencialmente una guía de onda óptica ancha que funciona modificando el índice de refracción en un área específica, causando un efecto de múltiples autoimágenes. Las autoimágenes son estructuras bien definidas que se forman de manera asimétrica o simétricamente dentro de una guía de onda. Los MMI ofrecen la ventaja de ser muy compactos y tener tolerancia de fabricación [8]. A continuación se muestra el esquema de un modulador MMI desarrollado por MAY D. et al [21] (figura 5). Esté cuenta con una guía de onda de entrada y salida monomodal, que inyecta y extrae la luz de la guía de onda multimodal, en la cual se encuentra la zona modulada por el cambio de índice de refracción.

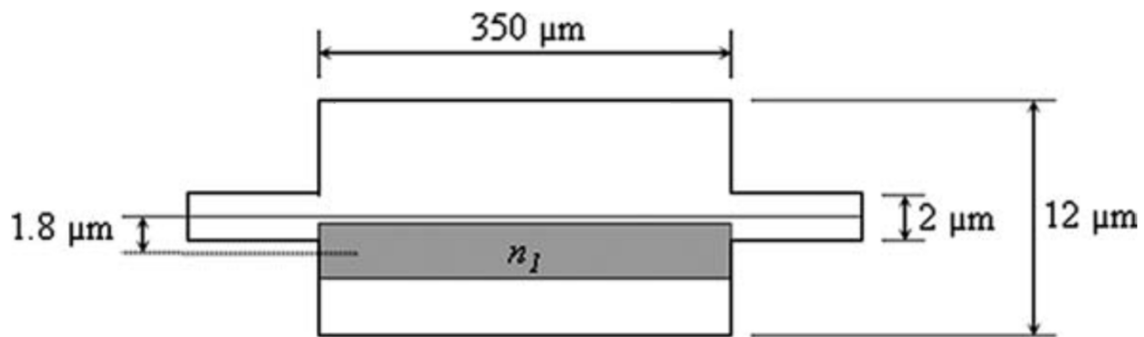


Figura 5 Esquema del modulador MMI y sus parámetros de diseño- May-Arrijoja, D. A., LiKamWa, P. et al. "Ultra-compact multimode interference InGaAsP multiple quantum well modulator. Optical and Quantum Electronics" [21].

La Figura 6 muestra la simulación de la propagación del haz de luz que entra en el dispositivo por la parte inferior y sale por la parte superior [21]. Podemos ver como en la Figura 6A) se generan las múltiples autoimágenes de forma simétrica logrando acoplarse a la guía de onda de salida. En cambio, la Figura 6B) muestra la propagación pero con el cambio del índice de refracción en el área modulada, podemos ver como las autoimágenes que se forman son asimétricas. Esto genera un cambio de fase lo que provoca que no se acople a la guía de salida, modulando efectivamente la luz dando un efecto de encendido/apagado.

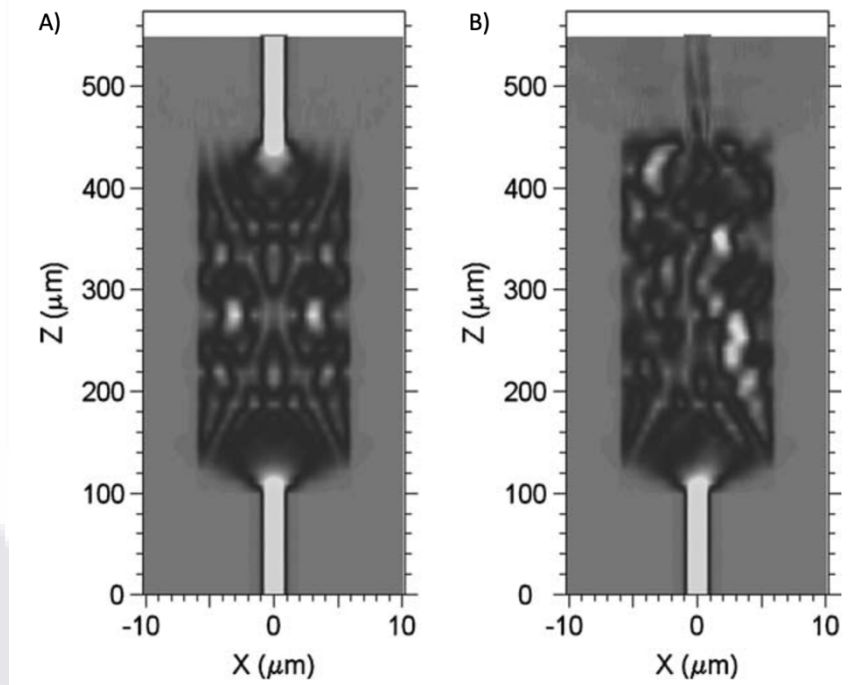


Figura 6 Características de propagación del haz (a) sin modulación de índice, y (b) con una modulación de índice de refracción más bajo- May-Arrijoja, D. A., LiKamWa, P. et al. "Ultra-compact multimode interference InGaAsP multiple quantum well modulator. Optical and Quantum Electronics" [21].

Este dispositivo tiene la ventaja de ser muy compacto, midiendo solo $350 \mu m$. También se puede integrar fácilmente con otros componentes fotónicos. Gracias a que estos dispositivos son compactos y tienen mucha tolerancia de fabricación, es que se pueden desarrollar con una impresora 3D. En el siguiente capítulo se caracterizan 3 materiales con el fin de observar su comportamiento con los THz al darles diferentes especificaciones de

impresión. Con el fin de usar estas especificaciones para controlar el cambio del índice de refracción en un MMI.



Capítulo 3 Caracterización de materiales con THz-TDS

En este capítulo comparamos las propiedades ópticas a frecuencias de THz de PLA, ABS y Bendlay cuando se modifican las especificaciones de impresión 3D, como la densidad de relleno y la altura de capa. Esto con el fin de conocer como afectan estos cambios y en medida de lo posible tener estructuras impresas con el mismo material, pero poder regular el índice de refracción en diferentes áreas según la densidad de relleno que le demos.

Estos cambios en los materiales nos permitirán comprender cómo podemos adaptar sus propiedades ópticas para que se puedan utilizar en aplicaciones específicas. Este estudio es importante porque estas características dan cuenta de la calidad de la pieza [8] y establecen el rendimiento en THz de un componente.

Escogimos el PLA, ABS y Bendlay, ya que según estudios previos, el ácido poliláctico (PLA) y el butadieno estireno (ABS) son material estándar con alta capacidad de impresión y se utilizan ampliamente para la impresión 3D. Además, existen otros materiales no tan comunes como el polietileno de alta densidad (HDPE), el polipropileno (PP), en la industria 3D [20]. El HDPE y el PP son materiales difíciles de encontrar en el mercado, por lo que no se usaron en este trabajo.

3.1 Metodología

Para la caracterización de los materiales poliméricos se imprimieron ocho piezas de cada material (PLA, ABS y Bendlay) en una Creality Ender 5 3D. Cinco de las muestras tienen diferente densidad de relleno y tres tienen diferente altura de capa. La densidad de relleno es la cantidad de material en porcentaje que usa en el interior de la impresión y la altura de capa es el grosor que tendrá entre cada capa. En este caso, todas las piezas tienen el mismo tipo de relleno rectilíneo y la misma geometría de impresión. La Figura 7 muestra las piezas de Bendlay, en ella podemos observar la diferencia geométrica de cada una de la pieza. Es

decir, se observa las diferencias de densidad de relleno y de altura de capa. La Tabla 1 presenta los parámetros de impresión considerados en el estudio.

Tabla 1 Características de impresión utilizados en las piezas.

Característica	Valores
Densidad de relleno %	5, 15, 25, 50, 90
Altura de capa [mm]	0.1, 0.2, 0.3, 0.4

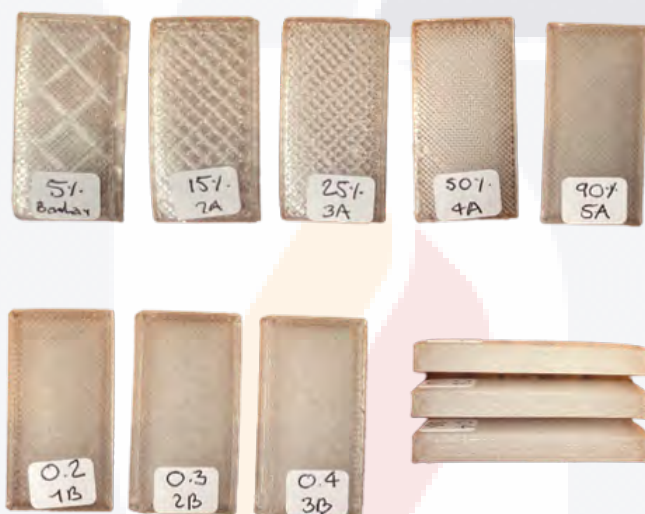


Figura 7 Piezas BendLay impresas con diferente altura de capa y densidad de relleno.

Para la caracterización de las propiedades ópticas de las muestras se utilizó un espectrómetro de dominio de tiempo Menlo TK5 (THz-TDS) con configuración de transmisión, como se describió anteriormente. Medimos 5 veces cada pieza y obtuvimos el promedio de estas 5 mediciones, posteriormente se obtuvo el espectro de cada una de las piezas.

3.2 Resultados

A partir de cada espectro, calculamos el índice de refracción y el coeficiente de absorción correspondientes con las ecuaciones 1,2 y 3. El espectro de las piezas con diferente densidad de relleno del PLA se muestran en la imagen 8A), en la 8B) se muestran para el material Bendlay y en la 8C) para el ABS.

La imagen 9A) nos muestra el espectro de las piezas de PLA con diferente altura de capa, la 9B) para el Bendlay y la 9C) para las de ABS. Según los datos arrojados por el espectro de las piezas, pueden aparecer bandas de absorción para densidades de llenado bajas (15-50%). Esto puede estar relacionado con efectos resonantes, dado que las dimensiones de la estructura de relleno son comparables a las longitudes de onda utilizadas. Los efectos resonantes son el aumento de amplitud que se produce cuando la frecuencia de una fuerza aplicada periódicamente es igual o se aproxima a la frecuencia natural del sistema sobre el que actúa la fuerza [22].

