



DISEÑO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES ÓPTICOS PARA LA BANDA DE TERAHERTZ POR IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL



MAESTRÍA EN CIENCIAS (ÓPTICA)

Aesor: Dr. Enrique Castro Camus

Estudiante: Ing. Olivia Amargós Reyes

*Octubre de 2015
León, Guanajuato, México*

Resumen

En este trabajo se utilizó impresión 3D para la fabricación de componentes ópticos para la banda de Terahertz (THz). Primeramente se realizó la caracterización de diversos materiales con el objetivo de encontrar la mejor opción entre calidad de impresión y transparencia para la banda de THz. Se construyeron los diferentes tipos de componentes en un programa de diseño 3D y luego se fabricaron mediante la impresión 3D. Los componentes fabricados fueron: rejillas de difracción, lentes esféricas y lentes esféricas, utilizándose diferentes tipos de los materiales caracterizados.

Se utilizó además la técnica de Espectroscopía en el Dominio del Tiempo en THz con el objetivo de medir y determinar el desempeño de dichos componentes. Se modelaron los componentes de forma teórica y estos resultados se compararon con las mediciones realizadas. Se logró obtener resultados experimentales consistentes con las predicciones teóricas.

Agradecimientos

En primer lugar quiero extender un agradecimiento a mis padres por toda la confianza en mí a lo largo de los años y por toda la ayuda y consejos que siempre me brindaron, incluyendo a mi familia: mis tíos, mis primos y mis abuelas, que aunque una no se encuentra ya conmigo se que desde donde sea que esté siempre me cuida. También a mi asesor de tesis por la paciencia durante mi trabajo y el conocimiento proporcionado. A una persona que molesté demasiado cuando no entendía algo, Arturo, muchas gracias de corazón. También un agradecimiento muy especial a Camilo Valencia por su disposición en todo momento para ayudar y explicar cualquier duda. A mi novio Ulises y a mis amigos, especialmente a personas que me ayudaron muchísimo desde mi llegada a México, son mi otra familia, entre ellos: Nahiomi, Lorena y sus familiares. Y no porque estén lejos voy a olvidar a mis amigos de Cuba, que siempre han estado ahí para mí a pesar de la distancia: Jenisser, Oliannis, Yosvany y Rosy. Gracias por todo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. La banda de Terahertz	1
1.1.1. Aplicaciones de la radiación en Terahertz	3
1.2. Impresión tridimensional	5
1.2.1. Impresoras 3D	5
1.2.2. Aplicaciones de las Impresoras 3D	7
1.3. Descripción del trabajo	8
2. Espectroscopía en el dominio del tiempo en terahertz	9
2.1. Técnica THz-TDS	10
2.1.1. Generación de pulsos de THz	10
2.1.2. Emisión - Detección mediante PCA	11
2.1.3. Sistema THz-TDS	11
2.2. Caracterización de materiales mediante THz-TDS en modo de transmisión	13
3. Impresión 3D de componentes	17
3.1. Impresora 3D	17
3.2. Fabricación de filamentos	20
3.3. Materiales para impresión 3D	21
3.4. Proceso de impresión 3D	25
3.5. Problemas y soluciones en la impresión 3D	26
4. Rejillas de difracción	28
4.1. Difracción	28
4.2. Teoría de rejillas de difracción	30
4.2.1. Teoría del arreglo periódico de aberturas rectangulares	31
4.3. Diseño y fabricación de rejillas de difracción	33
4.4. Resultados	36
5. Lentes esféricas y esféricas	46
5.1. Teoría de lentes	46
5.2. Diseño y fabricación de lentes	48

5.3. Resultados	54
6. Conclusiones	66
6.1. Trabajo a futuro	67
. Bibliografía	75

Capítulo 1

Introducción

1.1. La banda de Terahertz

La radiación de Terahertz (THz) son ondas electromagnéticas con frecuencias desde 0.1 THz (100 GHz) hasta 10 THz, que se encuentran en la región del espectro electromagnético entre las microondas y el infrarrojo, como se muestra en la Figura 1.1. Esta región, que se encuentra ubicada entre el límite de la electrónica (bajas frecuencias) y el límite de la óptica (altas frecuencias), no era accesible hasta mediados de los 1980s debido a la falta de emisores y detectores eficientes para esta banda del espectro [1]. Por un lado los circuitos electrónicos son incapaces de oscilar a frecuencias tan altas y, por lo tanto, producir radiación en esta banda. Por otro lado, los sistemas cuánticos, con transiciones de energías tan bajas, se encuentran inmersos en ruido térmico, lo que impide que sean utilizados como detectores a menos que sean enfriados a temperaturas criogénicas (< 50 K). Por lo que se puede decir que la banda de THz es la separación entre los métodos convencionales de generación de radiación electrónicos y ópticos [2]. Sin embargo,

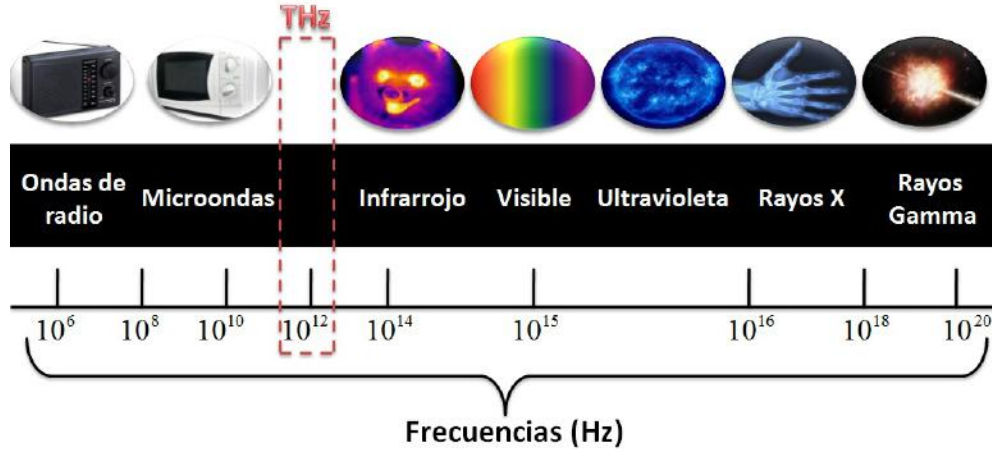


Figura 1.1: Espectro electromagnético con sus respectivas frecuencias, incluyendo la banda de terahertz.

avances tecnológicos en la óptica y la electrónica han resultado en el desarrollo de diferentes tipos de fuentes y detectores de THz, por ejemplo: con el descubrimiento de nuevos materiales semiconductores y con la capacidad de confinamiento de portadores en los niveles cuánticos [3].

La radiación de THz presenta varias características particulares muy interesantes, como son: alta absorción en agua, alta transparencia sobre la ropa, el plástico y el papel, y que no presenta efectos ionizantes en tejidos biológicos [4]. Desde hace ya algunos años han proliferado, en gran medida, las investigaciones y el desarrollo de tecnologías de THz y se están utilizando desde hace algunos años en múltiples aplicaciones como son: espectroscopía [5–7], seguridad [8, 9], imágenes [10, 11], comunicaciones [12, 13], biología [14, 15], medicina [11, 16, 17], entre otras muchas [18–20]. En la siguiente sección se hablará más detenidamente de las aplicaciones de las ondas de THz.

1.1.1. Aplicaciones de la radiación en Terahertz

Desde hace aproximadamente 20 años ha existido un auge en la utilización de las tecnologías de THz debido a sus múltiples beneficios, por ejemplo en:

- El estudio del diente humano, donde mediante imágenes 3D en THz se han logrado cuantificar la erosión y el grosor del esmalte en los dientes [21]. Incluso han identificado dientes dañados por caries. [22].
- El estudio de cáncer, diferenciando células cancerígenas de tejido sano [23], pues la presencia de células cancerígenas usualmente causan un aumento de suministro de sangre y un aumento del contenido de agua en el tejido afectado, sirviendo de contraste para la generación de imágenes en THz [24,25] y correspondiendo la región de mayor absorción de THz a la región del tumor en histología [26]. Además se ha obtenido mejor respuesta en THz usando nano-varillas de oro [27]. La radiación de THz también ha sido útil en la detección de cáncer de colon [28], páncreas [29], pulmón [30], etc.
- Imágenes de seguridad [9]. Jugando un papel muy importante en la identificación de objetos ilegales como drogas, armas o explosivos, debido a que estos objetos tienen un espectro muy particular en THz [31]. Pudiéndose aplicar en muchas esferas donde la seguridad es importante, por ejemplo en aeropuertos, como escaneadores de cuerpo, sin necesidad de registrar físicamente a la persona [32].
- Investigaciones para conocer el proceso de hidratación de las plantas [33], donde a través de la medición de la transmitancia de los tejidos

de las plantas es posible conocer el contenido de agua en las mismas [34], y con ello dar seguimiento a procesos fisiológicos de manera no destructiva.

- El estudio de determinados procesos físicos como por ejemplo: la dinámica de los portadores de carga dentro de semiconductores (que sucede en tiempos de femtosegundos a nanosegundos) [18–20, 35], las transiciones rotacionales en moléculas [36], ya que este tipo de radiación es sensible a los movimientos de algunas moléculas [37–39] y la formación y disociación de cuasipartículas como excitones, pares de Cooper y Magnones en materia condensada [40–42].
- Procesos industriales, donde se ha podido identificar deformaciones en estructuras fabricadas en serie de manera no destructiva [43]. Actualmente las tecnologías de THz son prometedoras en ramas como: papel, polímeros, alimentos, medicinas y cultivos [4]. Además en el control de la calidad en pieles, midiendo el contenido de humedad y el grosor simultáneamente [44].
- La conservación y restauración de patrimonio cultural, pues con imágenes en THz se pueden analizar los diferentes procesos de restauración que ha tenido una obra de arte a lo largo de los años, sin dañarla en ningún sentido, recaudando información sumamente valiosa para restauradores, por ejemplo: en pinturas determinando los grosores de las capas que presentan y objetos escondidos en algunas de esas capas [45–48].

1.2. Impresión tridimensional

Debido a la gran cantidad de aplicaciones que tienen las tecnologías de THz existe una demanda de dispositivos ópticos para trabajar en esta banda. Actualmente hay un buen número de componentes, relativamente comunes para el visible e infrarrojo que no están disponibles para THz, tales como: divisores de haz, lentes, guías de ondas, metamateriales, rejillas de difracción, entre otros. Por lo que muchos esfuerzos se han estado materializando para la fabricación de estos componentes y ello ha traído por consecuencia que exista una revolución en los procesos de fabricación. Los métodos tradicionales llamados “sustractivos”, que se basan en remover material no deseado, por ejemplo en un torno con una herramienta, para obtener el componente final [49], por ejemplo: el micromaquinado para crear guías de onda [50], la fabricación de lentes en un torno [51], los cortes de ranuras en un sustrato para hacer rejillas de difracción [52], ahora es suplantado por métodos llamados “aditivos” que consisten en construir el componente agregando material capa por capa [49]. En la vanguardia de estas innovaciones se encuentran las impresoras 3D, pues es un método rápido, con bajo costo, controlado por computadora [49] para la fabricación de objetos en general. Por lo que se ha abierto esta posibilidad para la fabricación de componentes ópticos por este método de fabricación.

1.2.1. Impresoras 3D

Las impresoras 3D son máquinas hechas para la fabricación de objetos volumétricos. Todo comenzó en 1984 cuando Charles Hull inventa el método de la Estereolitografía (SLA) y funda la empresa 3D Systems, compañía que

fue la primera en poner en venta una impresora 3D [53, 54]. A partir de ese momento han ido surgiendo diferentes métodos de impresión 3D y diferentes modelos de impresoras [55].

Entre los principales métodos de impresión 3D se puede mencionar los siguientes:

- Estereolitografía: Una base se va sumergiendo (o emergiendo) en un baño de resina fotocurable capa por capa y un láser de luz ultravioleta va solidificando la resina líquida [53].
- Deposición de Material Fundido (FDM): Se comienza por la capa inferior depositando el material fundido que va saliendo de un extrusor. El material se va depositando capa por capa verticalmente con la forma correspondiente de la capa en cuestión. Una vez que se va colocando el material, este se enfría y se solidifica [53].
- Sinterización Selectiva por Láser: Es muy similar al método SLA, pero permite utilizar más materiales. Utiliza un material en polvo a diferencia del líquido fotocurable del SLA. Entre los materiales que puede usar están: poliestireno, materiales cerámicos, cristal, nylon y materiales metálicos. El láser impacta en el polvo, funde el material y se solidifica (sinterizado) [53].

Los métodos mencionados anteriormente son los más usados pero no los únicos que existen, también se puede mencionar: Fotopolimerización Polyjet, Extrusión Syringe, Fusión Láser Selectiva, Fusión de haz de electrones y Fabricación de objetos de laminado.

1.2.2. Aplicaciones de las Impresoras 3D

La impresión 3D desde su aparición ha sido usada en diferentes ramas de la ciencias, principalmente en la medicina y la biología. A continuación se mencionan algunas aplicaciones de la impresión 3D:

- Creación de modelos de corazones de pacientes con defectos congénitos específicos para su inspección clínica y evaluación con el objetivo de obtener una ayuda significativa en la planificación previa a una cirugía [56].
- Fabricación bidimensional y tridimensional de chips de microfluidos con una impresora 3D de azúcar. Los chips de microfluidos son herramientas muy útiles para el cultivo de células [57].
- Creación de estructuras complejas de hidroxiapatita para la ingeniería de tejido óseo, esto permite generar implantes personalizados para pacientes, basados en los datos médicos [58].
- Utilización de materiales de madera (aserrín, virutas de madera) para la fabricación de objetos en la construcción [59].
- Fabricación de circuitos eléctricos utilizando aleación a base de plomo [60].
- Fabricación rápida de objetos metálicos conductores por impresión 3D en fase líquida [61].

1.3. Descripción del trabajo

En este trabajo se diseñan componentes ópticos para la banda de THz, específicamente rejillas de difracción y lentes esféricas y esféricas. Estos componentes se fabrican por medio de impresión 3D y se realizan las mediciones pertinentes, para comparar los modelos teóricos con los resultados experimentales, con la técnica Espectroscopía en el Dominio del Tiempo en THz (THz-TDS). En el capítulo 2 se realiza una descripción detallada de la técnica THz-TDS, y se plantea el arreglo usado en el modo de transmisión para medir los componentes ópticos impresos. También se especifican los parámetros técnicos del espectrómetro usado en el laboratorio. En el capítulo 3 se explica cómo funciona el proceso de impresión, los diferentes materiales para imprimir caracterizados, los problemas que se presentaron con la impresora y cómo se solucionaron. En el capítulo 4 se da una breve descripción sobre las rejillas de difracción y se exponen los resultados obtenidos en la impresión de las mismas. En el capítulo 5, se habla de las lentes esféricas y esféricas y de los resultados logrados con la impresión de ambas. El capítulo 6 se reserva para las conclusiones y las recomendaciones del trabajo para su futuro desarrollo.