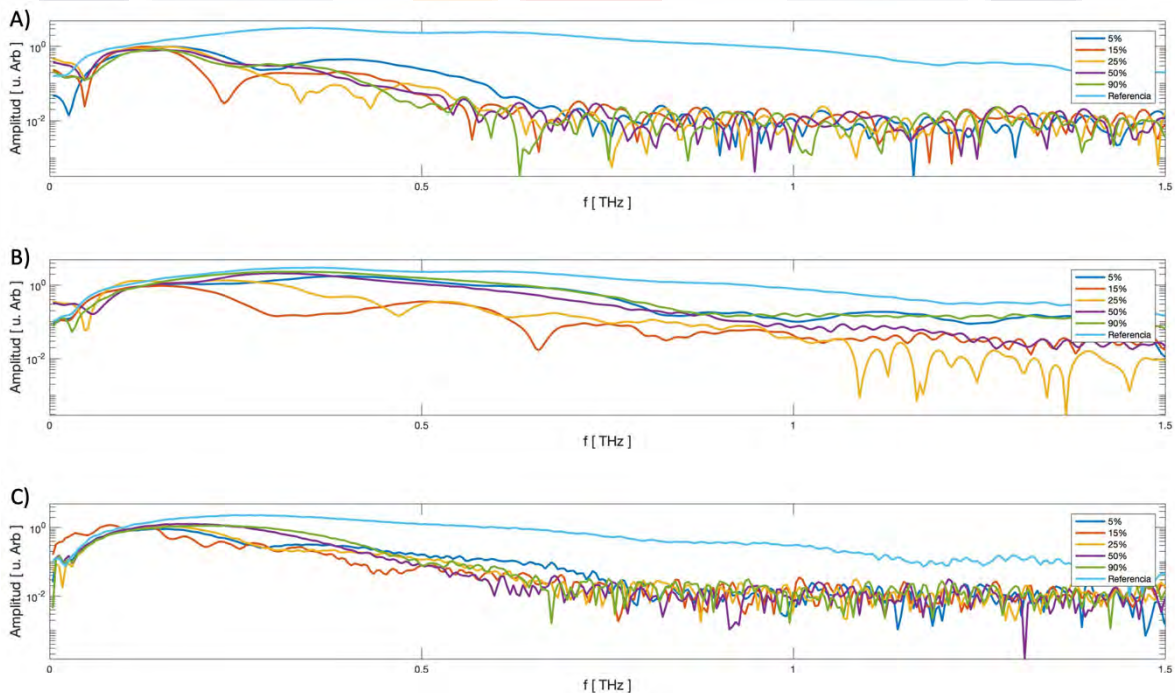


Figura 8 Espectro de las piezas con diferente densidad de relleno de los materiales A) PLA, B) Bendlay y c) ABS.

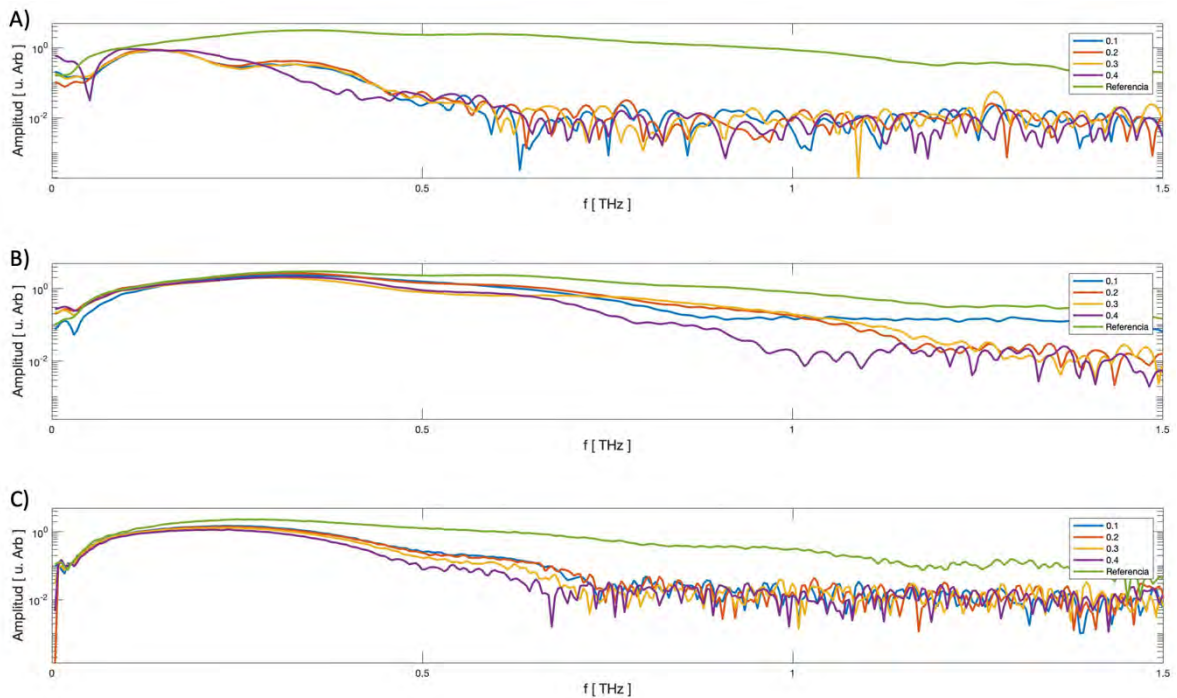


Figura 9 Espectro de las piezas con diferente altura de capa de los materiales A) PLA, B) Bendlay y c) ABS.

Las Figuras 10 y 11 muestran los resultados a 500 GHz para cada material. Usamos esta frecuencia para comparar con trabajos previos [20]. En la Figura 10, podemos ver cómo cambia el índice de refracción de los materiales con diferentes especificaciones de impresión. Como era de esperar, el índice de refracción es mayor para muestras más densas; sin embargo, podemos observar que las diferencias son pequeñas para densidades superiores al 50%. La Fig. 11 muestra cómo estas bandas de absorción afectan el coeficiente de absorción. Por ejemplo, en el caso de Bendlay, entre 10% y 25% de densidad de relleno, la absorción aumenta a 500 GHz. Para densidades superiores al 50%, los valles de absorción ya no son perceptibles.

Podemos calcular el cambio en el índice de refracción y el coeficiente de absorción para cada material en función de la configuración y la frecuencia. Estos gráficos pueden utilizarse como guía para elegir las mejores calidades de impresión dado el índice de refracción deseado para una aplicación específica

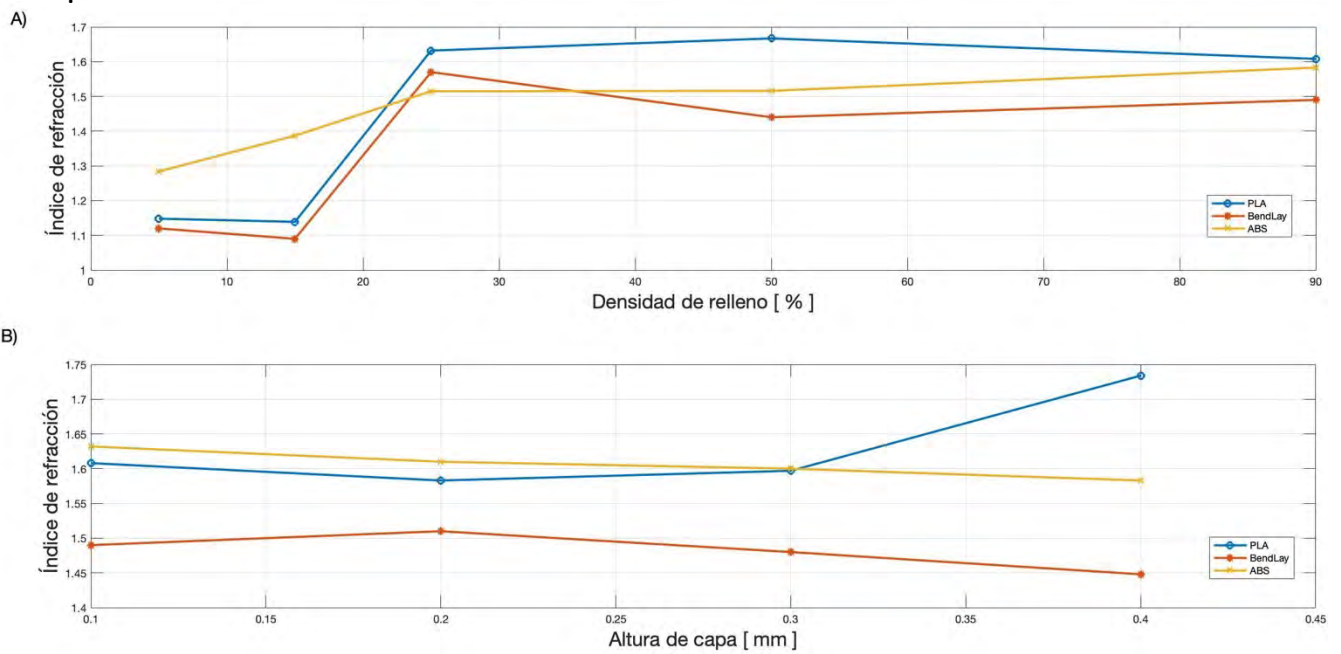


Figura 10 Índice de refracción @500 GHz de materiales PLA, BendLay y ABS. Índice de refracción para diferentes A) densidad de relleno y B) altura de capa.

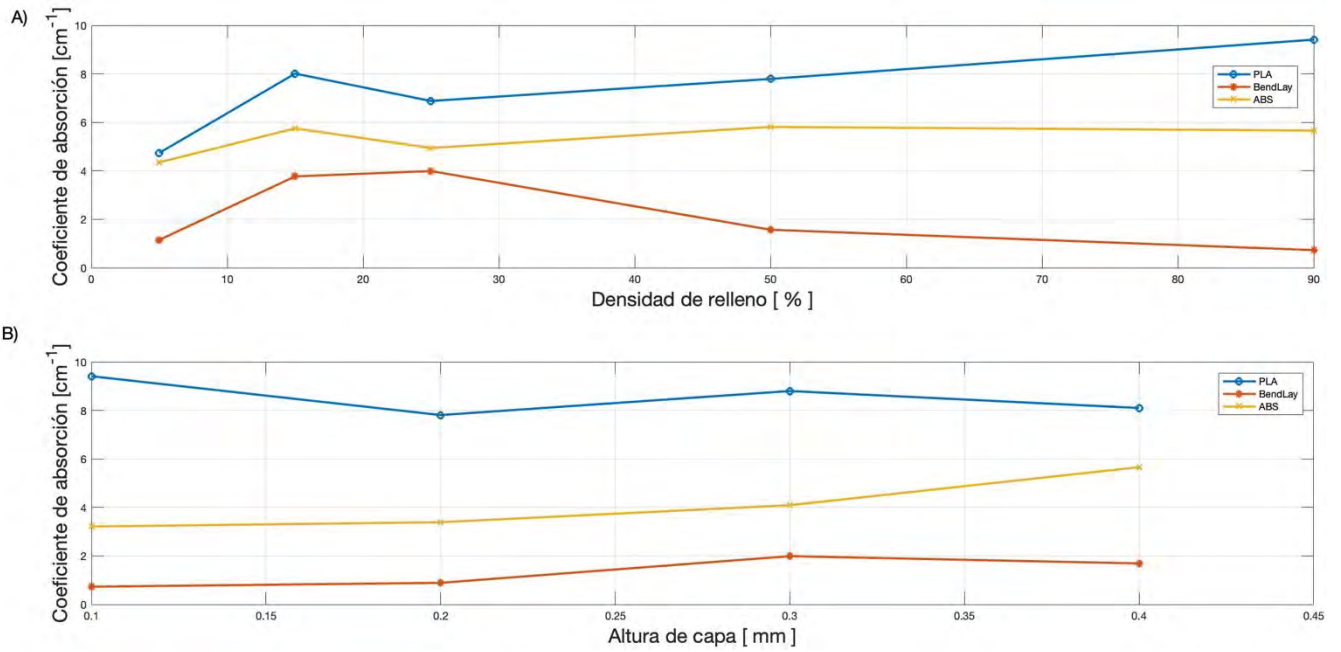


Figura 11 Coeficiente de absorción @500 GHz de materiales PLA, BendLay y ABS. Coeficiente de absorción para diferentes A) densidad de relleno y B) altura de capa.

La Figura 12 y 13 muestran las mismas gráficas, pero a 0.15 THz, podemos ver como se comporta muy similar a 500 GHz. Se usó esta frecuencia debido a que el dispositivo MMI se simulara a 0.15 THz. El índice aumenta para densidades mayores de 25%, con excepción del ABS en esta aumenta desde el 10%.

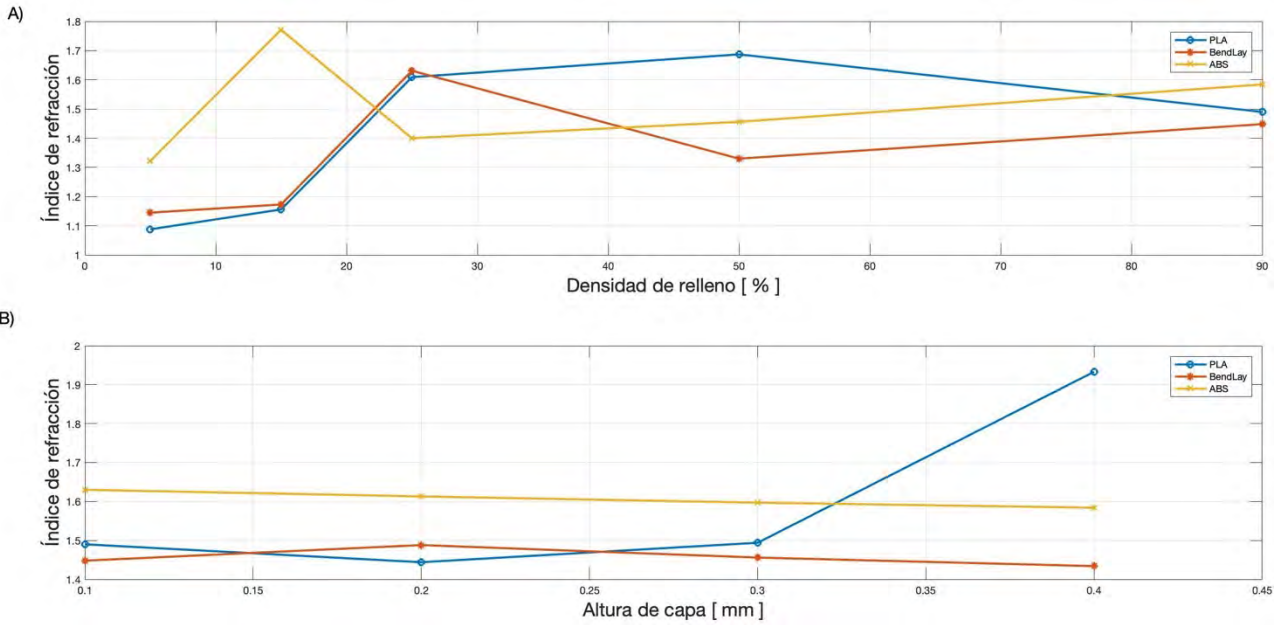


Figura 12 Índice de refracción @0.15 THz de materiales PLA, BendLay y ABS. Índice de refracción para diferentes A) densidad de relleno y B) altura de capa.

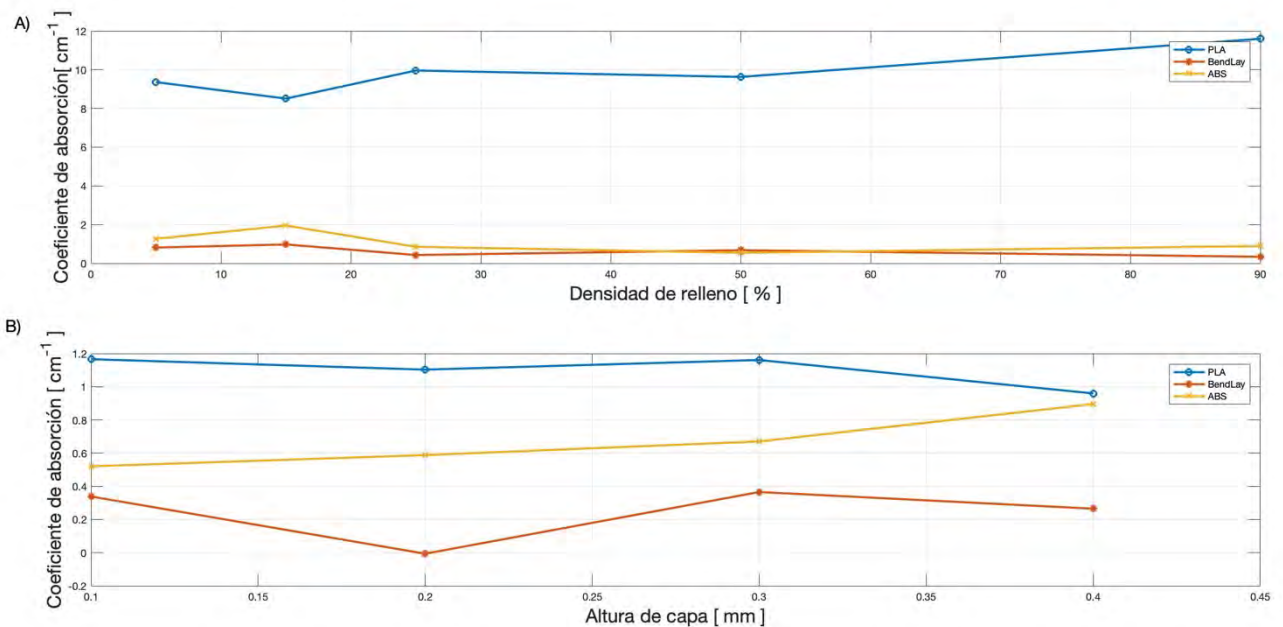


Figura 13 Coeficiente de absorción @0.15 THz de materiales PLA, BendLay y ABS. Coeficiente de absorción para diferentes A) densidad de relleno y B) altura de capa.

En la imagen 13 podemos ver como a esta frecuencia las bandas de absorción casi no son perceptibles para ningún porcentaje de densidad y el coeficiente disminuye con valores muy cercanos a 0 para el material Bendlay y ABS.

La Figura 14 y la Figura 15 muestran el índice de refracción y el coeficiente de absorción de piezas con diferentes especificaciones de impresión para diferentes frecuencias. La Figura 14A) muestra que para frecuencias más altas el índice de refracción disminuye y las piezas con menor altura de capa tienen el índice de refracción más bajo en todas las frecuencias. En la Figura 14B) podemos ver que a altas frecuencias el índice de refracción aumenta, y para bajas frecuencias el índice de refracción disminuye y se mantiene constante para las diferentes densidades de relleno.

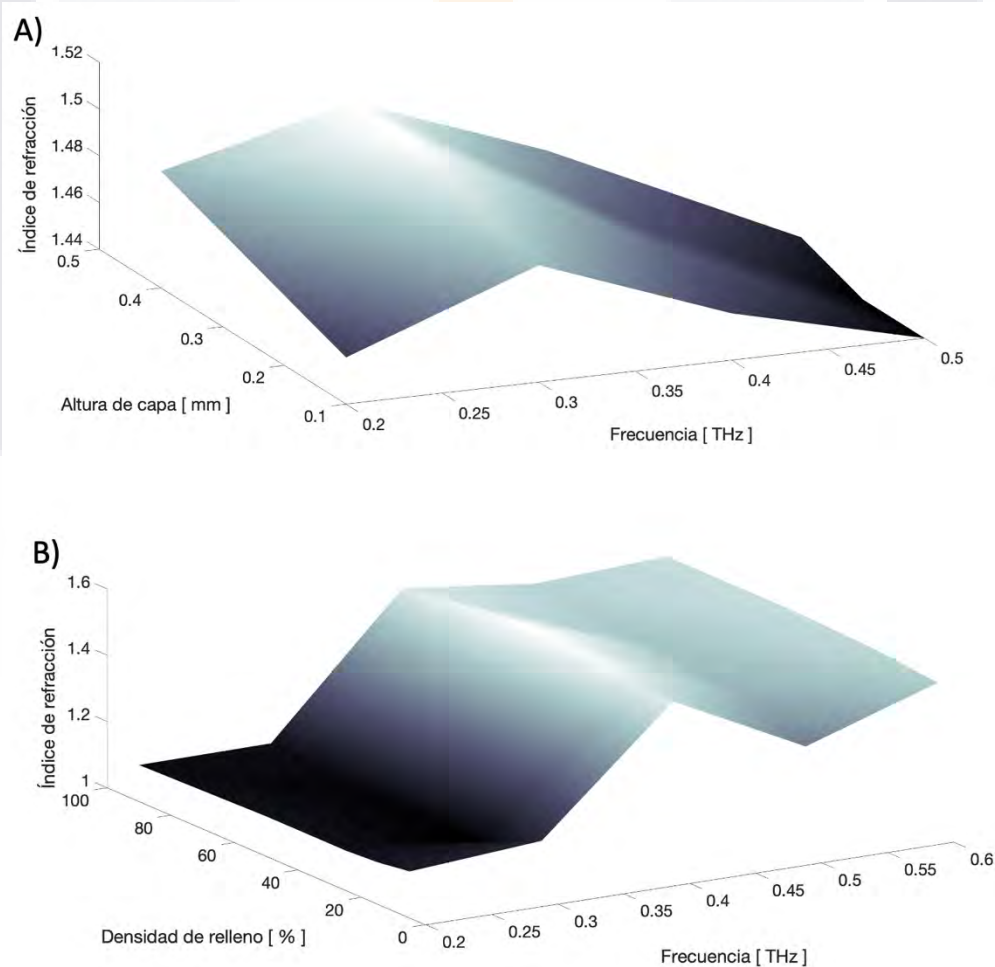


Figura 14 Índice de refracción con respecto a A) altura de capa, B) densidad de relleno y frecuencia para Bendlay.