Capítulo 2

Espectroscopía en el dominio del tiempo en terahertz

La espectroscopía en el dominio del tiempo en terahertz (THz-TDS) es una de las áreas más exitosas en las tecnologías de THz. Es una técnica poderosa para la investigación de procesos físicos [18–20, 35, 36, 39–41], químicos [37, 38] y biológicos [33, 34, 62]. La THz-TDS presenta un notable éxito por su tamaño moderado, ancho de banda, y su alta relación señal-ruido con respecto a los demás sistemas de espectroscopía en THz [4]. Una gran ventaja de realizar mediciones con THz-TDS sobre otras técnicas es que permite acceso en una sola medición a la banda completa de THz manteniendo la información de amplitud y fase simultáneamente [3].

En este capítulo se explican brevemente los métodos de emisión y detección de pulsos de THz. Se expone, además, el sistema THz-TDS usado para la realización de las mediciones que se presentarán en los capítulos subsecuentes, al igual que el método de análisis de datos para la obtención del índice de refracción complejo de materiales a partir de las mediciones de THz-TDS.

2.1. Técnica THz-TDS

2.1.1. Generación de pulsos de THz

Existen dos tipos de efectos que contribuyen a la generación de pulsos de THz: los efectos resonantes (absorción de fotones para crear portadores de carga) y los no resonantes (generación de diferencias de frecuencias) [3].

Dentro de los efectos resonantes tenemos la emisión de pulsos de THz mediante antenas fotoconductoras (PCA). A groso modo este método se basa en que un pulso óptico ultracorto incide en un semiconductor causando un rápido cambio transitorio en la conductividad del material. En dichos dispositivos se aplica un campo eléctrico externo que, junto con el cambio repentino de conductividad, genera pulsos ultracortos de THz (de algunas decenas de picosegundos aproximadamente). Los pulsos generados pueden ser detectados igualmente mediante la fotoconducción. En la siguiente sección se explicará de manera más detallada este mecanismo pues es en el que se basa el espectrómetro de THz utilizado para realizar las mediciones de los componentes ópticos [3].

Por otra parte se debe mencionar dentro de las interacciones no resonantes, dos técnicas de óptica no lineal para la emisión y detección de pulsos de THz, estas son la rectificación óptica y el efecto lineal electroóptico (más conocido como efecto Pockels) respectivamente. Estas dos técnicas ocurren sólo en cristales que no son centrosimétricos [63] (no tienen simetría de inversión [64]) y requieren que el cristal sea transparente en THz y en la longitud de onda de bombeo. Para la generación de pulsos de THz se pueden utilizar distintos cristales electroópticos, como GaAs, GaP, InP, GaSe, ZnTe [65].

2.1.2. Emisión - Detección mediante PCA

Una antena fotoconductiva (PCA) está compuesta por dos electrodos metálicos con un gap muy pequeño entre ellos (normalmente de pocas micras) depositados sobre la superficie de un semiconductor [66]. Una posible estructura de la PCA se muestra en la Figura 2.1.

Cuando un pulso óptico ultracorto se hace incidir en el gap de la PCA se generan pares electrón - hueco en ese gap y si existe una diferencia de potencial entre los electrodos, estos pares son acelerados, obteniendo un transiente de cargas aceleradas generándose un pulso electromagnético con frecuencias en la región de THz [67–69]. Se han llevado a cabo varias investigaciones para encontrar materiales adecuados para la fabricación de PCA, y el material que más se utiliza actualmete es el GaAs crecido a baja temperatura [70].

Una PCA puede ser usada también para la detección de THz [71]. El pulso de THz es enfocado en la PCA por el lado del sustrato del semiconductor, el pulso de femtosegundos es enfocado entre los electrodos generando similarmente pares electrón - hueco, la aceleración de cargas en este caso sucede debido al campo eléctrico de THz. El transiente de THz es entonces medido en el dominio del tiempo a través de un retraso variable entre el pulso de THz y el pulso de femtosegundos que excita al detector [72].

2.1.3. Sistema THz-TDS

Los sistemas THz-TDS se basan en láseres ultrarápidos, que generan pulsos de una duración aproximada de entre 10 y 100 femtosegundos [70]. El sistema THz-TDS usado en esta investigación fue el modelo Tera K15 de Menlo Systems GmbH. Este espectrómetro está compuesto por un láser de

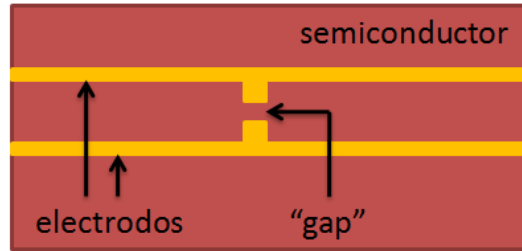


Figura 2.1: Antena fotoconductor (PCA) para la generación o detección de radiación de THz. Dos electrodos son ubicados en la superficie de un semiconductor uno frente al otro, generando un gap entre ellos.

Erbio:Fibra centrado en 1550 nm que emite pulsos con duración de 90 fs con una tasa de repetición de 100 MHz y una potencia promedio de 120 mW. Además cuenta con dos antenas fotoconductoras para emitir y detectar la radiación en THz y 4 lentes que se encargan de colimar, enfocar, colectar y reenfocar la radiación, ver Figura 2.2. Como se puede apreciar el láser es dividido en dos partes (salidas de fibra óptica, A y B) para emitir y detectar la radiación. El haz de generación es el que sale por A y va hacia la PCA del emisor. La otra parte del haz sale por B va dirigido hacia la Unidad de Retardo Óptico (ODU). El ODU está conectado al detector fotoconductor. El proceso de generación de THz es realizado como se explicó en la sección anterior, mediante antenas fotoconductoras.

Cuando se genera la radiación de THz por el emisor, ésta es llevada hacia el detector a través de 4 lentes. Primeramente la radiación diverge hacia la lente 1 que colima el haz, la lente 2 se encarga de enfocararlo donde generalmente se ubica la muestra a medir, la lente 3 colima nuevamente el haz divergente y la 4 finalmente enfoca el haz en el detector.

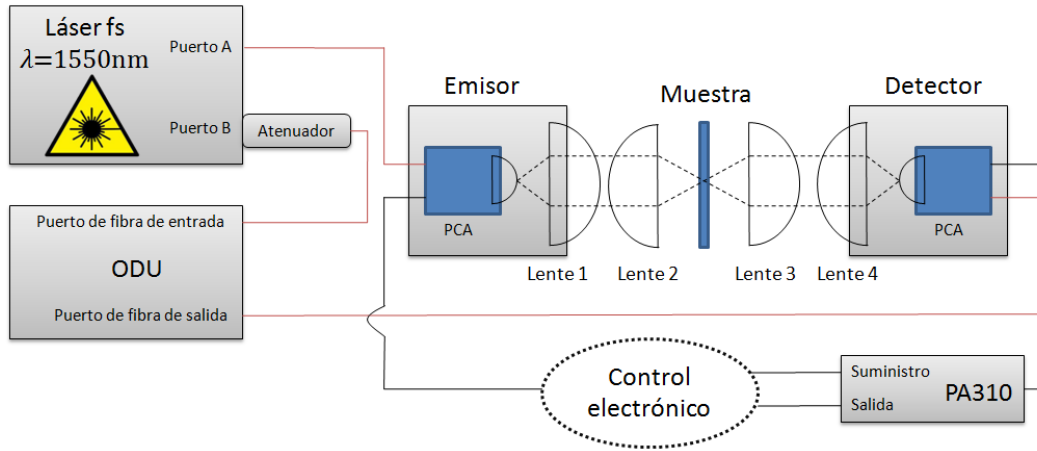


Figura 2.2: Configuración del sistema THz-TDS utilizado, en la forma de Transmisión.

2.2. Caracterización de materiales mediante THz-TDS en modo de transmisión

La espectroscopía de THz en el dominio del tiempo mide directamente el campo eléctrico en función del tiempo del pulso en vez de la intensidad. Este campo eléctrico resuelto en el tiempo contiene la información de amplitud y fase completa que puede ser extraída de las mediciones de THz directamente [3]. Con la amplitud y la fase del pulso obtenida se puede encontrar el índice de refracción complejo de materiales de manera directa sin recurrir a las ecuaciones de Kramer-Kronig.

Para obtener el índice de refracción es necesario primero medir el campo eléctrico como función del tiempo en ausencia de la muestra, lo denominaremos campo de referencia $E_{\text{ref}}(t)$. Luego se procede a colocar la muestra que se quiere medir y se obtiene el campo eléctrico transmitido a través de la misma, lo denominaremos campo de la muestra $E_{\text{samp}}(t)$. Los campos eléctricos de la muestra y de la referencia tendrán una diferencia de amplitud y estarán

desplazados en el tiempo uno con respecto al otro debido al índice de refracción de la muestra. Los campos se llevan al dominio de frecuencias a través de la aplicación de la transformada de Fourier, siendo estos denotados como: $\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega) = E_{\text{ref}}(\omega)e^{i\phi_{\text{ref}}(\omega)}$ y $\tilde{E}_{\text{samp}}(\omega) = E_{\text{samp}}(\omega)e^{i\phi_{\text{samp}}(\omega)}$. La transmitancia compleja a través de la muestra está dada por

$$\tilde{T}(\omega) = \frac{\tilde{E}_{\text{samp}}(\omega)}{\tilde{E}_{\text{ref}}(\omega)} = \frac{E_{\text{samp}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} e^{i(\phi_{\text{samp}}(\omega) - \phi_{\text{ref}}(\omega))}. \quad (2.1)$$

Podemos modelar la transmitancia en términos del índice de refracción complejo $\tilde{n} = n + i\kappa$ y de los coeficientes de transmisión de Fresnel: $t_{\text{as}} = 2/(\tilde{n} + 1)$ y $t_{\text{sa}} = 2\tilde{n}/(\tilde{n} + 1)$, donde t_{as} es el coeficiente de transmisión aire-muestra y t_{sa} el coeficiente de transmisión muestra-aire. Quedando la transmisión total como la suma de todas las ondas transmitidas

$$\tilde{T}(\omega) = t_{\text{as}}t_{\text{sa}}e^{(\tilde{n}(\omega)-1)\frac{i\omega d}{c}}\Gamma(\omega), \quad (2.2)$$

donde $\Gamma(\omega)$ es el término de Fabry-Perot que aparece como resultado de las reflexiones múltiples dentro de la muestra y d es el espesor de la muestra. El término de Fabry Perot está dado por:

$$\Gamma(\omega) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[-\frac{(\tilde{n}(\omega) - 1)^2}{(\tilde{n}(\omega) + 1)^2} e^{i(2\tilde{n}(\omega)\omega d)/c} \right]^k \quad (2.3)$$

Este término de Fabry Perot se aproxima a 1 para un tamaño de ventana temporal en la que sólo se muestra el pulso principal y por lo tanto se puede eliminar de la ecuación. En el caso de las mediciones presentadas en esta tesis se puede eliminar este término. Por lo que si combinamos las ecuaciones 2.1 y 2.2 podemos extraer el índice de refracción de forma analítica

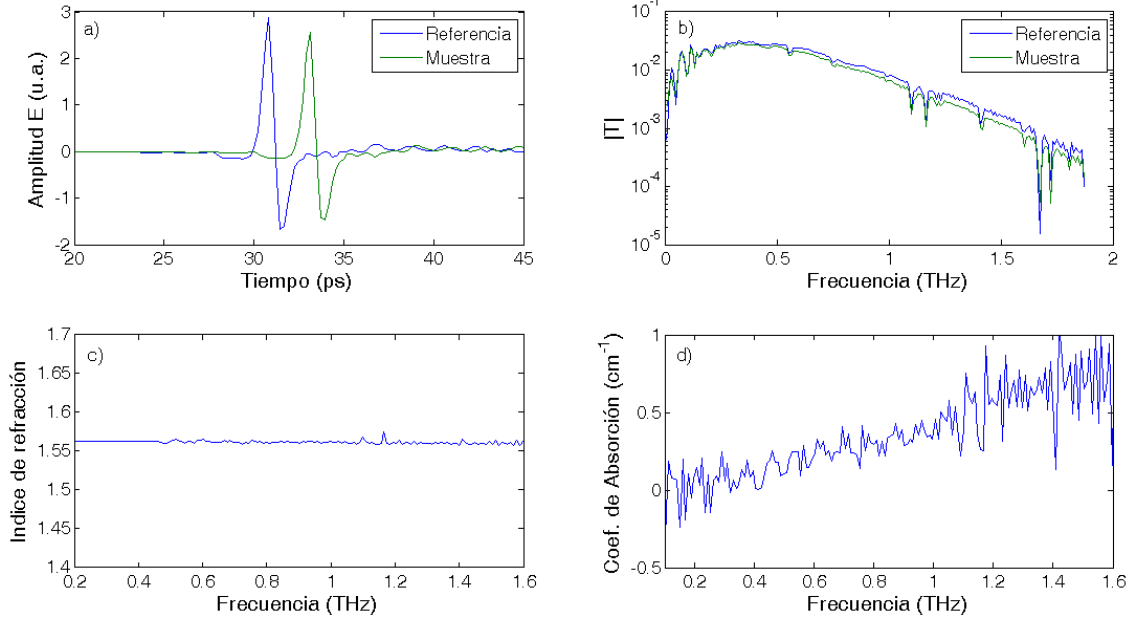


Figura 2.3: a) Amplitud del campo eléctrico de la referencia y la muestra, b) Transmitancia a través de la referencia y la muestra, c) Índice de refracción de la muestra, d) Coeficiente de absorción en la muestra.

$$n(\omega) = 1 + c \frac{(\phi_{\text{samp}}(\omega) - \phi_{\text{ref}}(\omega))}{\omega d}, \quad (2.4)$$

$$k(\omega) = -\frac{c}{2\omega d} \ln \left[\frac{1}{t_{\text{as}}(\omega)t_{\text{sa}}(\omega)} \frac{E_{\text{samp}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} \right], \quad (2.5)$$

que es una aproximación válida para muestras gruesas. Para muestras delgadas se debe tomar en cuenta el término Γ [73]. Nótese que ϕ_{samp} , ϕ_{ref} , E_{samp} y E_{ref} se obtienen directamente del experimento, por lo que con estas ecuaciones es posible obtener n y κ a partir de las mediciones. Con κ es posible determinar el coeficiente de absorción (α) de la muestra de la forma $\alpha = (\omega/c)\kappa$.

Habiendo explicado el proceso de extracción de índice de refracción complejo se muestra gráficamente, a manera de ejemplo, los pulsos E_{samp} y E_{ref} en

la Figura 2.3a, la amplitud del espectro de transmitancia en la Figura 2.3b, la parte real del índice de refracción en la Figura 2.3c y el coeficiente de absorción Figura 2.3d obtenidos al medir una muestra de Poliestireno (PS).

Capítulo 3

Impresión 3D de componentes

En este capítulo se presenta la descripción de la impresora 3D y el método de preparación de filamentos utilizadas en esta investigación, el proceso realizado para la fabricación de componentes ópticos y los diferentes materiales probados para la impresión. Además los diferentes problemas que se presentaron durante el trabajo con la impresora y cómo se solucionaron.

3.1. Impresora 3D

La impresora 3D utilizada en esta investigación, para la fabricación de dispositivos ópticos, fue la Prusa I3, ver Figura 3.1. La Prusa i3 incorpora mejoras con respecto a los dos diseños anteriores Prusa y a otros diseños populares [74]. Esta impresora contiene un conjunto de motores que permiten que realice movimientos en tres ejes: X, Y y Z (señalizados en la Figura 3.1). La superficie en donde se va creando el objeto a imprimir se mueve con orientación en el eje Y (hacia adelante y atrás). Mientras que el sistema de extrusión de filamentos se encuentra perpendicular a la base y se mueve en

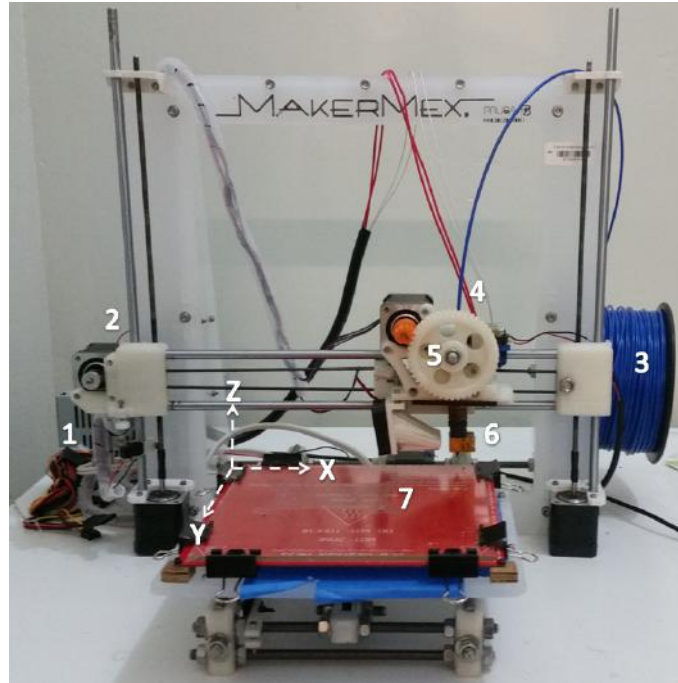


Figura 3.1: Impresora Prusa I3. X, Y y Z son los sentidos en los que se mueven los motores de la impresora. Cuenta con una fuente de alimentación (1), la tarjeta Arduino (2), el carrete de material (3) que es introducido en la cavidad (4), deslizado por los engranes (5), llevado hasta el extrusor (6) y finalmente depositado en la cama caliente (7).

el eje X (hacia los lados) y Z(hacia arriba y abajo).

Para un mejor entendimiento del funcionamiento de la impresora se numeró la Figura 3.1. La impresora cuenta con una fuente de alimentación (1) la cual es conectada a la corriente alterna. A esta fuente se encuentra conectada la tarjeta Arduino (2), que está ubicada en el lateral izquierdo. Esta tarjeta electrónica es una plataforma de hardware libre que contiene una placa base con un microcontrolador y un entorno de desarrollo (IDE) para enviar las órdenes a la impresora. El Arduino contiene un slot de micro-SD por el cual se pueden enviar las órdenes a la impresora, evitando con esto que, si se está imprimiendo algún objeto que se tarde, no se interrumpa la impresión por ningún motivo, además nos libera de la necesidad de tener conectada

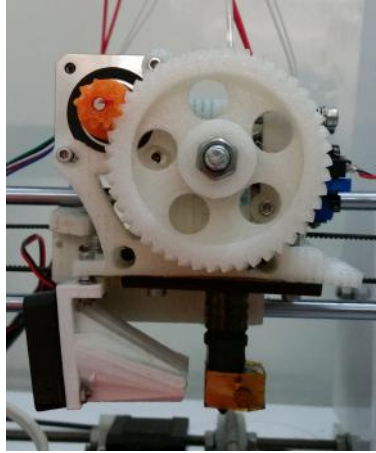


Figura 3.2: Extrusor con el que se deposita el material en la base. Se calienta con el objetivo de fundir el material utilizado.

una computadora a la impresora. En el lateral derecho se encuentra el carrete del material a utilizar en la impresión (3). Ese material es introducido en la cavidad donde se encuentra el sistema de extrusión (4), para ser deslizado a través de dos engranes rotatorios (5) hacia el extrusor (6), ver Figura 3.2, donde es fundido y finalmente extruído por el orificio de la boquilla, siendo depositado por capas en la superficie plana (7). Esta superficie contiene una cama caliente con un vidrio encima. La cama caliente es una base con una resistencia que hará que se pueda controlar su temperatura, con el objetivo de mejorar la calidad de la impresión. El vidrio es colocado con el objetivo de que el calor se distribuya uniformemente y para que no se dañe la cama caliente.

Algunas características específicas de ésta impresora son su:

- Volumen de impresión: 220 x 220 x 180 mm.
- Velocidad máxima: 100 mm/s.
- Resolución: hasta 60 micras.

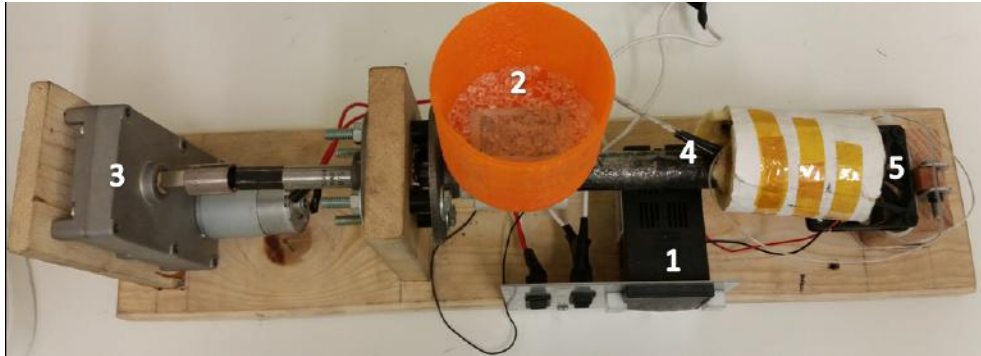


Figura 3.3: Fábrica de filamentos. Es el artefacto construido para fabricar los filamentos de diferentes materiales. Cuenta con un control (1) para regular temperatura, el orificio donde se vierte el material (2), un motor (3) que mueve el tornillo sin fin (4) emujando el material que a la vez se va fundiendo hasta el orificio de salida (5) de 3 mm de espesor.

- Técnica de impresión: Deposición de Material Fundido (FDM), la cual fue explicada en el capítulo 1.

3.2. Fabricación de filamentos

La impresora 3D utilizada imprime típicamente con polímeros, algunos de ellos comunes para la impresión 3D, otros no tanto, por lo que no se pueden comprar tan fácilmente (en la siguiente sección se debatirá sobre los materiales más detalladamente). Por esta razón fue necesario realizar el ensamble de una fábrica de filamentos (ver Figura 3.3) con el fin de producir los filamentos de los polímeros que deseemos utilizar en la impresión.

La fábrica de filamentos tiene un control (1) para regular la temperatura y para el encendido/apagado del equipo. Una vez que es encendido y regulado a la temperatura que requiere el material para fundirse, se procede a verter el material en la abertura correspondiente (2). El motor (3) realiza la función de mover un tornillo sin fin que se encuentra dentro del tubo (4) llevando el

material hacia donde se encuentra la resistencia para que se funda y salga en forma líquida por un agujero de 3 mm de diámetro (5), a la salida del material se encuentra un ventilador con el objetivo de solidificar el mismo y se mantenga en forma de filamento.

3.3. Materiales para impresión 3D

Antes de utilizar los polímeros que se necesitan para la fabricación de los dispositivos ópticos, es necesario conocer los diferentes materiales que normalmente se utilizan en impresión 3D, estos son:

- **Ácido Poliláctico (PLA):** Es el más utilizado pues no se necesita la cama caliente en la impresora y es muy fácil de imprimir. Se puede usar sin miedo a intoxicación en cuartos cerrados o con poca entrada de aire y además es biodegradable. No es un material flexible. La textura de los objetos impresos con este material presenta algunas rugosidades. [75].
- **Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS):** Es muy usado también. Es más resistente y necesita mayor temperatura de fusión que el PLA. No es un material biodegradable. La utilización de una cama caliente mejora en gran medida la impresión con este material, evitando el “warping” (contracción al enfriarse del material extruido). Es soluble a la acetona. Desprende gases cuando alcanza su punto de fusión que en altas cantidades pueden ser nocivos para la salud [75].
- **Nylon:** Presenta problemas para adherirse a la base de la impresora, requiere una superficie rugosa para imprimir. Es el material común más complicado para la impresión 3D. Tiene gran resistencia, flexibilidad

y transparencia. Tiene alto grado de “warping”. Se debe guardar en lugares secos para evitar la humedad. No produce químicos dañinos [75].

- Bendlay: Presenta alta adhesión entre las capas. Tiene grado alimenticio y no presenta casi nada de “warping” debido a su flexibilidad. Absorbe poca humedad, 30 % de la del ABS. No necesita de cama caliente [75].

Estos materiales se pueden adquirir en forma de filamentos de 3 mm de espesor, que es uno de los formatos estándar para alimentar impresoras 3D, como la usada en este estudio. Además de estos materiales se comercializan también otros tipos, por ejemplo: Policarbonato (PC), Aleación de ABS y PC, Fibra de Carbono, PLA Magnético o Conductivo, entre otros muchos.

Para la fabricación de componentes ópticos para THz fue necesario buscar polímeros que fueran transparentes en esta región espectral. Para ello se realizaron un conjunto de mediciones donde se determinó el índice de refracción y el coeficiente de absorción de algunos materiales, ver Figura 3.4. El método utilizado se explicó en el capítulo anterior. Como se puede apreciar los materiales comúnmente usados para impresión 3D (ABS y PLA) presentan alta absorción para esta banda del espectro. Sin embargo el Polietileno (PE) y Poliestireno (PS) son transparentes en THz, por lo que se fabricaron filamentos de estos tipos de materiales con la fábrica de filamentos. Cuando se procedió a utilizarlos en la impresión, el PE, que es un filamento flexible, resultó difícil de imprimir y no se lograron buenos resultados con él, pues se desbordaba el material por fuera del diseño del objeto, ver Figura 3.5 (Izquierda). Sin embargo con el PS, a pesar de que era un filamento menos flexible que el de PE, permitió obtener impresiones que correspondían bien con el diseño realizado.

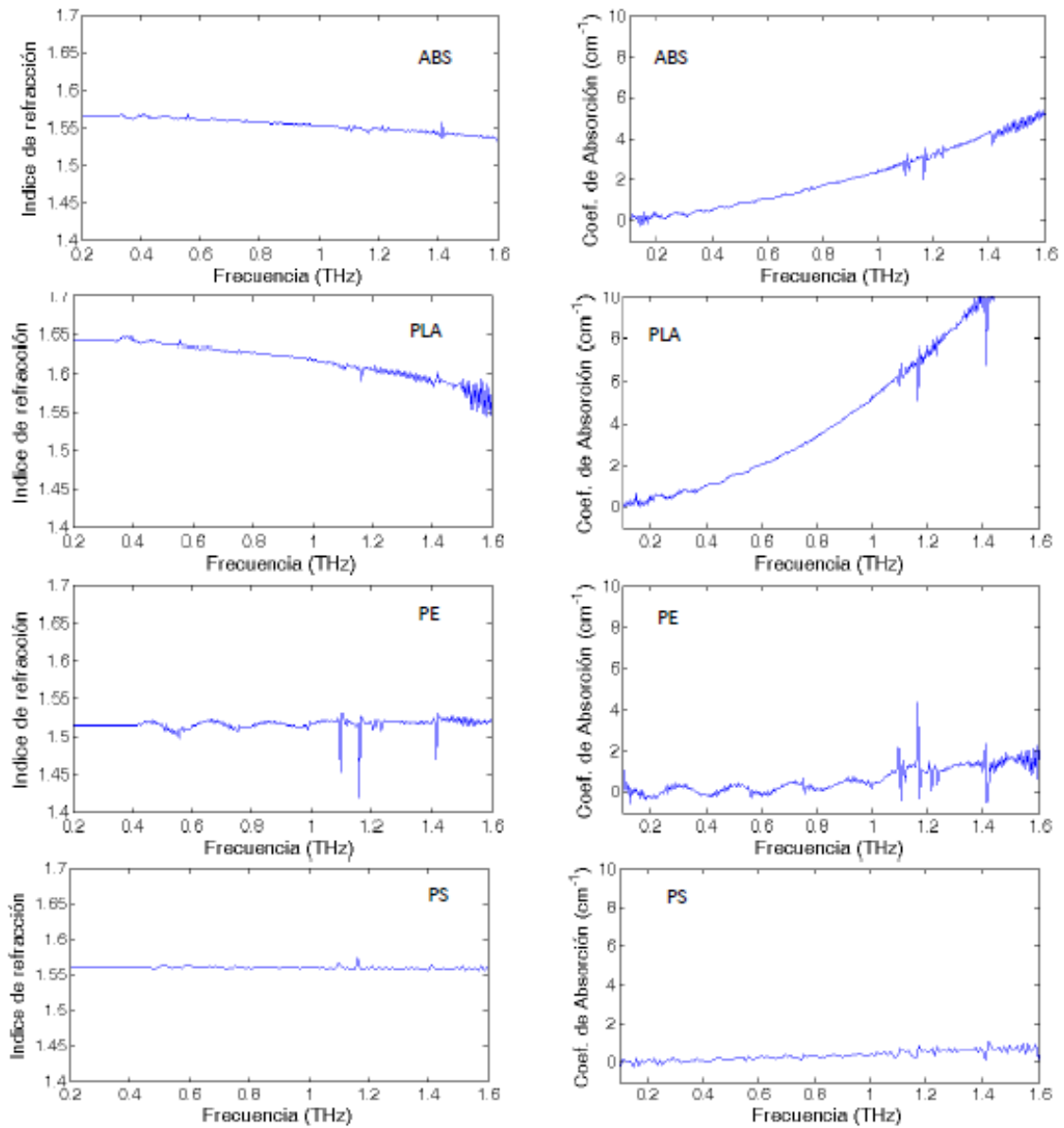


Figura 3.4: Índice de refracción real n (izquierda) y coeficiente de absorción α (derecha) medidos de los materiales usados. De arriba a abajo: ABS, PLA, PE y PS.

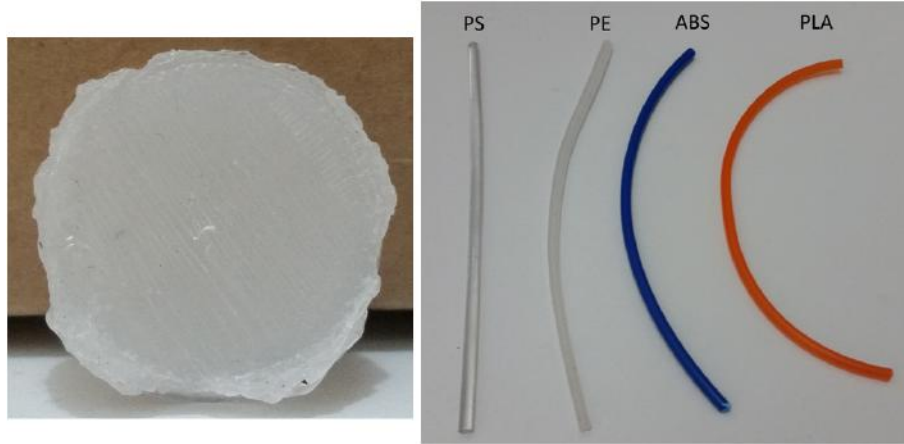


Figura 3.5: Izquierda: Muestra impresa con PE. Derecha: Filamentos que se utilizaron en la impresión de componentes ópticos, de izquierda a derecha: Poliestireno (PS), Polietileno (PE), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y Ácido Poliláctico (PLA).