La Figura 15A) muestra el coeficiente de absorción con respecto a la altura de la capa a diferentes frecuencias para BendLay. Como puede verse, para alturas de capa más bajas, el coeficiente de absorción alcanza su mínimo en aproximadamente 0,3 THz. En la Figura 15B) vemos que para frecuencias más altas el coeficiente de absorción disminuye para las muestras con menor porcentaje de llenado.

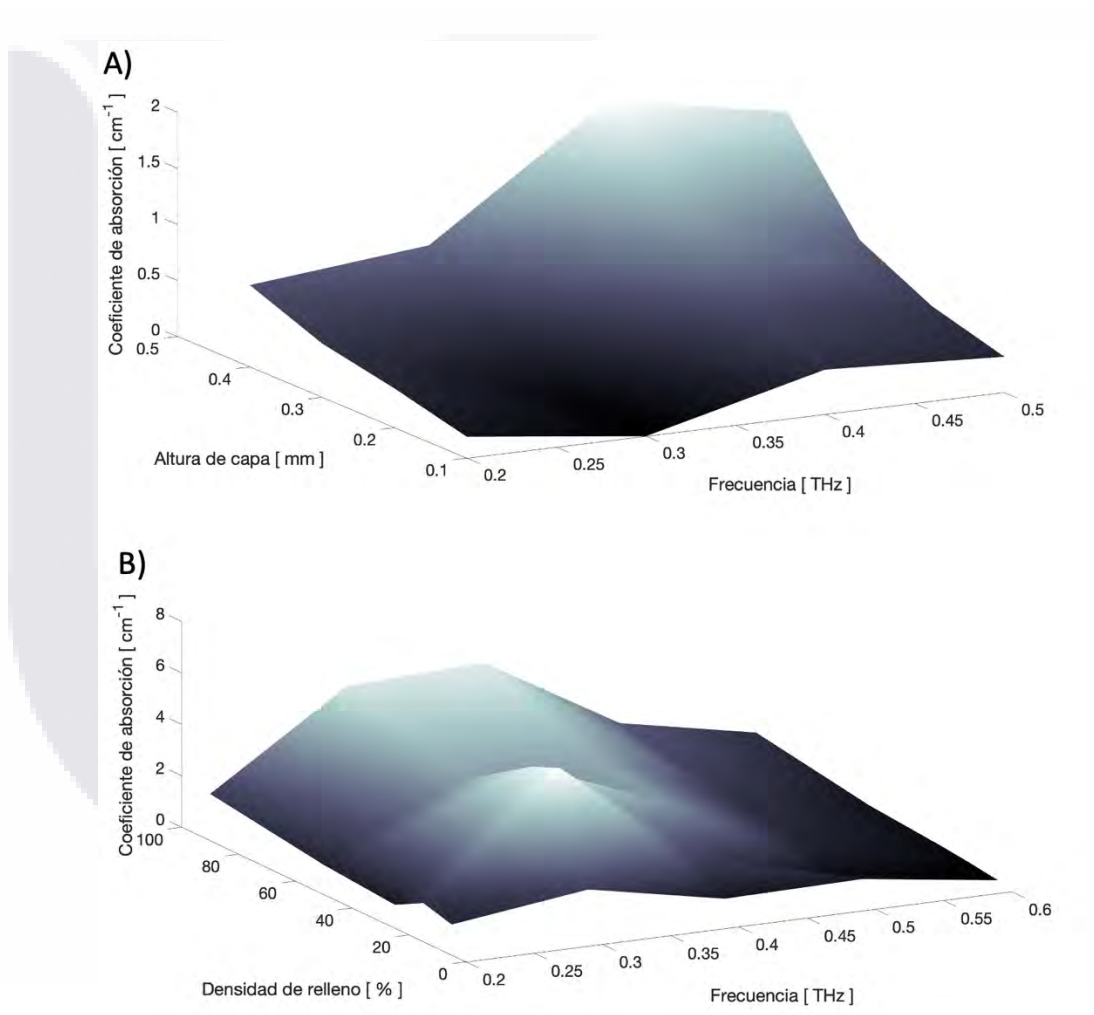


Figura 15 Coeficiente de absorción con respecto a A) altura de capa, B) densidad de llenado y frecuencia para Bendlay.

3.3 Conclusión

Caracterizamos el índice de refracción y la absorción de muestras impresas en 3D cuando se modifican las densidades de relleno y la altura de la capa. El objetivo principal de la tesis es poder ajustar las propiedades ópticas del material impreso en 3D para producir dispositivos fotónicos en la banda de THz.

Entre estos tres filamentos (PLA, ABS y BendLay), el BendLay tiene el índice de refracción más bajo y el coeficiente de absorción más bajo, como se informó anteriormente. Estos resultados nos comprueban que el BendLay es un material transparente y poco absorbente a frecuencia de THz. Por ello se usará este material para la simulación y fabricación del switch óptico de MMI.

En cuanto a las características de impresión, las piezas con densidades de relleno superiores al 60% muestran una variación mínima tanto para el índice de refracción como para la absorción. Usamos densidades de relleno del 90% y 95%, esto con el fin de cambiar el índice de refracción en un área específica dentro del switch. Para que la pieza quede fina usamos una altura de capa de 0.1 mm y un relleno de tipo rectilíneo. Cabe mencionar que la simulación se llevará a cabo a una frecuencia de 0.15 THz ya como vimos en las gráficas esta frecuencia tiene menor coeficiente de absorción.

Capítulo 4 Diseño y fabricación del dispositivo MMI

En este trabajo presentamos un interruptor óptico 1 x 1 cuya operación está basada en el efecto de interferencia multimodal. Este dispositivo MMI funciona modificando el índice de refracción en áreas específicas dentro de la cavidad de la guía de onda [8][23]. Se encuentran unas guías de onda monomodales de acceso al principio y al final del dispositivo que conducen a la guía de onda multimodal a la que llamamos cavidad (espacio donde se generan las autoimágenes y se selecciona una área para modular el índice de refracción) [24]. Se escogió este diseño, ya que estudios previos muestran un dispositivo MMI con esta geometría que resulta compacto y tiene una gran tolerancia de fabricación [21]. Esto para ampliar las posibilidades de en un futuro desarrollar filtros de THz para las telecomunicaciones, así como tener posibilidades de integrar estos componentes en circuitos fotónicos complejos.

Para la realización del dispositivo primero se simuló usando el software de COMSOL Multiphysics. COMSOL es un software de análisis y resolución por elementos finitos para aplicaciones de ingeniería y física [25]. Este sistema nos da la ventaja de poder probar y optimizar los parámetros del dispositivo. Utilizamos el módulo de óptica de ondas, con la interfaz de ondas electromagnéticas y dominio de la frecuencia. Se simuló la propagación de radiación en la banda de THz dentro del interruptor para determinar las características geométricas de su diseño y así estudiar los cambios en la propagación ocasionados por las diferencias en índice de refracción en áreas específicas de la cavidad.

4.1 Diseño y metodología

Realizamos un estudio para encontrar la óptima geometría para el interruptor de interferencia multimodal, asumiendo que trabajaremos con el material Bendlay, debido a que este material tiene un bajo coeficiente de absorción. Esto implica utilizar un índice de refracción de 1.5 para el dispositivo y 1.6 para el relleno a 0.15 THz. En la Figura 16 se muestra el esquema del interruptor y las variables con las que estaremos trabajando en el estudio.

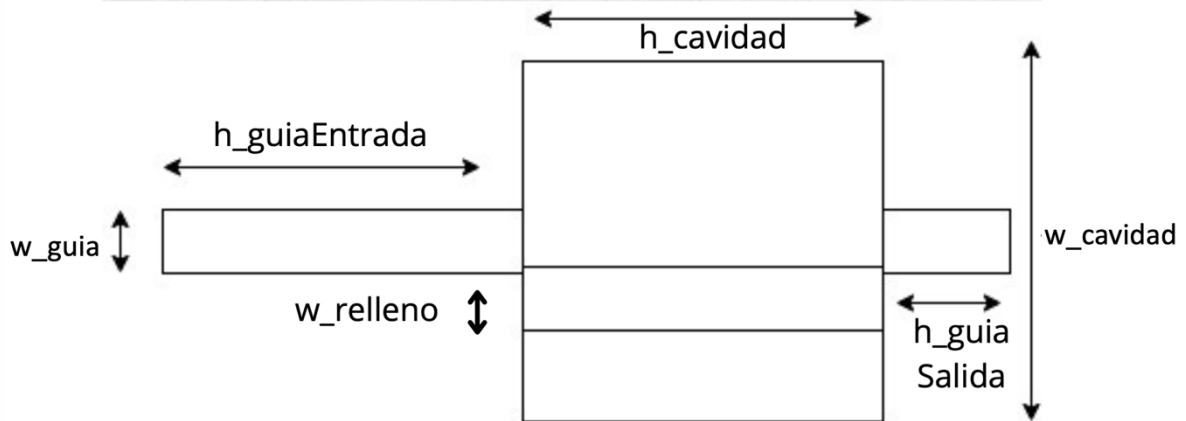


Figura 16 Esquema del interruptor y sus parámetros de diseño.

Este estudio consistió en hacer distintos barridos paramétricos en COMSOL Multiphysics para diferentes áreas. Para el primer estudio, la geometría del dispositivo se basó en el modulador MMI desarrollado por May D. et al [21]. Comenzamos con un barrido paramétrico para encontrar el ancho y largo óptimo de la guía de onda monomodal de entrada y salida. El barrido paramétrico consiste en seleccionar un rango de los dos parámetros, en este caso el ancho de guía de onda y el largo. Como resultado obtenemos una gráfica en 2D que muestra las zonas en donde se encuentra mayor y menor intensidad de campo eléctrico. La siguiente Figura (figura 17) muestra la gráfica en 2D de los resultados del primer barrido paramétrico. Podemos ver los resultados del barrido para la guía de onda

de entrada y salida, encontrando las medidas óptimas en 1.2 mm de ancho por 21 mm de largo.

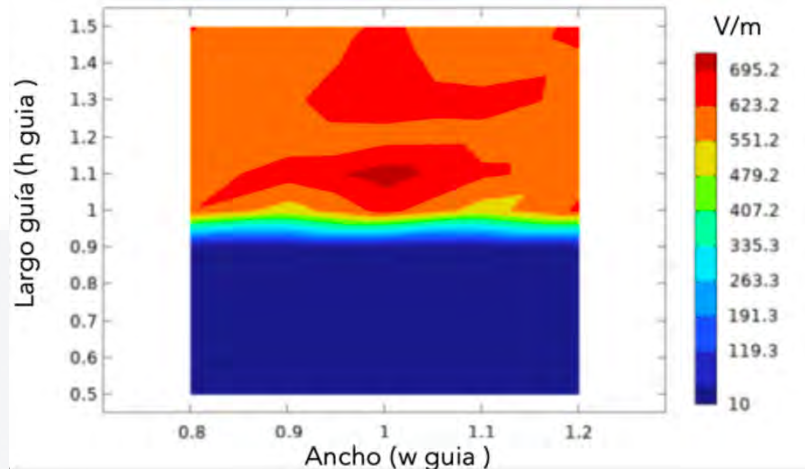


Figura 17 Gráficas en 2D del barrido paramétrico en donde se busca el óptimo del largo y ancho para la guía de onda monomodal.

El siguiente barrido paramétrico fue para encontrar el largo de la cavidad y el ancho con los valores que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2 Valores del primer barrido paramétrico.

Variable	Inicio (mm)	Intervalo (mm)	Final (mm)
Ancho de cavidad ($w_{cavidad}$)	5	1	9
Largo de cavidad ($h_{cavidad}$)	40	5	60

Según los resultados arrojados que se muestran en la Figura 18, hay mayor transmisión cerca de 8 mm en el ancho de la cavidad y en el largo de cavidad en 60 mm. Estos resultados se encuentran a una escala de 1.2 mm, esto viene de multiplicar el tamaño de la boquilla de la impresora 3D, que es de 0.4 mm por 3, este es un tamaño considerable para que la impresión sea resistente. Sin embargo, para ser más precisos se acortó el rango como se muestra en la tabla 3, tanto en el ancho de la cavidad como en el largo de la cavidad. El resultado lo podemos apreciar en la gráfica 18B). La geometría óptima de la cavidad (sin la zona modulada por el índice de refracción) que muestra la máxima transmisión generando

las autoimágenes de manera simétrica es de 9.6 mm por 73.2 mm. La simulación de transmisión a 0.15 THz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.5 se muestra en la Figura 19.

Tabla 3 Valores del segundo barrido paramétrico.

Variable	Inicio (mm)	Intervalo (mm)	Final (mm)
Ancho de cavidad (w_{cavidad})	7.65	0.35	8.5
Largo de cavidad (h_{cavidad})	58	1	65

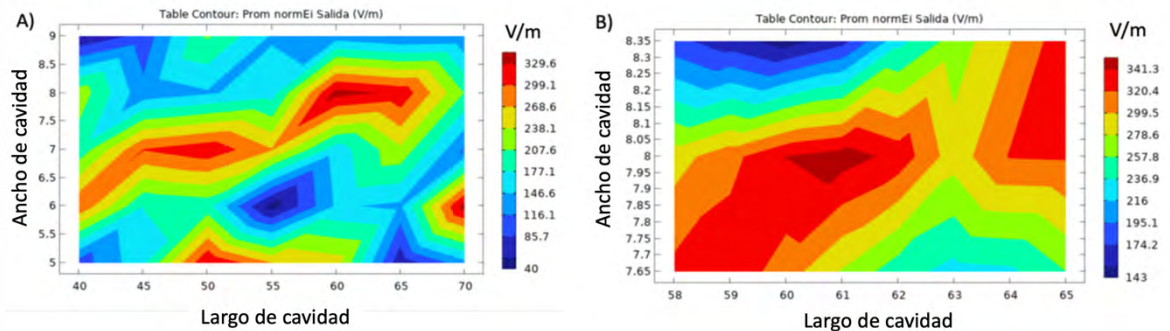


Figura 18 Gráfica 2D del barrido paramétrico para las variaciones geométricas del ancho de la cavidad y largo de la cavidad para conocer cuáles medidas son las óptimas para la mayor transmisión del campo eléctrico.

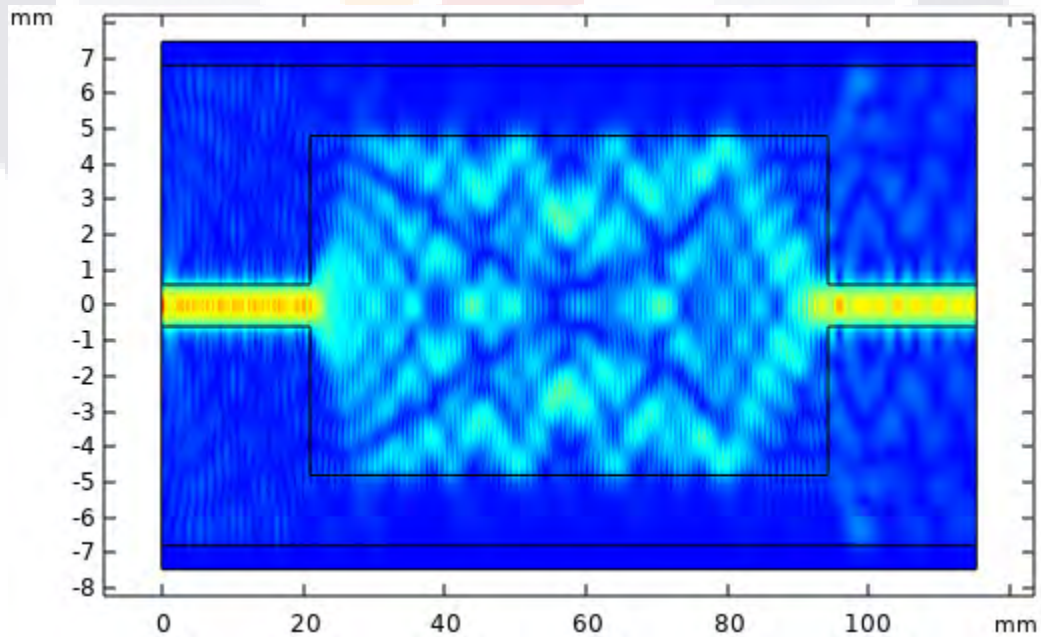


Figura 19 Simulación de transmisión a 0.15 THz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.5.

Para conocer el tamaño óptimo y la posición correcta de la zona modulada, igualmente se hizo un barrido paramétrico en lo ancho del relleno y en la posición en el eje “y” para conocer la configuración óptima y obtener la menor transmisión. Ambas variables usaron los rangos que se muestran en la tabla 4. El resultado se muestra en la gráfica A de la Figura 20, la cual muestra que la mínima transmisión se encuentra en un ancho de relleno en 0.7 mm y a una posición en el eje “y” de 0.8 mm.

Tabla 4 Valores del barrido paramétrico para encontrar la posición y el ancho del área modulada por el índice de refracción.

Variable	Inicial (mm)	Intervalo (mm)	Final (mm)
Ancho de relleno (w_relleno)	0.1	0.1	0.9
Posición en “y” del relleno (y_relleno)	0.1	0.1	0.9

Se acotó la zona de mínima transmisión para tener mayor precisión a la hora de colocar el relleno con los valores que se muestran a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5 Valores del segundo barrido paramétrico para encontrar la posición y el ancho del área modulada por el índice de refracción.

Variable	Inicio (mm)	Intervalo (mm)	Final (mm)
Ancho del relleno (w_relleno)	0.65	0.025	0.75
Posición en “y” del relleno (y_relleno)	0.75	0.025	0.85

Los resultados arrojados se muestran en la gráfica 20B), la cual muestra la mínima transmisión con un ancho de relleno en 2.16 mm y la posición - 3.648 mm. En la Figura 21 se muestra la simulación con el área modulada por el índice de refracción igual a 1.6 mm que muestra una mínima transmisión igual a -8.24 dB.

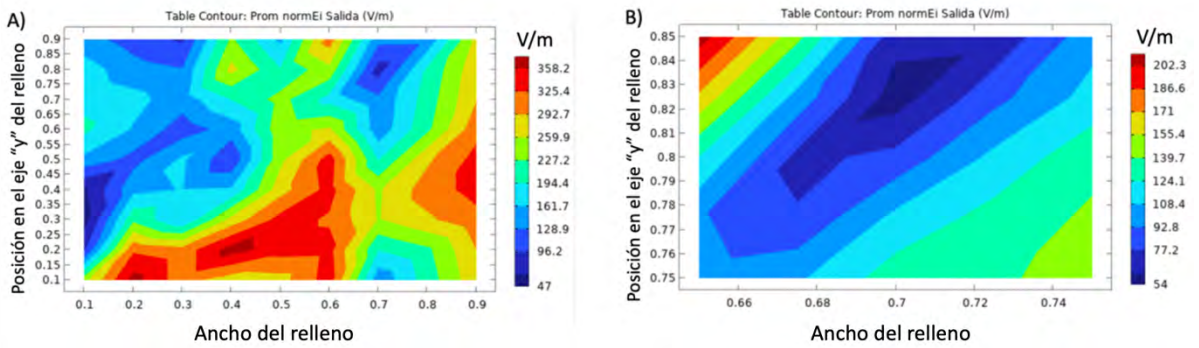


Figura 20 Gráfica 2D del barrido paramétrico para las variaciones geométricas del ancho del relleno y la posición en el eje "y" del relleno para conocer cuáles medidas son las óptimas para la menor transmisión del campo eléctrico.