Material	Temp. imp.(°C)	n (500GHz)	Coef. abs.(500GHz)
ABS	250	1.57	5
PLA	220	1.89	11
Nylon	255	1.72	9
Bendlay	250	1.532	1.8
PS	240	1.561	0.5
HDPE	230	1.532	0
PP	230	1.495	0

Cuadro 3.1: Parámetros de los materiales a 500 Ghz [76].

Se pueden observar ejemplos de filamentos en la Figura 3.5 (Derecha).

En un artículo reciente se presenta una comparación entre estos materiales de igual manera, obteniendo como conclusión que el PS es el material más adecuado pues presenta el mejor compromiso entre calidad de impresión y transparencia en THz, como se muestra en el cuadro 3.1 [76], pues los materiales más transparentes en THz, Polietileno de Alta Densidad y el PoliPropileno (HDPE y PP), son difíciles de imprimir.

3.4. Proceso de impresión 3D

El primer paso para la impresión 3D es la creación digital del objeto a imprimir en un programa de Diseño Asistido por Computadoras (CAD) y su exportación a un formato de archivo que sea legible por los programas de impresión. El formato utilizado en este caso fue el STL. Este tipo de formato define la geometría de un objeto 3D a través de una estructura formada por triángulos [55], excluyendo información como el color y las texturas del objeto.

Posteriormente el fichero STL se pasa a un programa de Manufactura Asistida por Computadora (CAM) con el objetivo de generar un fichero de Código G (GCODE) que contiene instrucciones detalladas al nivel de máquina [55], con el objetivo de decirle a la impresora qué hacer y cómo hacerlo. El fichero GCODE generado para impresión 3D contiene información como trayectorias que debe seguir la impresora en coordenadas X,Y y Z, cantidad de extrusión de filamento por movimiento, temperatura del extrusor o la cama de impresión, entre otras más.

Los programas libres utilizados para la conversión de STL a GCODE fueron el Cura y el Slic3r. Después de tener el archivo de código G, éste se tiene que ejecutar a través de un intérprete de código G. Esto lee cada línea del archivo y envía las señales electrónicas a los motores de la impresora. Para ello es necesario instalar un software que controle físicamente al hardware (firmware). Como la impresora utiliza Arduino, es necesario, para compilar y cargar el firmware, que se utilice el IDE de Arduino. Después de que el microcontrolador tiene el firmware cargado, está listo para aceptar códigos G a través del puerto COM. Este puerto aparece al conectar el Arduino a

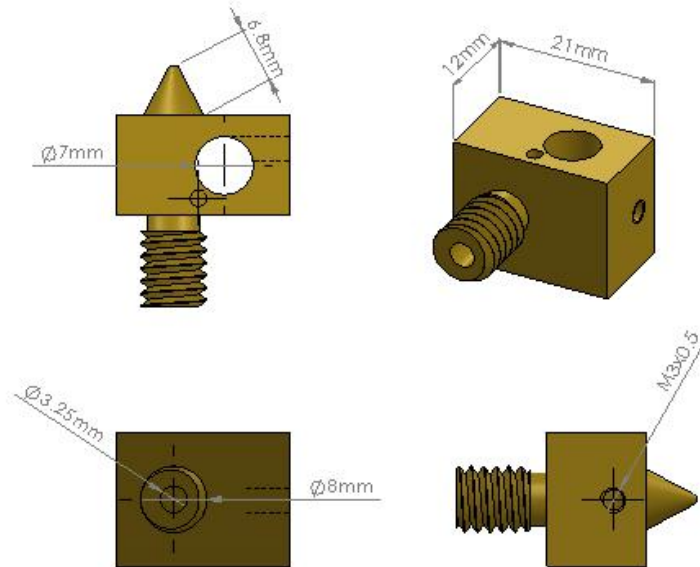


Figura 3.6: Diseño 3D de las boquillas fabricadas.

la PC a través de USB. Una vez realizado esos pasos es posible comenzar a imprimir modelos. Otra vía es generar el fichero GCODE y guardarse en una memoria micro-SD, lo que hará que la impresora se auto-ejecute si el fichero lleva por nombre auto0.

3.5. Problemas y soluciones en la impresión 3D

En esta investigación se presentaron varios problemas cuando se imprimieron los dispositivos ópticos, entre estos:

- La resolución de la impresora: A partir del diseño de la boquilla del extrusor (ver Figura 3.6) se fabricaron boquillas de dos materiales distintos, Aluminio y Latón, en el Taller Mecánico (ver Figura 3.7 Izquier-

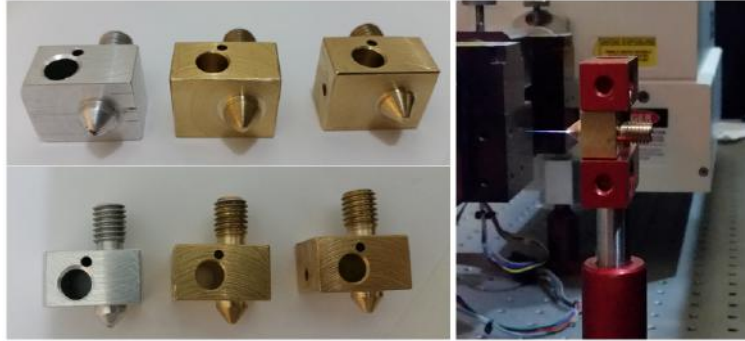


Figura 3.7: A la izquierda: Boquillas que se fabricaron. A la derecha: Micro-maquinado láser para abrirle el orificio a las boquillas.

da). Se abrió un orificio aproximadamente de 100 micras en la boquilla en el Laboratorio de Óptica Ultrarrápida utilizando el micromaquinado láser para ello (ver Figura 3.7 Derecha), el cual serviría para obtener mejor resolución en los componentes impresos. Pero con tal tamaño de diámetro de la boquilla los materiales que se utilizaron no lograban salir correctamente por ese orificio y se tapaban las boquillas periódicamente. Para destapar las boquillas se usó acetona, sumergiendo la boquilla en la acetona y poniéndola en un baño ultrasónico, pero este problema era tan persistente que se decidió usar la resolución estándar de la impresora ($400 \mu\text{m}$).

- Los componentes ópticos que se imprimían se despegaban del vidrio que está ubicado encima de la cama caliente. Para lograr que los objetos impresos se adhirieran mejor al vidrio se colocó fijador de cabello sobre el mismo y se elevó la temperatura de la cama caliente. Esto funcionaba debido a que el fijador creaba una capa pegajosa sobre el vidrio logrando que el material no se despegara durante la impresión.

Capítulo 4

Rejillas de difracción

En este capítulo se presenta el diseño, fabricación y caracterización de rejillas de difracción. Primeramente se hace un breve repaso de la teoría detrás de estos elementos ópticos y después se presentan los resultados.

4.1. Difracción

Hasta el siglo XVII se pensaba que la luz emitida por diferentes fuentes estaba compuesta de partículas que se propagaban en línea recta. Sin embargo, a mediados de ese mismo siglo, Christian Huygens (1629-1695) comenzó a abrir el paso a una nueva teoría, pues al analizar el frente de onda que es obstruido por algún objeto encontró evidencia de que la luz se desvía, por lo que sostenía que la luz era un fenómeno ondulatorio. Huygens planteó que todos los puntos de un frente de onda pueden ser considerados fuentes que producen ondas secundarias (ver Figura 4.1), generando el efecto de difracción. Por lo que se puede decir que el efecto de difracción favoreció a la evolución de la teoría que explica la luz como un fenómeno ondulatorio [77].

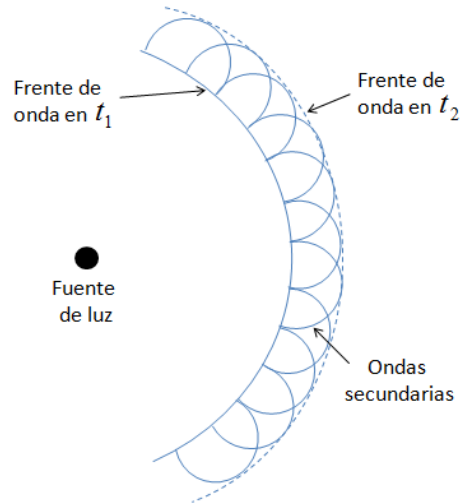


Figura 4.1: Principio de Huygens.

Para hacer una explicación un poco más detallada, se puede decir que la difracción es un fenómeno típico de las ondas que ocurre cuando una parte del frente de onda es desviado por causa de la obstrucción de un objeto situado en su camino, causando una alteración en la amplitud o la fase de esa parte del frente de onda afectado. Se le llama patrón de difracción al perfil de intensidad causado por la interferencia de las diferentes ondas que se propagan luego de pasar por el objeto, obteniéndose un conjunto de franjas brillantes y oscuras que rodean a la sombra de dicho objeto. El efecto de difracción ocurre en todo tipo de ondas, en las electromagnéticas, por ejemplo: en las ondas de radio o las de luz visible, o en las ondas de sonido y de materia [78].

Los fenómenos de difracción, por razones históricas, se clasifican en:

- Difracción de Fresnel (o de campo cercano): Cuando la distancia entre la abertura que genera la difracción y el plano de observación es mucho mayor que la longitud de onda, pero puede ser comparada con el tamaño de la abertura [79].

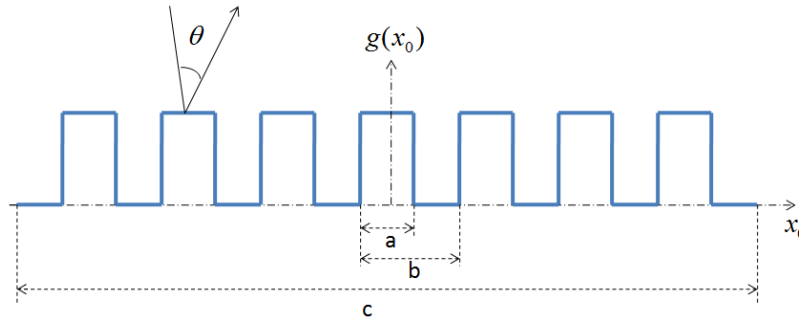


Figura 4.2: Rejilla de aberturas periódicas.

- Difracción de Fraunhofer (o de campo lejano): Cuando la pantalla de observación se halla a una distancia “infinita” de la abertura que genera la difracción, pero aún así se puede observar el patrón [79].

4.2. Teoría de rejillas de difracción

Entre los objetos que se pueden utilizar para observar patrones de difracción están las rejillas de difracción de una a múltiples aberturas y existen aberturas circulares, rectangulares, hexagonales, y otras más. Además de demostrar la existencia de la difracción *per-se* son elementos útiles para la dispersión espacial de la luz, lo cual tiene diversas aplicaciones tecnológicas como en la construcción de espectrómetros o de compresores de pulsos ultracortos. En el caso de esta investigación se fabricaron arreglos periódicos de aberturas rectangulares, por lo que en esta sección se explicará un poco de la teoría de este tipo de rejillas.

4.2.1. Teoría del arreglo periódico de aberturas rectangulares

Si se considera una rejilla compuesta por un arreglo de aberturas periódicas, con ancho de rejilla a , período b y longitud total de la rejilla c , ver Figura 4.2, se puede plantear la función de la fuente de entrada $g(x_0)$ como [80]

$$g(x_0) = \frac{1}{b} \left[\text{rect}\left(\frac{x_0}{a}\right) * \text{comb}\left(\frac{x_0}{b}\right) \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{x_0}{c}\right), \quad (4.1)$$

donde rect es la función rectángulo y comb es la función peine.

En la ecuación 4.1, se representa una función de aberturas rectangulares periódicas de longitud infinita con la expresión encerrada en los corchetes, en esa parte de la ecuación se convoluciona una función rectángulo con un peine, con el objetivo de obtener la función rectángulo repetida infinitamente. Esta función se acota a la longitud c con el último factor que se encuentra multiplicando la expresión entre corchetes.

Si llevamos la ecuación 4.1 al dominio de las frecuencias, aplicándole la Transformada de Fourier [80]

$$G(f) = ac \left[\text{sinc}(af) \cdot \text{comb}(bf) \right] * \text{sinc}(cf), \quad (4.2)$$

donde f es la frecuencia espacial, y viene dada por $f = \sin \theta / \lambda$. Los valores de θ son los diferentes ángulos a los cuáles se quiere observar el patrón de difracción (ver Figura 4.2) y a través de λ se puede especificar a qué frecuencias se quiere hacer el análisis.

Para ser más exactos, debido a que la radiación además de pasar por

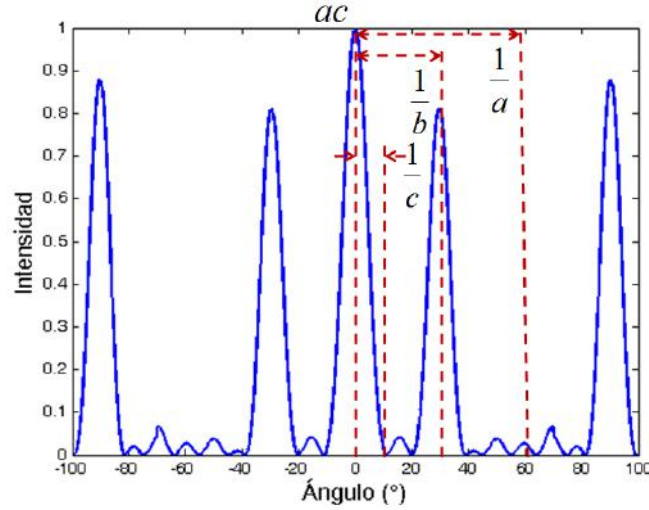


Figura 4.3: Representación gráfica de la ecuación 4.2.

aire atraviesa barras de un material específico, se agregó, sumado al término $\text{sinc}(af)$, el término $\text{sinc}(af)e^{i\phi}$ con $\phi = (2\pi h/\lambda)(n - 1)$, donde h es el espesor de las barras de la rejilla y n el índice de refracción del material del que está hecho la rejilla. La representación gráfica del resultado final de la ecuación 4.2 se puede observar en la Figura 4.3.

En el caso de las rejillas con base se agregó un factor de fase que viene dado a que la radiación atraviesa material aún cuando no pase por las barras, esto es debido a la base de la rejilla. Ese factor fue sumado al término $\text{sinc}(af) + \text{sinc}(af)e^{i\phi}$, y viene dado por: $e^{i\phi_1}$ con $\phi_1 = (2\pi(h + d)/\lambda)(n - 1)$, donde d es el espesor de la base de la rejilla.

Es importante tener en cuenta que las dimensiones de la transformada de Fourier están en orden inverso a las dimensiones geométricas de la rejilla. Pues como se puede apreciar, en las dimensiones de la rejilla, c es el valor más grande, seguido por b y por último a , pero con respecto a las dimensiones de la transformada de Fourier, la dimensión más pequeña es el ancho $1/c$ de la función $\text{sinc}(cf)$, seguido por $1/b$ que es el período de la función peine

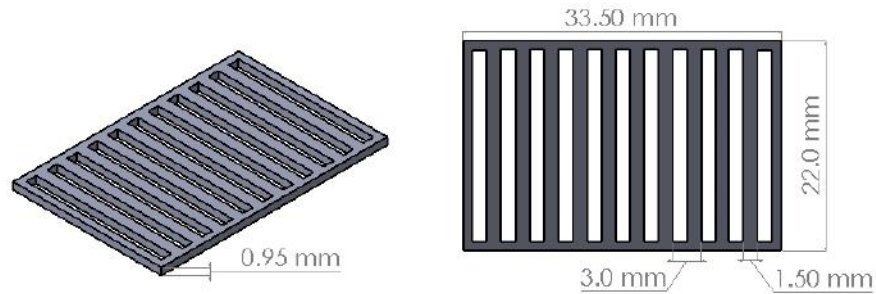


Figura 4.4: Diseño de las rejillas de difracción sin base de período 3 mm.