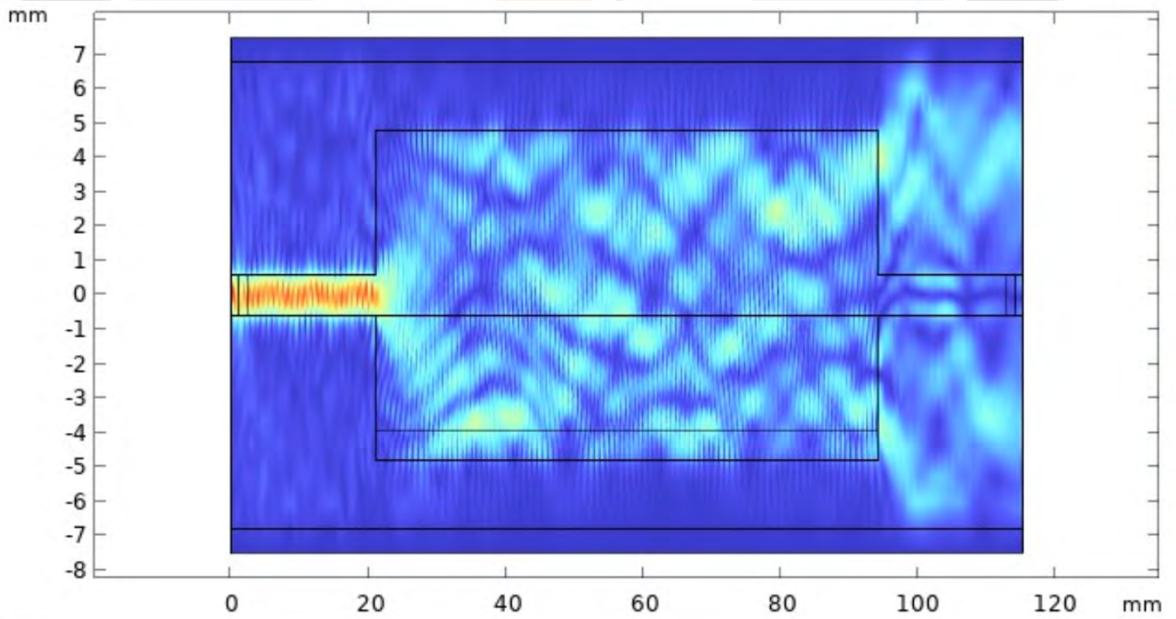


Figura 21 Simulación de mínima transmisión del relleno a 0.15 THz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.5 para el dispositivo y 1.6 para el relleno.

4.2 Resultados

Como resultado de las simulaciones realizadas, la geometría óptima resultante consiste en una guía de onda de entrada de 1.2 mm de ancho por 21 mm de largo que conduce los THz a una cavidad de 9.6 mm de ancho por 73.2 mm de largo. La cavidad acopla la radiación a una guía de salida con las mismas medidas que la guía de entrada. Como se muestra en la Figura 22 la parte del rectángulo interno corresponde al área modulada por el índice de refracción.

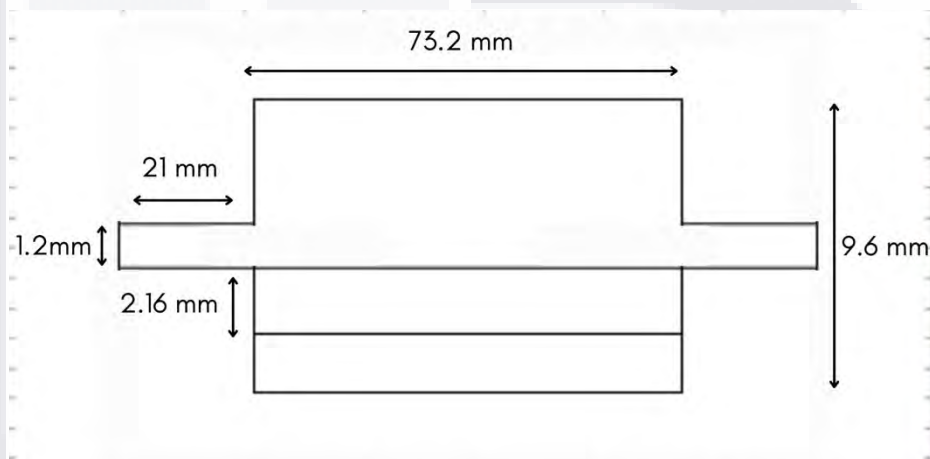


Figura 22 Esquema del interruptor fotónico 1X1 y sus parámetros de diseño.

Necesitamos un dispositivo compacto para poder ampliar las posibilidades de en un futuro desarrollar filtros de THz para las telecomunicaciones, así como tener posibilidades de integrar estos componentes en circuitos fotónicos complejos. También es importante mencionar que necesitamos un dispositivo no mayor a 5 cm, ya que para hacer el análisis práctico se ocupa un dispositivo con este tamaño. Por lo que se buscó acortar el dispositivo y realizar otros estudios para encontrar medidas más óptimas para el propósito en trabajos futuros.

Estos estudios constaron de realizar el acortamiento de la cavidad por medio de un barrido paramétrico y también se buscó descentrar la guía de onda de entrada. Sin embargo, si se

logró comprimir el dispositivo, pero no se generan las autoimágenes de forma simétrica en la cavidad.

Para cumplir con los principios de los dispositivos MMI realizamos otro estudio, pero esta vez se basó un poco en la geometría de una compuerta lógica [14]. Basándonos en ese dispositivo y aplicando el estudio de barrido paramétrico para encontrar el largo y ancho de la cavidad se obtuvo la siguiente gráfica en 2D (figura 23). La máxima transmisión del campo eléctrico se encontró en un ancho de cavidad en 5.2 mm y un largo de cavidad de 23.56 mm. Para la simulación de la propagación de THz dentro del interruptor utilizamos un índice de refracción de 1.45 (esto tomando nuevamente en cuenta que el material es BendLay y el estudio de la caracterización de los materiales) así como a una frecuencia de 0.15 THz. Esta simulación se muestra en la Figura 24, en donde podemos ver como efectivamente se forman las múltiples autoimágenes simétricamente dentro de la guía de onda multimodal. Teniendo en la guía de onda de salida entre 600 y 850 V/m de intensidad en el campo eléctrico, esto significa que la radiación logro acoplarse a la guía de onda de salida.

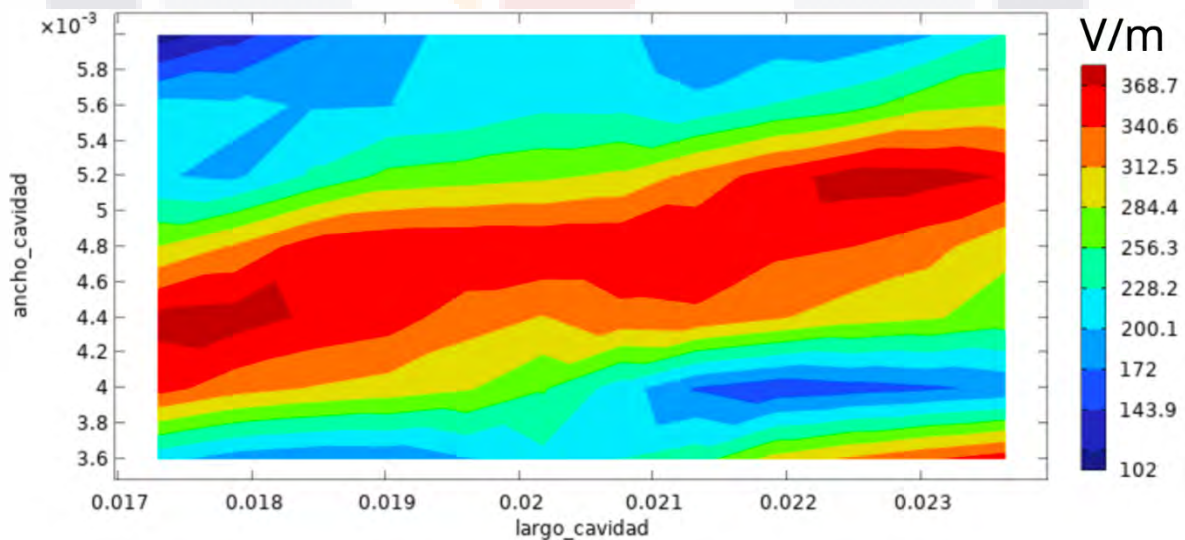


Figura 23 Gráfica 2D del barrido paramétrico para las variaciones geométricas de largo y ancho de la cavidad para conocer cuáles medidas son las óptimas para la mayor transmisión del campo eléctrico.

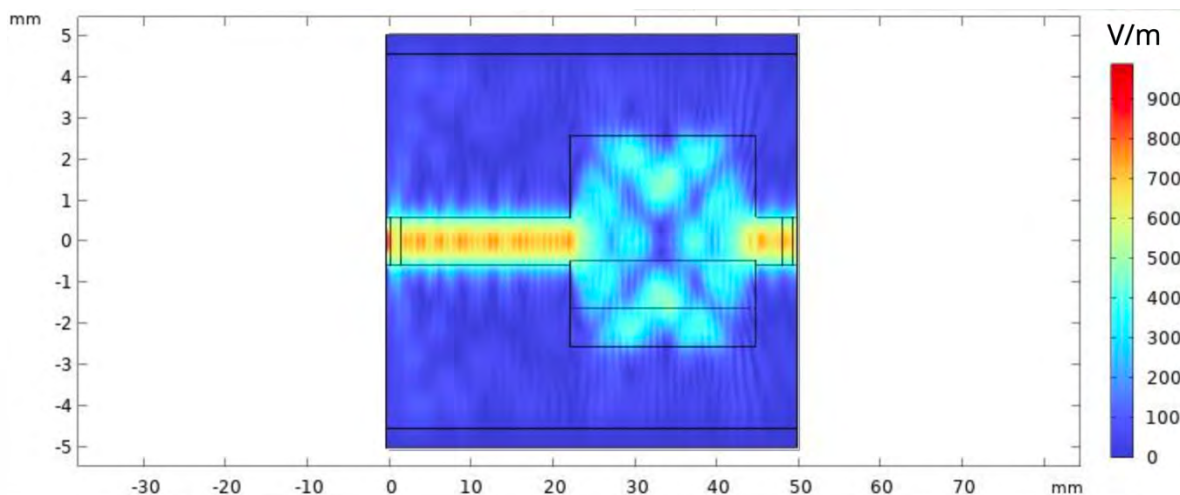


Figura 24 Simulación de transmisión a 0.15 THz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.45.

Para encontrar la geometría óptima en la que tendremos mínima transmisión modulando el relleno, realizamos el estudio paramétrico tomando en cuenta el ancho del relleno y la posición en Y en donde se colocara. La Figura 25 nos muestra la gráfica 2D de este barrido en donde vemos que la mínima transmisión se encuentra en la posición -1.6 mm en el eje Y con un ancho de relleno de 1.2 mm, esto nos da una pérdida de -6.86 dB. La simulación de la propagación se llevó a cabo con un índice de refracción de 1.45 y para el relleno se tomó en cuenta un valor que podemos tener dependiendo de la densidad de relleno que le demos a la pieza (Capítulo 3). Realizamos un estudio para encontrar la diferencia óptima entre el índice de refracción del dispositivo y el relleno, el cual resulto en una diferencia de 0.115. Considerando esto, el índice de refracción del relleno es de 1.565. La Figura 26 nos muestra esta simulación en donde podemos ver que efectivamente gracias al cambio del índice de refracción en el área específica se generan las autoimágenes de forma asimétrica. Esto provoca que no logre acoplarse la radiación a la guía de onda de salida, dando ese efecto de encendido/apagado. También podemos ver como hay una mínima transmisión a la guía de salida de entre 137 a 245 V/m.

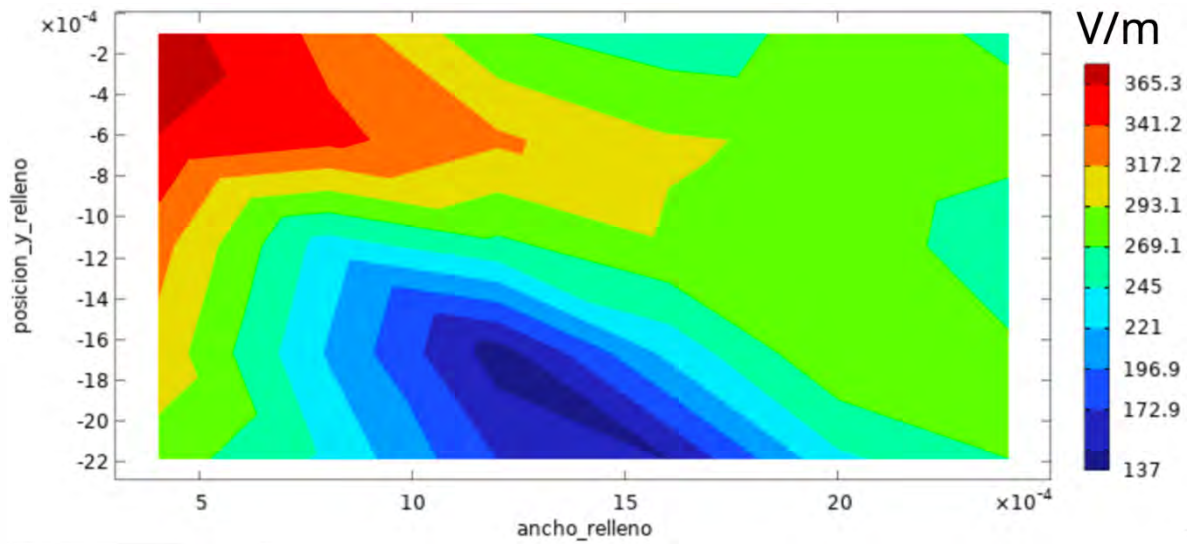


Figura 25 Gráfica 2D del barrido paramétrico para las variaciones geométricas de ancho de relleno con la posición en el eje Y para conocer cuáles medidas son las óptimas para una mínima transmisión.

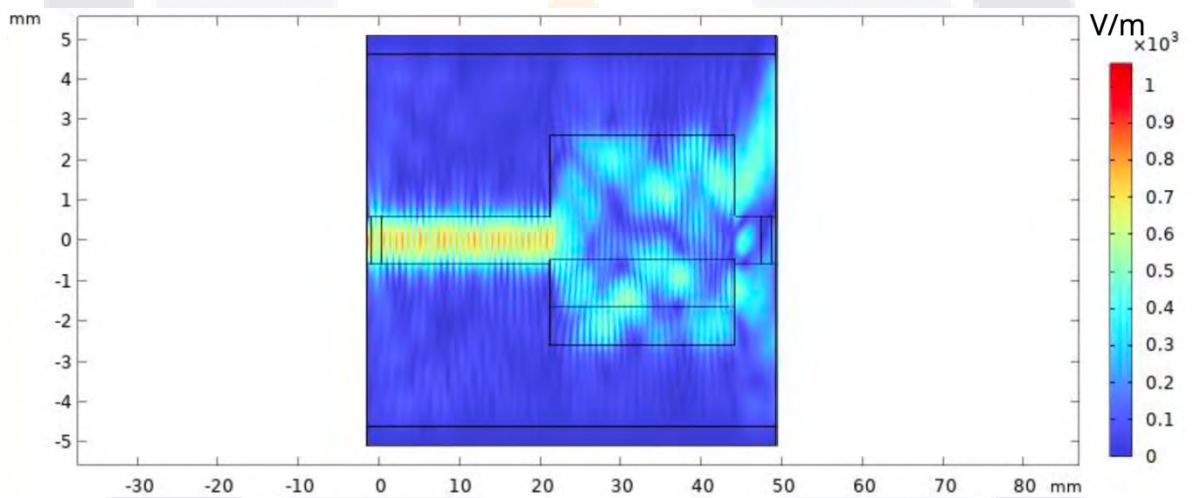


Figura 26 Simulación de mínima transmisión del relleno a 0.15 THz de la propagación del primer modo en el dispositivo con un índice de refracción de 1.45 para el dispositivo y 1.565 para el relleno..

En resumen, encontramos que la geometría óptima para este interruptor de interferencia multimodal de 1x1 están dadas por la Figura 27. Gracias a esta geometría se logra el encendido/apagado de un switch por medio de la modulación del índice de refracción en un área específica y el largo total del dispositivo resultante es de 5 cm.

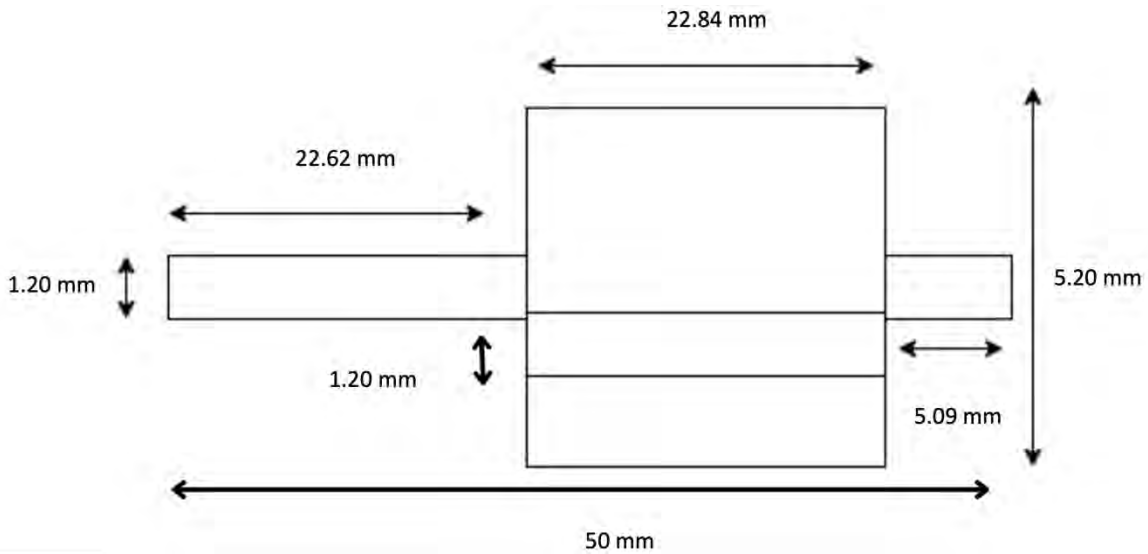


Figura 27 Esquema del interruptor o switch fotónico de 1x1 y sus parámetros de diseño.

4.2.1 Fabricación

Utilizamos una impresora 3D Creality Ender5 para el desarrollo del interruptor óptico, tomando cuenta la geometría resultante de la optimización del dispositivo. Realizamos el diseño en 3D en Ultimaker Cura y se le dio un 90% de densidad de relleno, altura de capa de 0.1 mm y con tipo de relleno rectilíneo. Posteriormente lo imprimimos con material Bendlay, la Figura 28 muestra el dispositivo con el hueco para colocar la pieza del relleno la cual se imprimió dos veces una con una densidad de 90% y otra con 95%. Utilizamos estos porcentajes de densidad de relleno, ya que estos valores muestran menor coeficiente de absorción. Se escogieron dos diferentes para tener un cambio de índice de refracción entre cada pieza de relleno.

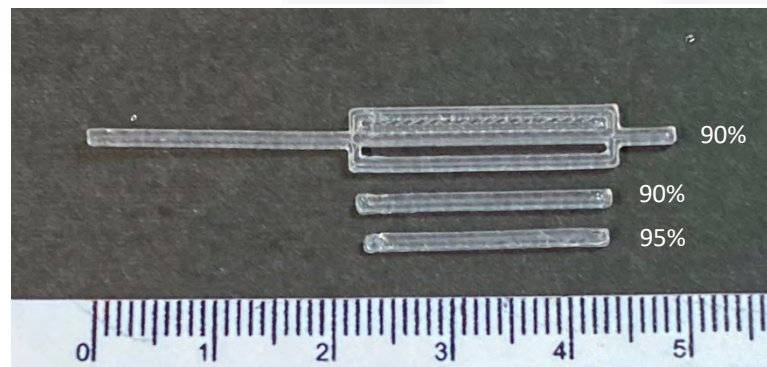


Figura 28 Imagen del dispositivo fabricado con material Bendlay, con una altura de capa de 0.1mm para las 3 piezas y su respectivo porcentaje de relleno.