$\text{comb}(bf)$ y finalmente el valor más grande que es el ancho $1/a$ de la función $\text{sinc}(af)$ [80].

4.3. Diseño y fabricación de rejillas de difracción

Los arreglos periódicos de aberturas rectangulares diseñados y fabricados en esta investigación fueron de dos tipos, sin base y con base. Las rejillas fueron fabricadas en la impresora 3D con dos materiales con diferente coeficiente de absorción en THz (PS y ABS) y con diferentes tamaños de aberturas y períodos con el objetivo de observar las diferencias que pudieran existir en los resultados. Además se fabricaron con los siguientes parámetros de impresión:

- Espesor de capa: 0.06 mm. Es el parámetro que define la resolución de la impresión. La impresora utilizada alcanza un máximo de resolución de 0.06 mm. La calidad normal de resolución es de 0.1 mm.
- Grosor de la capa exterior: 0.8 mm. Define cuán gruesa será la capa exterior del objeto impreso.

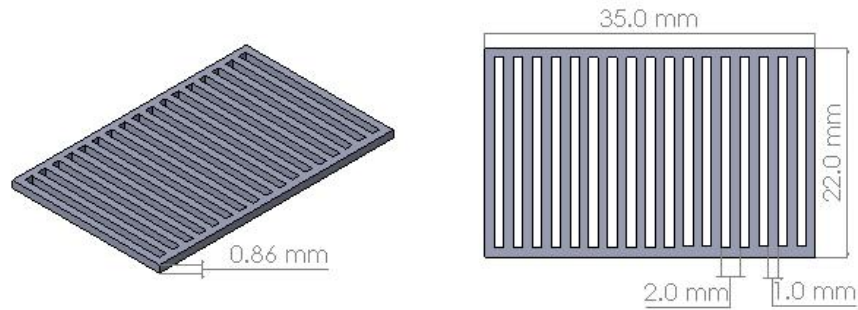


Figura 4.5: Diseño de las rejillas de difracción sin base de período 2 mm.

- Velocidad de impresión: 30 mm/s. Es la velocidad con la que se mueven los motores de la impresora.
- Densidad de llenado: 100 %. Es el porcentaje de relleno que tendrá el objeto impreso.
- Temperatura de impresión: 240°C. Es la temperatura a la que se calienta el extrusor de la impresora.
- Temperatura de la cama caliente: 80°C. Es la temperatura a la que se calienta la cama caliente .

Rejillas de difracción

El diseño realizado para el caso de las rejillas de difracción sin base se muestra en la Figura 4.4. Como se observa en la figura, el tamaño de las aberturas es $a = 1.5$ mm, el período $b = 3$ mm, el largo total $L = 22$ mm, el ancho total de la estructura es de 10.5 períodos o $c = 31.5$ mm y el espesor de cada barra $h = 0.95$ mm.

Para propósitos de comparación se diseñó también una rejilla de difracción

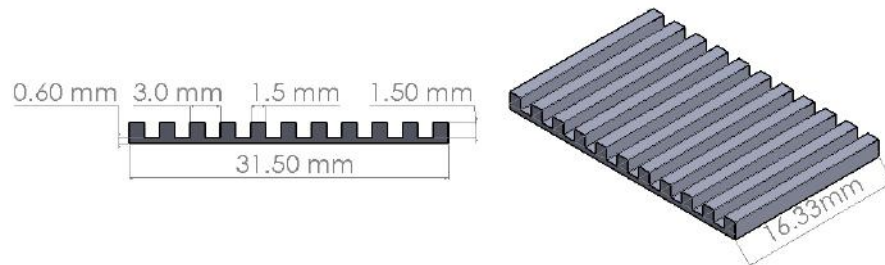


Figura 4.6: Diseño de las rejillas de difracción con base de período 3 mm.

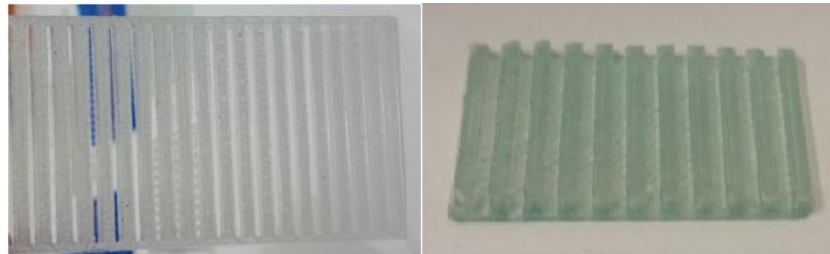


Figura 4.7: Rejillas de difracción fabricadas en PS sin base (Izquierda) y con base (Derecha) impresas.

sin base con un período más pequeño, ver Figura 4.5. Como se observa en la figura, el tamaño de las aberturas es $a = 1$ mm, el período $b = 2$ mm, el largo total $L = 22$ mm, el ancho total de la estructura es de 17.5 períodos o $c = 35$ mm y el espesor de cada barra $h = 0.86$ mm.

Rejillas de difracción con base:

De igual forma se diseñaron rejillas de difracción con base, ver Figura 4.6. Como se observa en la figura, el tamaño de las barras es $a = 1.5$ mm, el período $b = 3$ mm, el largo total $L = 16.33$ mm, el ancho total de la estructura es de 10.5 períodos o $c = 31.5$ mm y el espesor de cada barra $h = 1.5$ mm con una base de $d = 0.6$ mm. Se pueden observar las rejillas de PS impresas con base (Izquierda) y sin base (Derecha) en la Figura 4.7.

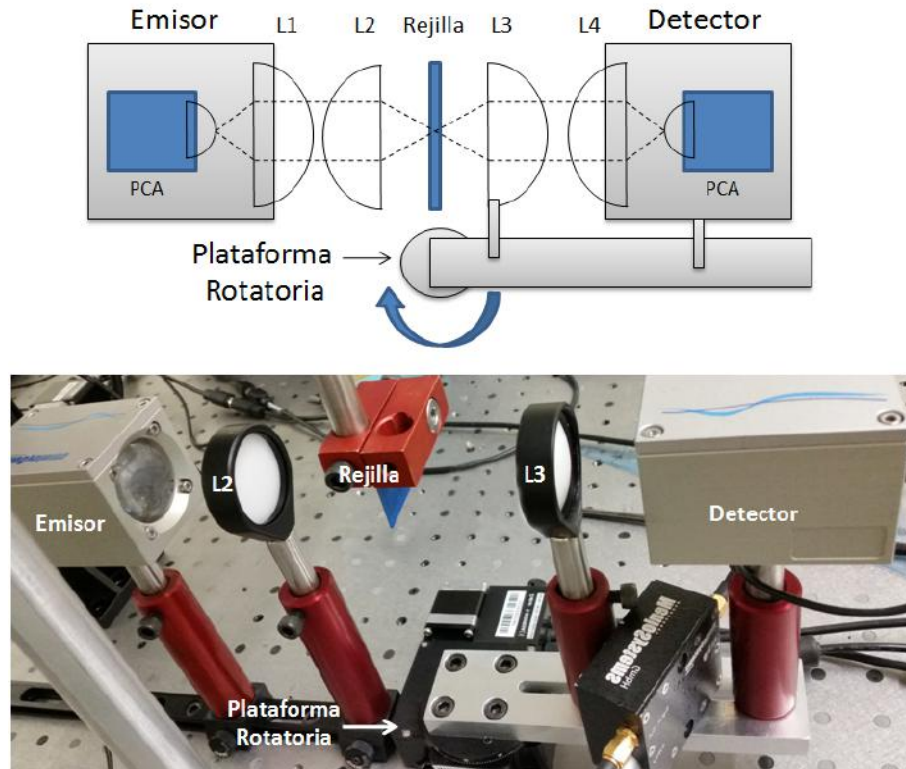


Figura 4.8: Representación esquemática del arreglo (arriba) y fotografía del arreglo (abajo) para las mediciones de las rejillas de difracción. La lente L2 enfoca el haz en la rejilla de difracción mientras que la lente L3 y el detector son movidos para obtener las mediciones a diferentes ángulos.

4.4. Resultados

Para realizar las mediciones de las rejillas de difracción fabricadas se utilizó el TDS de THz explicado en el capítulo 2. Para este caso la configuración usada fue en transmisión con una plataforma rotatoria encargada de girar la lente 3 (ubicada después de la rejilla) y el detector a ángulos específicos para hacer las mediciones a en un intervalo de ángulos. El intervalo de ángulos usado fue de -60° a $+50^\circ$ (110° en total) con un paso de 0.5° . Es importante destacar que al ángulo 0° era la transmisión normal. Se puede observar la representación esquemática del arreglo y la fotografía del arreglo para las

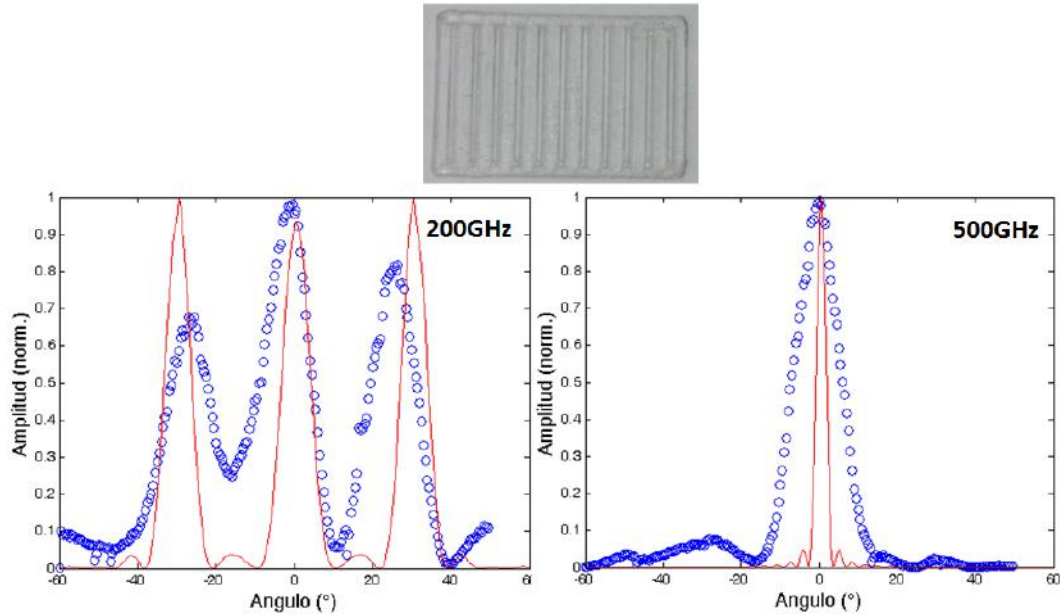


Figura 4.9: Arriba: Fotografía de la rejilla medida. Abajo: Resultado teórico (línea roja) y experimental (círculos azules) de la rejilla difracción sin base de PS con período $b = 3$ mm a 200 GHz (izquierda) y 500 GHz (derecha).

mediciones de las rejillas de difracción en la Figura 4.8.

En la Figura 4.9 se pueden observar los resultados de las mediciones teórica (línea roja) y experimental (círculos azules) de la rejilla de difracción sin base de PS con período $b = 3$ mm a dos frecuencias distintas, en la izquierda a 200 GHz y en la derecha a 500 GHz. En el panel izquierdo se observa que los puntos experimentales (círculos) presentan máximos a $-28^{\circ}, 1'$ y $+25^{\circ}$ siendo los “picos” laterales de amplitud menor aproximada de 0.68 y 0.8 respectivamente, comparados con el central. Cada uno de los picos presentan una anchura media (FWHM) de aproximadamente 20° . Aunque esto concuerda cualitativamente con la predicción teórica (línea continua) algunas diferencias importantes se observan. En la teoría los máximos se encuentran a -30° , 0° y $+30^{\circ}$ respectivamente y los dos picos laterales muestran amplitudes iguales y el central una amplitud menor que los laterales (0.95), además

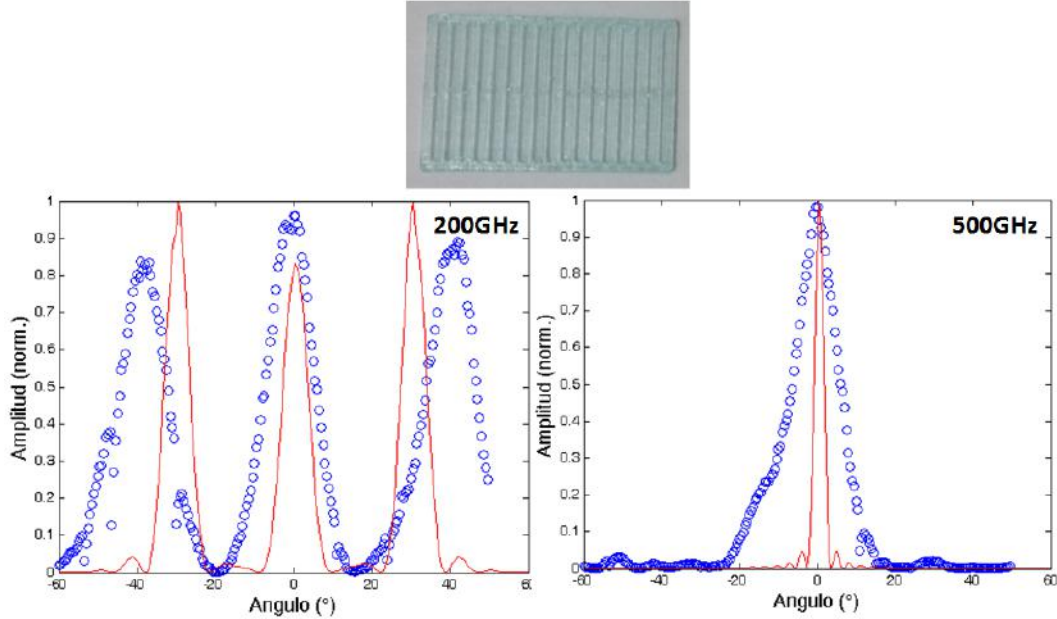


Figura 4.10: Arriba: Fotografía de la rejilla medida. Abajo: Resultado teórico (línea roja) y experimental (círculos azules) de la rejilla difracción sin base de PS con período $b = 2$ mm a 200 GHz (izquierda) y 500 GHz (derecha).

se muestran picos adicionales de mucha menor amplitud (0.03) en ángulos $\pm 15^\circ$ y $\pm 42^\circ$. Los picos teóricos tienen una FWHM de unos 8° . En el panel derecho se observa que los puntos experimentales presenta el máximo principal a -2° con una amplitud de 1 y una FWHM de aproximadamente 20° . Aunque este resultado también concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias se pueden ver. En la teoría el máximo principal se encuentra a 0° con una FWHM de unos 4° y se muestran picos adicionales, a los lados del pico central, de mucha menor amplitud (0.04, 0.02 y 0.01) en ángulos $\pm 4^\circ$, $\pm 8^\circ$ y $\pm 11^\circ$.