4.3 Conclusión

Como se mostró en este capítulo, realizamos diferentes estudios para encontrar la geometría óptima con la cual obtener los efectos de un dispositivo de interferencia multimodal (MMI). El cual consta de una guías de onda de entrada con un ancho de 1.20 mm por 22.62 mm de largo y una guía de onda de salida monomodal de 1.20 mm por 5.09 mm de largo. Estas guías de onda inyectan y extraen la radiación de THz de una guía de onda multimodal (cavidad) de 5.20 mm de ancho por 22.84 mm de largo. Dentro de la cavidad se modula el índice de refracción en un área específica con el fin de no acoplar la radiación a la guía de onda de salida, esto tiene como efecto generar múltiples autoimágenes asimétricas. Esta área específica le llamamos relleno y tiene 1.20 mm de ancho por 22.84 de largo.

Las ventajas de este dispositivo es que tiene una gran tolerancia de fabricación y es un dispositivo muy compacto. Sin mencionar que podemos variar tanto con las características de impresión como con los materiales que se le introduzcan en el relleno. Estas variaciones en el índice de refracción encontradas al caracterizar los materiales, se utilizaron para tomar la decisión de qué porcentaje de relleno le daríamos a la pieza y al relleno. El dispositivo se fabricó con una impresora 3D con las medidas antes mencionadas, este dispositivo mide 50 mm de largo en total y funciona introduciendo el relleno impreso con 95% de densidad de relleno dentro de la cavidad sin relleno.

Capítulo 5 Conclusiones

Gracias a los enormes avances tecnológicos que tenemos en las telecomunicaciones día a día, se están estudiando y fabricando diferentes dispositivos que trabajan con frecuencia de THz. Los dispositivos de interferencia multimodal (MMI) juegan un papel muy importante para el desarrollo de estas tecnologías. Ya que son dispositivos con gran tolerancia de fabricación y compactos, los vuelve candidatos para utilizar diferentes tecnologías de construcción, como las impresoras 3D. Por lo que en este trabajo se presentó el diseño de un interruptor óptico de interferencia multimodal de 1x1 que trabaja bajo frecuencias de THz. Este dispositivo está fabricado con tecnología de impresión 3D.

Para el funcionamiento de este dispositivo realizamos un estudio de tres materiales poliméricos que se usan en impresoras 3D al otorgarles diferentes características de impresión. Caracterizamos el índice de refracción y el coeficiente de absorción de algunas piezas de ABS, PLA y Bendlay, las cuales fueron fabricadas con una impresora 3D por deposición de material fundido. Se imprimieron 8 piezas, 5 con diferente densidad de relleno y 3 con diferente alta de capa. Gracias a este estudio pudimos ver como las piezas del BenLay tienen menor absorción y también que las piezas con densidad de relleno por encima del 60% varía menos el índice de refracción. Concluimos que dependiendo de la densidad de relleno que le demos a la pieza es que podemos controlar el índice de refracción a una cierta frecuencia.

La geometría óptima del dispositivo se encontró por medio de la simulación que propaga la radiación en la banda de THz dentro del interruptor. Se le dio un índice de refracción de 1.45 a todo el dispositivo y para el relleno se usó 1.565 a una frecuencia de 0.15 THz. Con estas simulaciones encontramos las medidas geométricas de nuestro dispositivo con el que nos generara múltiples autoimágenes en la guía de onda multimodal (cavidad) de forma simétrica. También las medidas para la mínima transmisión al cambiarle el índice de

refracción en el área modulada, generando las autoimágenes de forma asimétrica y no teniendo acoplamiento de la radiación a la guía de onda de salida.

Demostramos por medio de la simulación como el switch cumple con las características de un MMI. El switch acopla la radiación a la guía de onda de salida, cuando no aplicamos el cambio de índice de refracción en el relleno y al momento de aplicar el cambio ya no hay acoplamiento. Este dispositivo tiene como ventaja una gran tolerancia de fabricación y es un dispositivo compacto. Esto con el propósito de ampliar las posibilidades de en un futuro desarrollar filtros de THz para las telecomunicaciones. Así como tener posibilidades de integrar estos componentes en circuitos fotónicos complejos.

5.1 Trabajo futuro

La confirmación práctica de este trabajo, se realizará como trabajo futuro. Posterior a la presentación de la tesis, se llevará a cabo el análisis práctico del dispositivo. Para este análisis se usará un THz-TDS con configuración de transmisión para probar el dispositivo diseñado. Para guiar la radiación proponemos diseñar dispositivos acopladores de radiación entre el transmisor y la entrada del switch así como del receptor a la salida del switch. Estos son unos dispositivos que se adhieren al transmisor y al receptor de THz. Estos dispositivos funcionan como un embudo para introducir la radiación directo a la guía de onda monomodal de entrada. Estos acopladores también utilizarán tecnología de impresión 3D y ayudarán a mejorar la señal de entrada en el dispositivo MMI diseñado en este trabajo.

Referencias

- [1] Guenther, B. D. (1990). *Modern Optics (Teachers Guide)*. John Wiley & Sons Inc.
- [2] Naftaly, M. (2015). *Terahertz Metrology*. Macmillan Publishers.
- [3] Díaz de León, R., Flores, E., Lara, I., & Luna, E. (2017). SEGMENTO DE LOS THZ EN EL ESPECTROELECTROMAGNÉTICO Y SUS APLICACIONES. *Pistas Educativas* No. 124 , 19.
- [4] Babin, A., & Figotin, A. (2016). *Neoclassical Theory of Electromagnetic Interactions: A Single Theory for Macroscopic and Microscopic Scales*. Springer.
- [5] Auston, D., & Nuss, M. (1988). Electrooptical generation and detection of femtosecond electrical transients. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 24, no. 2, pp. 184-197. <https://doi.org/10.1109/3.114>
- [6] Hernandez, A. I. (2018). Terahertz quasi-optical devices fabricated by 3D printing. *Centro de investigaciones en óptica, A.C.*
- [7] Castro-Camus, E., & Alfaro, M. (2016). Photoconductive devices for terahertz pulsed spectroscopy: a review [Invited]. *Photonics Research*, vol. 4, no. 3, A36. <https://doi.org/10.1364/prj.4.000a36>.
- [8] May-Arrijoja, D. A., Bickel, N., & Likamwa, P. (2006). Robust 2 × 2 Multimode Interference Optical Switch. *Optical and Quantum Electronics*, vol. 38, no. 7, pp. 557-566. <https://doi.org/10.1007/s11082-005-4699-y>
- [9] Soldano, L., & Pennings, E. (1995). Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 615-627. <https://doi.org/10.1109/50.372474>
- [10] Elsaesser, T. (2019). *Concepts and Applications of Nonlinear Terahertz Spectroscopy*. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/2053-2571/aae931>
- [11] Auston, D., & Nuss, M. (1988). Electrooptical generation and detection of femtosecond electrical transients. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 24, no. 2, pp.184-197. <https://doi.org/10.1109/3.114>
- [12] Pawar, A. Y., Sonawane, D. D., Erande, K. B., & Derle, D. V. (2013). Terahertz technology and its applications. *Drug Invention Today*, vol. 5, no. 2, pp 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.dit.2013.03.009>
- [13] Saucedo, M. A. (2014). *Espectroscopia THz en el dominio del tiempo*. Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico/ Universidad Nacional Autónoma de México. <http://somi.ccadet.unam.mx/somi29/memoriassomi29/PDFS/Instrumentacion/42-YESOMI-62-42.pdf>
- [14] Martínez, M. (2021). DESIGN AND FABRICATION OF PHOTONIC COMPONENTS FOR TERAHERTZ FREQUENCIES. *Centro de investigaciones en óptica, AC*

- [15] Duvillaret, L., Garet, F., & Coutaz, J. L. (1999). Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy. *Applied Optics*, vol. 38, no. 2, pp. 409. <https://doi.org/10.1364/ao.38.000409>
- [16] Duvillaret, L., Garet, F., & Coutaz, J. L. (1996). A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 739-746. <https://doi.org/10.1109/2944.571775>
- [17] Medina, E. (2021). DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DISPOSITIVO FOTÓNICO INTEGRADO PARA APLICACIÓN EN COMUNICACIONES. Centro de Investigaciones en Óptica A.C.
- [18] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing (English Edition) (2.a ed.)*. Springer.
- [19] Wimpenny, D. I., Pandey, P. M., & Kumar, J. L. (2018). *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies (Softcover Reprint of the Original 1st 2017 ed.)*. Springer.
- [20] Busch, S. F., Weidenbach, M., Fey, M., Schäfer, F., Probst, T., & Koch, M. (2014). Optical Properties of 3D Printable Plastics in the THz Regime and their Application for 3D Printed THz Optics. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 35, no. 12, pp. 993-997. <https://doi.org/10.1007/s10762-014-0113-9>
- [21] May-Arrijoja, D. A., LiKamWa, P., Selvas-Aguilar, R. J., & Sánchez-Mondragón, J. J. (2004). Ultra-compact multimode interference InGaAsP multiple quantum well modulator. *Optical and Quantum Electronics*, 36(15), 1275-1281. <https://doi.org/10.1007/s11082-005-0317-2>
- [22] Félix Mtnez, O., García Dally, S., & Navarro Fernández, M. (2011). LA RESONANCIA: UN ÚNICO FENÓMENO, PERO CON MUCHAS MANIFESTACIONES. *REVISTA CUBANA DE FÍSICA*, Vol. 28, No. 1, pp.3, RCF-28-1E-2011-144. <http://www.revistacubanadefisica.org/RCFextradata/OldFiles/2011/Vol.28-No.1E/RCF-28-1E-2011-144.pdf>
- [23] Nagai, S., Morishima, G., Inayoshi, H., & Utaka, K. (2002). Multimode interference photonic switches (MIPS). *Journal of Lightwave Technology*, 20(4), 675-681. <https://doi.org/10.1109/50.996588>
- [24] Soldano, L., & Pennings, E. (1995). Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications. *Journal of Lightwave Technology*, 13(4), 615-627. <https://doi.org/10.1109/50.372474>
- [25] Pryor, R. W. (2009). *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. Jones & Bartlett Learning.