En la Figura 4.10 se pueden observar los resultados de las mediciones teórica y experimental de la rejilla de difracción sin base de PS con período $b = 2$ mm a dos frecuencias distintas, en la izquierda a 200 GHz y en la derecha a 500 GHz. En el panel izquierdo se observa que los puntos experi-

mentales presentan máximos a -38° , 1° y $+42^\circ$ siendo los “picos” laterales de amplitud menor aproximada de 0.85 y 0.88 respectivamente, comparados con el central con una amplitud de 1. Cada uno de los picos presentan una anchura media (FWHM) de aproximadamente 20° . Aunque esto concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias importantes se pueden observar. En la teoría los máximos se encuentran a -30° , 0° y $+30^\circ$ respectivamente y los dos picos laterales muestran amplitudes iguales y el central una amplitud menor que los laterales (0.81), además se muestran picos adicionales de mucha menor amplitud (0.02 y 0.03) en ángulos $\pm 15^\circ$ y $\pm 42^\circ$ respectivamente. Los picos teóricos tienen una FWHM de unos 8° . En el panel derecho se observa que los puntos experimentales presenta el máximo principal a -1° con una amplitud de 1 y una FWHM de aproximadamente 15° . Aunque este resultado también concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias se pueden ver. En la teoría el máximo principal se encuentra a 0° con una FWHM de unos 4° y se muestran picos adicionales, a los lados del pico central, de mucha menor amplitud (0.04, 0.02 y 0.01) en ángulos $\pm 4^\circ$, $\pm 8^\circ$ y $\pm 10^\circ$.

En la Figura 4.11 se pueden observar los resultados de las mediciones teórica y experimental de la rejilla de difracción sin base de ABS con período $b = 3 \text{ mm}$ a dos frecuencias distintas, en la izquierda a 200 GHz y en la derecha a 600 GHz. En el panel izquierdo se observa que los puntos experimentales presentan máximos a -28° , 0° y $+27^\circ$ siendo los “picos” de amplitud aproximada de 0.96, 0.98 y 0.92 respectivamente. Cada uno de los picos presentan una anchura media (FWHM) de aproximadamente 10° . Aunque esto concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias im-

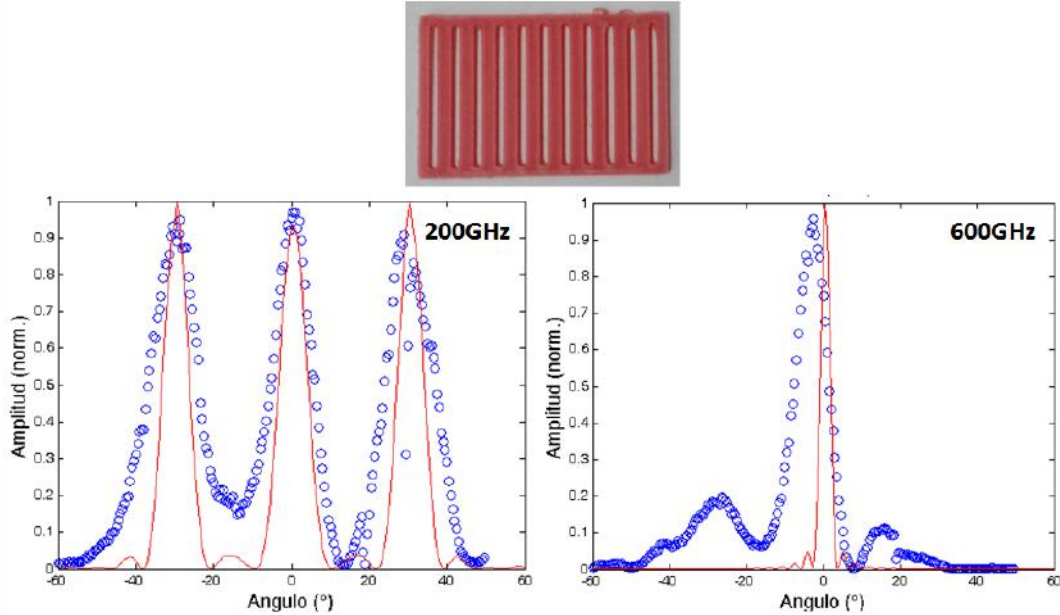


Figura 4.11: Arriba: Fotografía de la rejilla medida. Abajo: Resultado teórico (línea roja) y experimental (círculos azules) de la rejilla difracción sin base de ABS con período $b = 3$ mm a 200 GHz (izquierda) y 600 GHz (derecha).

portantes se observan. En la teoría los máximos se encuentran a -30° , 0° y $+30^\circ$ respectivamente y los dos picos laterales muestran amplitudes iguales y el central una amplitud menor que los laterales (0.92), además se muestran picos adicionales de mucha menor amplitud (0.03) en ángulos $\pm 15^\circ$ y $\pm 42^\circ$. Los picos teóricos tienen una FWHM de unos 8° . En el panel derecho se observa que los puntos experimentales presenta el máximo principal a -3° con una amplitud de 0.98 y una FWHM de aproximadamente 10° y se observan dos picos laterales de 0.2 y 0.1 en ángulos -25° y 18° respectivamente. Aunque este resultado también concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias se pueden observar. En la teoría el máximo principal se encuentra a 0° con una FWHM de unos 4° y se observan tres picos por cada lateral con amplitud (0.04, 0.02 y 0.01) ubicados en ángulos $\pm 4^\circ$, $\pm 8^\circ$ y $\pm 10^\circ$.

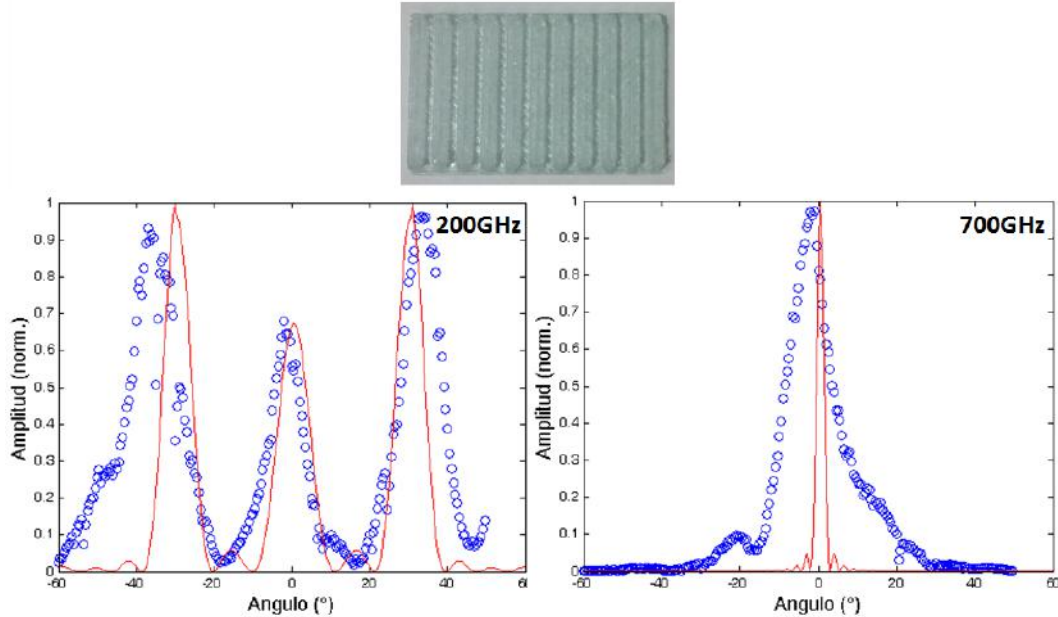


Figura 4.12: Arriba: Fotografía de la rejilla medida. Abajo: Resultado teórico (línea roja) y experimental (círculos azules) de la rejilla difracción con base $d = 0,6$ mm de PS con período $b = 3$ mm a 200 GHz (izquierda) y 700 GHz (derecha).

En la Figura 4.12 se pueden observar los resultados de las mediciones teórica y experimental de la rejilla de difracción con base $d = 0.6$ mm de PS con período $b = 3$ mm a dos frecuencias distintas, en la izquierda a 200 GHz y en la derecha a 700 GHz. En el panel izquierdo se observa que los puntos experimentales presentan máximos a -37° , -3° y $+34^\circ$ siendo los “picos” laterales de amplitud mayor aproximada de 0.92 y 0.95 respectivamente, comparados con el central con una amplitud de 0.66. Cada uno de los picos presentan una anchura media (FWHM) de aproximadamente 13° . Aunque esto concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias importantes se pueden observar. En la teoría los máximos se encuentran a -30° , 0° y $+30^\circ$ respectivamente y los dos picos laterales muestran amplitudes iguales y el central una amplitud menor que los laterales (0.65), además se muestran

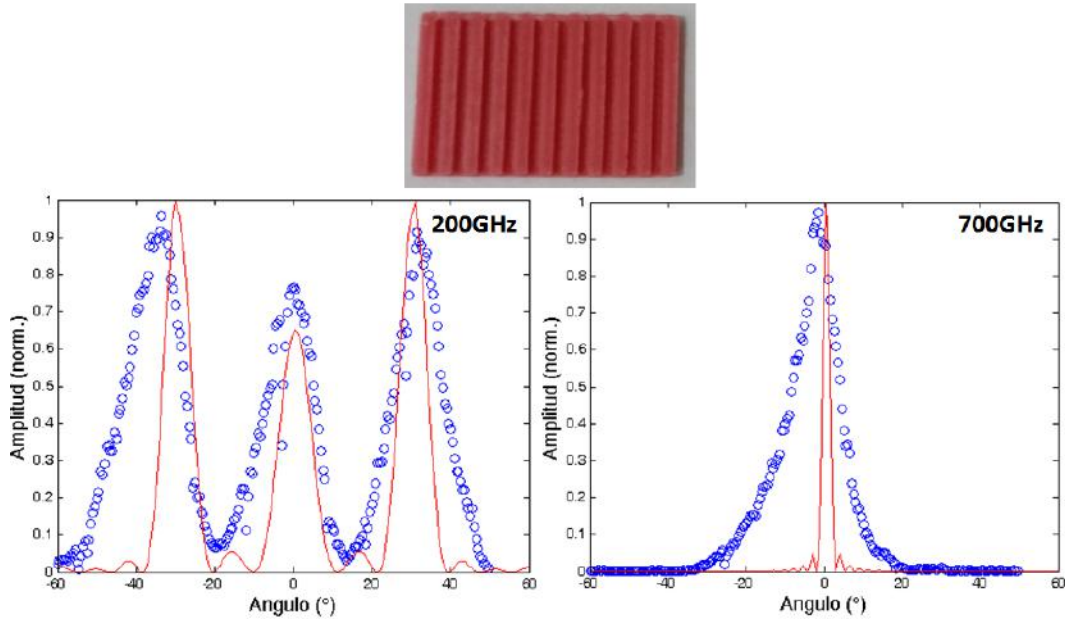


Figura 4.13: Arriba: Fotografía de la rejilla medida. Abajo: Resultado teórico (línea roja) y experimental (círculos azules) de la rejilla difracción con base $d = 0.6$ mm de ABS con período $b = 3$ mm a 200 GHz (izquierda) y 700 GHz (derecha).

picos adicionales de mucha menor amplitud (0.04 y 0.03) en ángulos $\pm 15^\circ$ y $\pm 42^\circ$ respectivamente. Los picos teóricos tienen una FWHM de unos 8° . En el panel derecho se observa que los puntos experimentales presenta el máximo principal a -3° con una amplitud de 0.98 y una FWHM de aproximadamente 10° . Aunque este resultado también concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias se pueden ver. En la teoría el máximo principal se encuentra a 0° con una FWHM de unos 4° y se muestran picos adicionales, a los lados del pico central, de mucha menor amplitud (0.03 , 0.01 y 0.005) en ángulos $\pm 4^\circ$, $\pm 6^\circ$ y $\pm 8^\circ$.

En la Figura 4.13 se pueden observar los resultados de las mediciones teórica y experimental de la rejilla de difracción con base $d = 0.6$ mm de ABS con período $b = 3$ mm a dos frecuencias distintas, en la izquierda a

200 GHz y en la derecha a 700 GHz. En el panel izquierdo se observa que los puntos experimentales presentan máximos a -38° , -3° y $+31^\circ$ siendo los “picos” laterales de amplitud mayor aproximada de 0.94 y 0.9 respectivamente, comparados con el central con una amplitud de 0.72. Cada uno de los picos presentan una anchura media (FWHM) de aproximadamente 20° . Aunque esto concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias importantes están presentes. En la teoría los máximos se encuentran a -30° , 0° y $+30^\circ$ respectivamente y los dos picos laterales muestran amplitudes iguales y el central una amplitud menor que los laterales (0.65), además se muestran picos adicionales de mucha menor amplitud (0.04 y 0.03) en ángulos $\pm 15^\circ$ y $\pm 42^\circ$ respectivamente. Los picos teóricos tienen una FWHM de unos 8° . En el panel derecho se observa que los puntos experimentales presenta el máximo principal a -2° con una amplitud de 1 y una FWHM de aproximadamente 12° . Aunque este resultado también concuerda cualitativamente con la predicción teórica algunas diferencias se pueden mencionar. En la teoría el máximo principal se encuentra a 0° con una FWHM de unos 4° y se muestran picos adicionales, a los lados del pico central, de mucha menor amplitud (0.03, 0.01 y 0.005) en ángulos $\pm 4^\circ$, $\pm 6^\circ$ y $\pm 8^\circ$.

La ausencia de los picos pequeños en todas las mediciones y la discrepancia en los anchos de los picos principales se debe a que el ángulo de aceptación del sistema de detección es relativamente grande (aproximadamente 27°). Dicho ángulo de aceptación (θ) se calculó por trigonometría a través de $\arctan(3.81/7.5)$, donde 3.81 cm es el diámetro de la lente y 7.4 cm es la distancia de la rejilla a la lente ubicada antes del detector, como se puede observar en la Figura 4.14. Las discrepancias en las posiciones de los

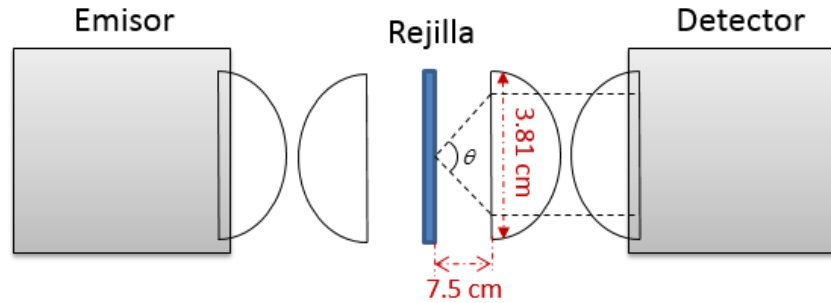


Figura 4.14: Representación del cálculo del ángulo (θ) de aceptación del sistema de detección.

picos pueden deberse a errores de alineación, sin embargo las desviaciones en sus amplitudes aún son un misterio y nos atrevemos a sugerir la posibilidad de que estén relacionados a imperfecciones en la fabricación de la rejilla. Para una mejor comparación se presenta una tabla con los datos teóricos y experimentales de las rejillas de difracción medidas a 200 GHz en la Tabla 4.1.

En este capítulo se analizaron detalladamente cada una de las mediciones de las rejillas de difracción fabricadas, con el objetivo de notar las diferencias y similitudes de los resultados teóricos y experimentales. Como se pudo apreciar en todas las gráficas mostradas los resultados experimentales fueron semejantes a los teóricos.

A modo de comparación se puede mencionar un artículo publicado, en el que también fabrican una rejilla de difracción con base por impresión 3D con diseño semejante al impreso en esta investigación. Sus resultados experimentales no concuerdan en totalidad con sus teóricos modelados ya que el pico central de intensidad presente en la práctica está ausente en su tratamiento teórico [49]. Dicho pico que si está presente en los resultados teóricos y experimentales de la rejilla de difracción fabricada en esta investigación. Para comprobar la teoría que expusieron en el artículo se graficó la ecuación

Orden		m=-1	m=0	m=1
<i>Rejilla sin base de PS b=3 mm</i>				
Posición(grados)	-teoría	-30	0	+30
	-experimento	-28	+1	+25
Amplitud(norm)	-teoría	1	0.95	1
	-experimento	0.68	1	0.8
<i>Rejilla sin base de PS b=2 mm</i>				
Posición(grados)	-teoría	-30	0	+30
	-experimento	-38	+1	+42
Amplitud(norm)	-teoría	1	0.81	1
	-experimento	0.85	1	0.88
<i>Rejilla sin base de ABS b=3 mm</i>				
Posición(grados)	-teoría	-30	0	+30
	-experimento	-28	0	+27
Amplitud(norm)	-teoría	1	0.92	1
	-experimento	0.96	0.98	0.92
<i>Rejilla con base de PS b=3 mm</i>				
Posición(grados)	-teoría	-30	0	+30
	-experimento	-37	-3	+34
Amplitud(norm)	-teoría	1	0.65	1
	-experimento	0.92	0.66	0.95
<i>Rejilla con base de ABS b=3 mm</i>				
Posición(grados)	-teoría	-30	0	+30
	-experimento	-38	-3	+31
Amplitud(norm)	-teoría	1	0.65	1
	-experimento	0.94	0.72	0.9

Cuadro 4.1: Tabla comparativa de las rejillas de difracción impresas a 200 GHz.

que presentaron para rejillas de difracción con base. El resultado obtenido fue igual al modelo realizado en esta investigación, o sea sí aparece el pico central, por lo que no se puede decir exactamente que hicieron mal, pero esa ecuación no devuelve el resultado que plantean como su parte teórica. De esta forma se pudo demostrar que se realizó un mejor modelado en esta investigación.

Capítulo 5

Lentes esféricas y esféricas

En este capítulo se presenta el diseño, fabricación y caracterización de lentes esféricas y esféricas. Primeramente se hace un breve repaso de la teoría detrás de estos elementos ópticos y después se presentan los resultados.

5.1. Teoría de lentes

Una lente es un dispositivo refractor que desvía los rayos de luz incidentes sobre la misma enfocándolos en un punto. Es el sistema óptico más usado, existen muchos objetos que utilizan lentes para su funcionamiento, por ejemplo: telescopios, microscopios, cámaras, gafas, proyectores, entre otros. Las lentes generan la convergencia o divergencia de haces de luz y la formación de imágenes virtuales o reales, en dependencia de su forma y su utilización.

Existen dos tipos principales de lentes, las convexas, convergentes o positivas y las cóncavas, divergentes o negativas. Las lentes convexas son más gruesas en el centro que en sus extremos y obligan al haz incidente a converger de alguna forma hacia el eje central. Las lentes cóncavas son más delgadas en

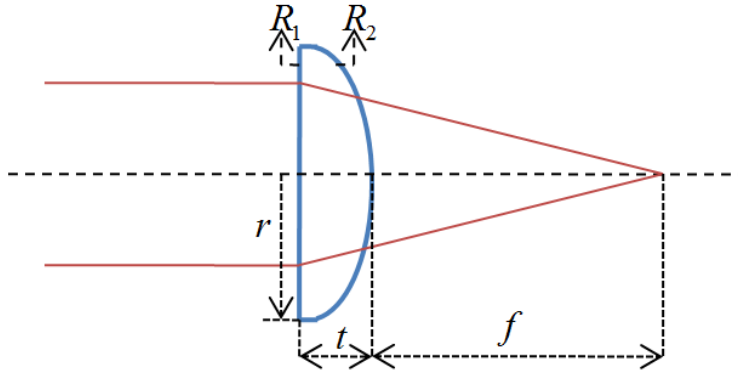


Figura 5.1: Diagrama de una lente de radios de curvaturas R_1 y R_2 , radio de apertura r , espesor t y distancia focal f , iluminada por un haz.

el centro que en sus extremos y hacen que el haz que entre de forma paralela diverja, alejándose del eje central. Se pueden clasificar las lentes también de acuerdo a sus curvaturas. Dentro de las lentes convexas están las bi-convexas, plano-convexas y las menisco-convexas. Dentro de las lentes cóncavas están las bi-cóncavas, plano-cóncavas y las menisco-cóncavas. Las lentes que no tengan alguna superficie que sea plana o esférica se denominan asféricas y son difíciles de fabricar. Por otra parte tenemos las lentes esféricas, las cuales como su nombre lo indica, contienen al menos una superficie esférica.

El punto hacia el cual converge o el punto del cual diverge el haz de luz al atravesar una lente convexa o cóncava respectivamente se le denomina punto focal, y puede ser calculado para las lentes esféricas por la fórmula del fabricante de lentes [78]

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (5.1)$$

donde f , n , R_1 y R_2 son la distancia focal, el índice de refracción y los radios de curvatura de las dos superficies de la lente respectivamente. La Figura 5.1

muestra el diagrama de trazo de rayos para una lente.

Las lentes pueden dar lugar a errores en las imágenes que generan, estos errores se denominan aberraciones y existen dos tipos principales: las aberraciones cromáticas y las acromáticas. Las aberraciones cromáticas parten del hecho de que el índice de refracción depende directamente de la frecuencia. Las aberraciones acromáticas suceden aunque la luz sea monocromática y existen dos grupos dentro de estas: las que hacen la imagen confusa por su deterioro (la coma, el astigmatismo y la aberración esférica) y las que deforman la imagen (la distorsión y la curvatura de campo) [78].

5.2. Diseño y fabricación de lentes

Las lentes esféricas diseñadas en esta investigación tienen una de sus superficies planas por lo que la ecuación 5.1 se reduce a

$$f = \frac{R}{n - 1}, \quad (5.2)$$

donde R es el radio de curvatura de la superficie no plana.

Para diseñar las lentes se utilizó un diámetro de apertura de 38.1 mm de diámetro. Los índices de refracción de los materiales empleados para imprimir los componentes ópticos fueron presentados en el capítulo 3. A partir de esos datos y escogiendo la distancia focal se puede determinar el radio de curvatura R de las lentes esféricas a partir de la ecuación 5.2.

Para el caso de las lentes esféricas la forma de la superficie curva fue

determinada por la ecuación para lentes esféricas

$$z(r) = t + \frac{Cr^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)C^2r^2}} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + A_{10}r^{10}. \quad (5.3)$$

donde z es la forma final de la superficie de la lente, t el espesor, C la curvatura, k la constante cónica y A_4 , A_6 , A_8 y A_{10} los coeficientes de deformación de la superficie.

Si racionalizamos la ecuación 5.3 y sustituimos $C = 1/R$, siendo R el radio de curvatura, nos queda

$$z = t + \frac{R - \sqrt{R^2 - (k+1)r^2}}{k+1} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 + A_{10}r^{10}, \quad (5.4)$$

Las lentes fueron fabricadas en la impresora 3D con dos materiales de diferente índice de refracción (PS y ABS), con diferentes distancias focales y curvaturas (esféricas y esféricas) con el objetivo de observar las diferencias que pudieran existir en los resultados. Además se fabricaron con los siguientes parámetros de impresión:

- Espesor de capa: 0.06 mm.
- Grosor de la capa exterior: 0.8 mm para impresión por líneas paralelas y 18.8 mm para impresión circular.
- Velocidad de impresión: 40 mm/s.
- Densidad de llenado: 90 %, pues si se ponía el total de llenado la superficie de las lentes quedaba con grumosidades debido a que se extruía demasiado material.
- Temperatura de impresión: 240°C.

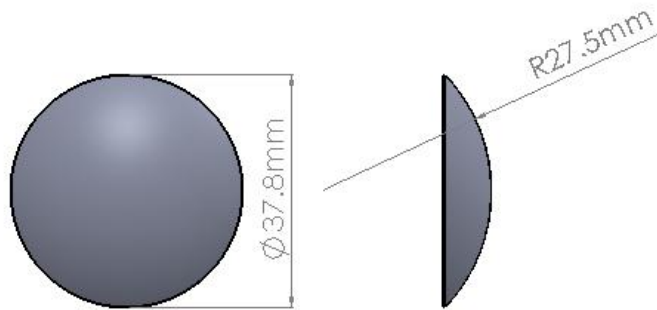


Figura 5.2: Diseño de lente de 5 cm de distancia focal.

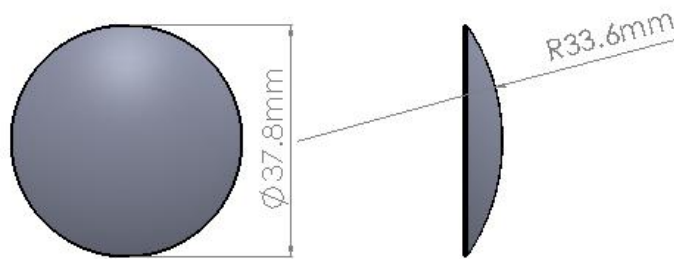


Figura 5.3: Diseño de lente esférica de 6 cm de distancia focal.

- Temperatura de la cama caliente: 90°C.

Lentes esféricas

El diseño realizado para las lentes esféricas de 5 cm de distancia focal se muestra en la Figura 5.2. Como se observa en la figura, el diámetro de la lente es $D = 37.8$ mm, el radio de curvatura calculado por la ecuación 5.2 es $R = 27.5$ mm, y el espesor en el centro es de $t = 7.92$ mm.

De igual forma el diseño realizado para las lentes esféricas de 6 cm de distancia focal se muestra en la Figura 5.3. Como se observa en la figura, el diámetro de la lente es $D = 37.8$ mm, el radio de curvatura calculado por la

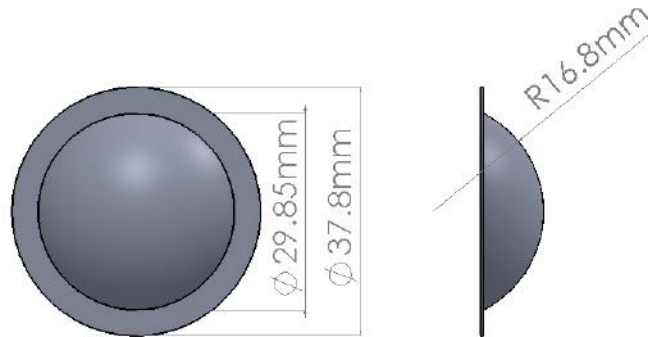


Figura 5.4: Diseño de lente esférica de 3 cm de distancia focal.

ecuación 5.2 es $R = 33.6$ mm, y el espesor en el centro es de $t = 6.22$ mm.

Por último para las lentes esféricas se fabricó una de 3 cm de distancia focal, cuyo diseño se observa en la Figura 5.4. Para mantener el diámetro de la lente del tamaño del portales, fue necesario, diseñar un tipo de lente denominada lenticular, o sea que presenta dos diámetros, el exterior de $D = 37.8$ mm y el interior de $d = 29.85$ mm. El radio de curvatura calculado por la ecuación 5.2 es $R = 16.8$ mm, y el espesor en el centro es de $t = 9.69$ mm.

Lentes esféricas

En la Figura 5.5 se muestra el caso del diseño de las lentes esféricas de 6 cm de distancia focal. Como se observa en la figura, el diámetro de la lente es $D = 38.1$ mm, el espesor en el centro es de $t = 6$ mm y la forma de la curvatura se calculó por la ecuación para lentes esféricas simplificada 5.4 con los siguientes parámetros [81]: $k = -0.59417$, $R = 35.7538$ mm. En este caso los coeficientes de deformación no se especificaron pues al ser tan pequeños (menores o iguales que 10^{-8}) no contribuían a la ecuación para lentes esféricas.

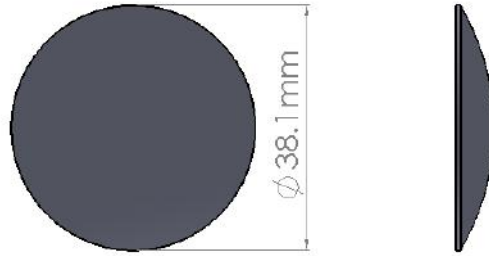


Figura 5.5: Diseño de lente esférica de 6 cm de distancia focal.

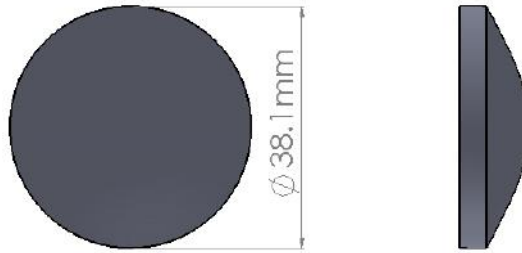


Figura 5.6: Diseño de lente esférica de 3 cm de distancia focal.

De igual forma el diseño realizado para las lentes esféricas de 3 cm de distancia focal se muestra en la Figura 5.6. Como se observa en la figura, el diámetro de la lente es $D = 38.1 \text{ mm}$, el espesor en el centro es de $t = 11 \text{ mm}$ y la forma de la curvatura se calculó por la ecuación para lentes esféricas simplificada 5.4 con los siguientes parámetros [81]: $k = -1.36082$, $R = -20.7487 \text{ mm}$, $A_4 = -0.0000111997$. Los demás coeficientes de deformación no se especificaron pues al ser tan pequeños (menores que 10^{-10}) no contribuían a la ecuación para lentes esféricas.

Ejemplos de las lentes fabricadas con la impresora 3D se pueden observar en la Figura 5.7. De izquierda a derecha se muestra una: lente esférica de PS de $f = 6 \text{ cm}$, lente esférica de ABS de $f = 6 \text{ cm}$, lente esférica de PS de $f = 6 \text{ cm}$ y lente lenticular esférica de PS de $f = 3 \text{ cm}$.



Figura 5.7: De izquierda a derecha: lente esférica de PS de $f = 6$ cm, lente esférica de ABS $f = 6$ cm, lente asférica de PS de $f = 3$ cm y lente esférica de PS de $f = 3$ cm.

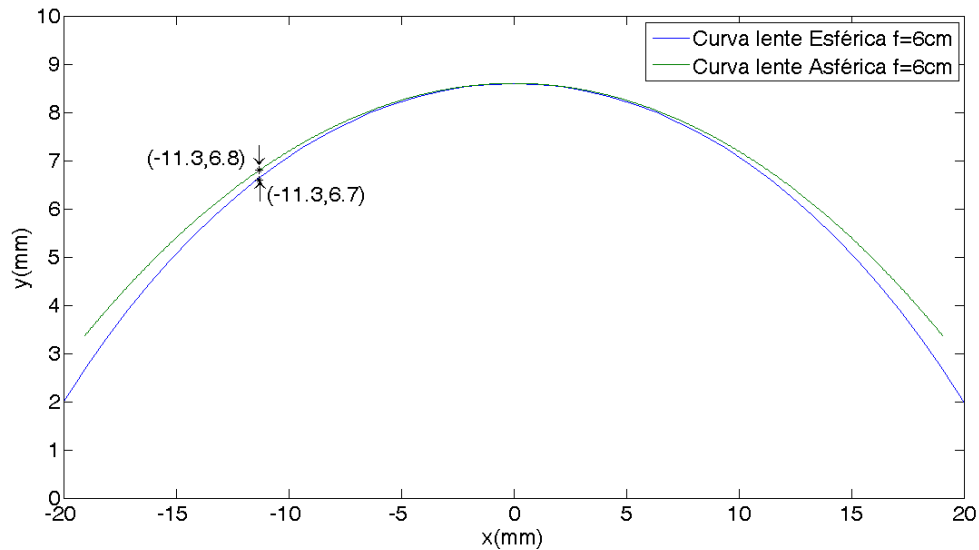


Figura 5.8: Diferencia de curvaturas entre las lentes asférica y esférica de $f = 6$ cm. La diferencia es de $100 \mu\text{m}$.

Para comparar las diferencias de curvaturas entre las lentes asféricas y las lentes esféricas de la misma distancia focal diseñadas se graficó la curva correspondiente a la lente asférica y el círculo con el radio de la lente esférica, obteniendo para el caso de las lentes asférica y esférica de $f = 6$ cm una diferencia de $100 \mu\text{m}$ en la posición radial $r = 12.5$ mm como se muestra en la Figura 5.8 y para el caso de las lentes asférica y esférica de $f = 3$ cm una diferencia aproximada de 2 mm en la posición radial $r = 12.5$ mm como se muestra en la Figura 5.9.

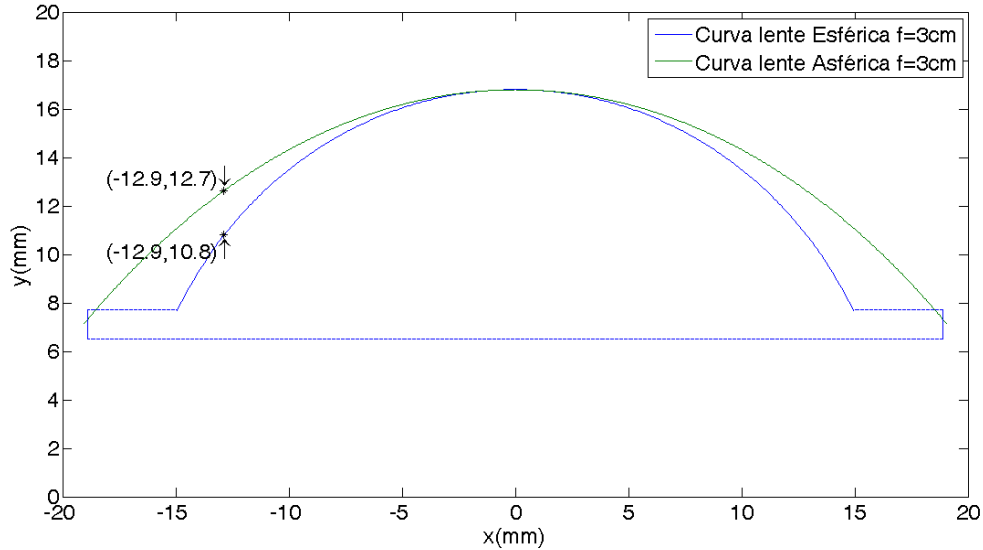


Figura 5.9: Diferencia de curvaturas entre las lentes asférica y esférica de $f = 3$ cm. La diferencia es de 2 mm.

5.3. Resultados

Para analizar las mediciones de las lentes esféricas fabricadas se utilizó el TDS de THz explicado en el capítulo 2. Para este caso la configuración usada fue en transmisión con dos plataformas traslacionales motorizadas encargadas de mover un iris a diferentes posiciones para hacer las mediciones transversales y axiales de los focos de las lentes.

Para la medición transversal del foco las plataformas traslacionales se movían en dirección X e Y (ver Figura 5.10) con un paso de 0.2 mm. Se puede observar la representación esquemática del arreglo y la fotografía del arreglo para las mediciones transversales del foco de las lentes esféricas en la Figura 5.10. Como se puede apreciar en la figura el arreglo utilizado contiene un iris entre las lentes L2 (la lente a medir) y L3. Dicho iris es utilizado como apertura de muestreo para reconstruir punto a punto la imagen del foco, moviéndose en posición X (adentro y afuera) e Y (arriba y abajo) en

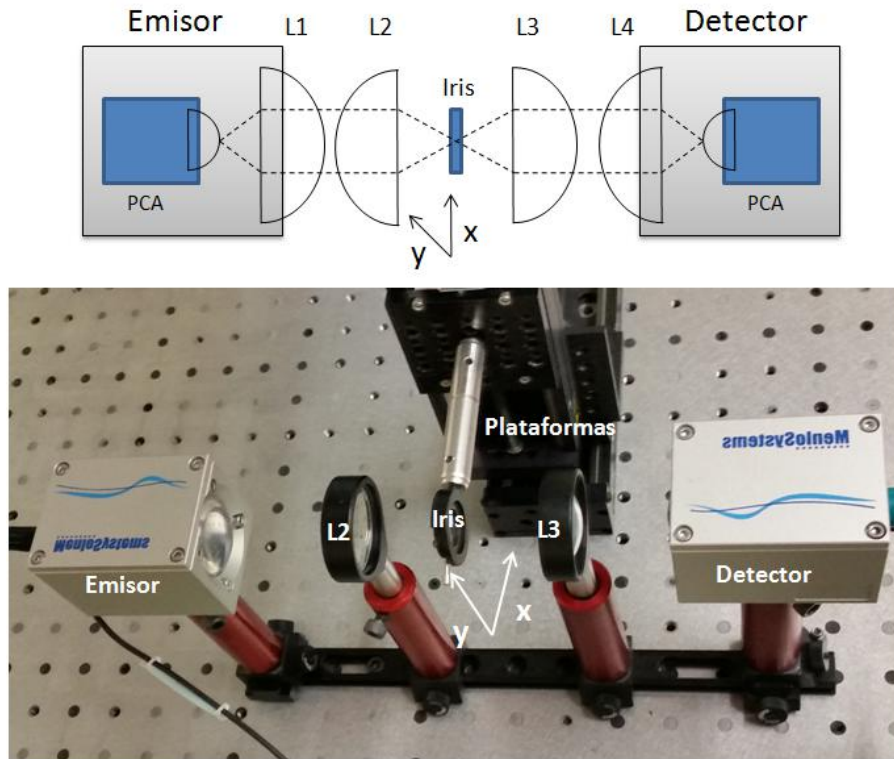


Figura 5.10: Representación esquemática del arreglo (arriba) y fotografía del arreglo (abajo) para las mediciones transversales del foco de las lentes esféricas. L2 es la lente a medir, el iris se utiliza para construir la imagen transversal del foco de L2 punto por punto y L3 para enfocar el haz en el detector.

el plano focal. El diámetro del iris fue de aproximadamente 1 mm. Se puede observar en la Figura 5.11 la representación del funcionamiento del iris.

A modo de comparación se midieron 4 lentes esféricas diferentes, una compradas y otra fabricada en torno CNC, de TPX y PE respectivamente, y dos impresas de PS y ABS. Las imágenes transversales del foco de las lentes compradas y de las lentes impresas se muestran en la Figura 5.12 y Figura 5.13 respectivamente. La imagen transversal del foco que se muestra de cada lente es producto de haber aplicado la Transformada de Fourier al pulso y haber graficado la amplitud a una frecuencia determinada, que en este caso se escogió la frecuencia 300 GHz para todas las lentes.

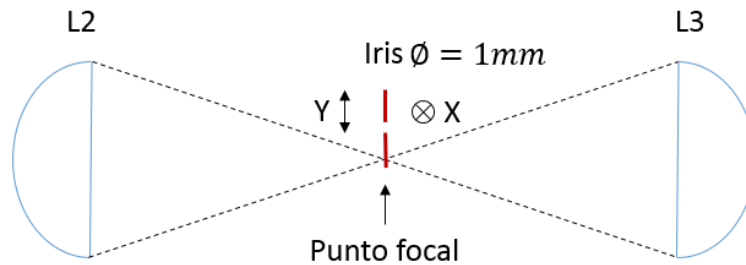


Figura 5.11: Funcionamiento del iris utilizado en el arreglo de la Figura 5.10. El iris se mueve en dirección X e Y con el objetivo de obtener la imagen transversal del foco de la lente L2

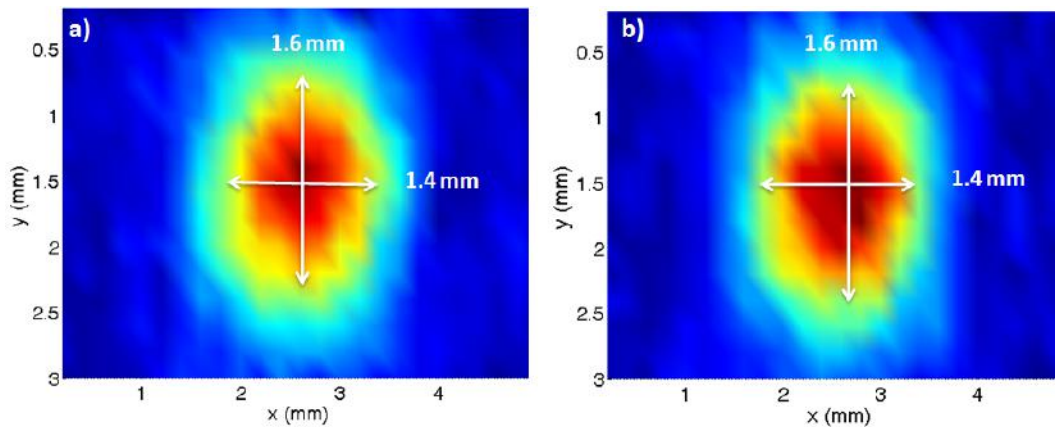


Figura 5.12: Imagen transversal del foco a 300 GHz de la lente a) TPX $f = 5.4\text{ cm}$ y b) PE $f = 7\text{ cm}$.

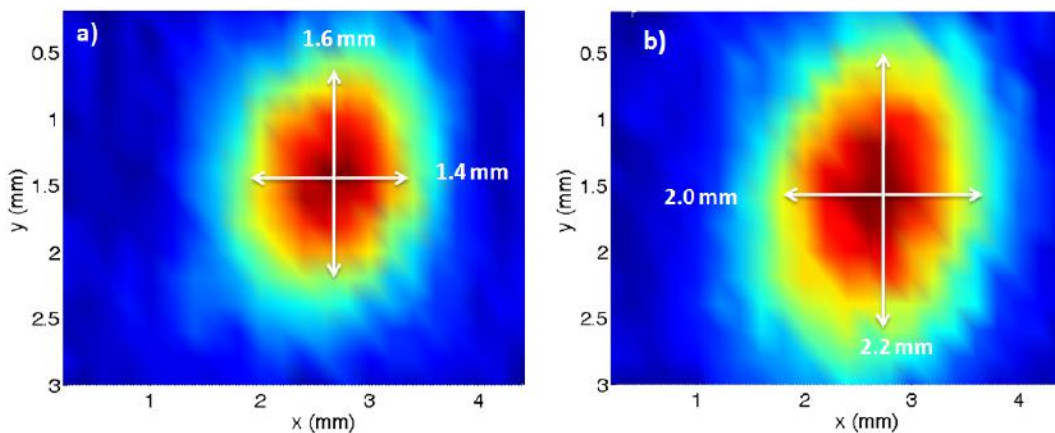


Figura 5.13: Imagen transversal del foco a 300 GHz de la lente a) PS $f = 5\text{ cm}$ y b) ABS $f = 5\text{ cm}$.

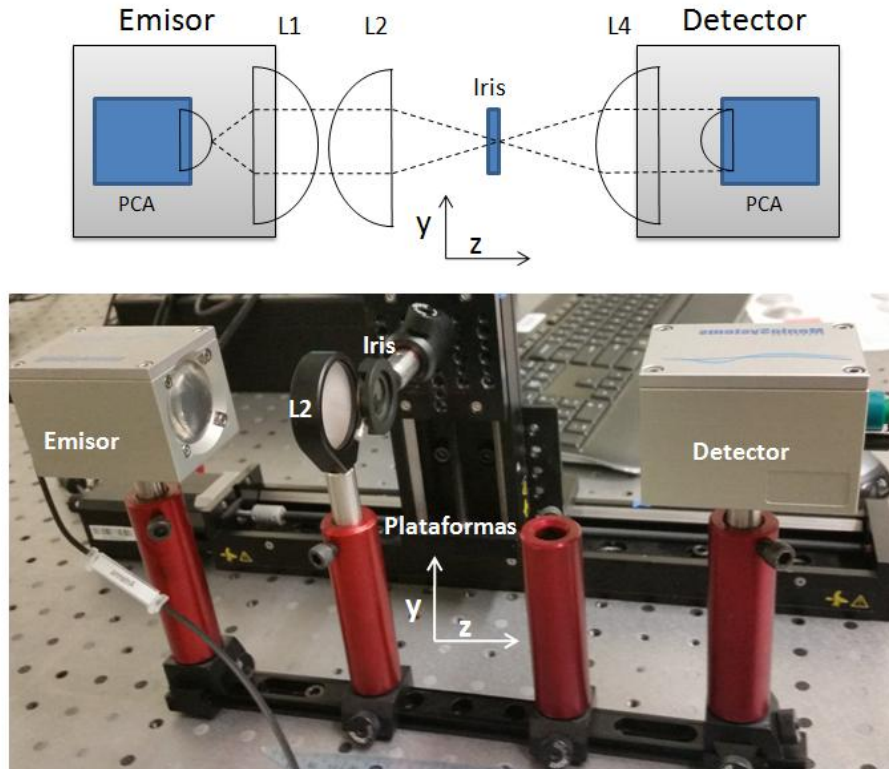


Figura 5.14: Representación esquemática del arreglo (arriba) y fotografía del arreglo (abajo) para las mediciones axiales del foco de las lentes esféricas. L2 es la lente a medir, el iris se utiliza para construir la imagen en eje del foco de L2 punto por punto.

Como se puede apreciar en Figura 5.13 la lente de PS impresa presenta un tamaño de foco similar a las lentes de TPX y PE pero la lente de ABS debido a su alto nivel de absorción a altas frecuencias presenta un límite de difracción promedio más grande, causando que el tamaño del foco sea más grande.

Para la medición axial de la geometría del foco la plataforma inferior se giró perpendicularmente con el objetivo de que las plataformas se movieran en dirección Y y Z, utilizando un paso de 0.3 mm. Se puede observar la representación esquemática del arreglo y la fotografía del arreglo para las mediciones axiales del foco de las lentes esféricas en la Figura 5.14. Se uti-

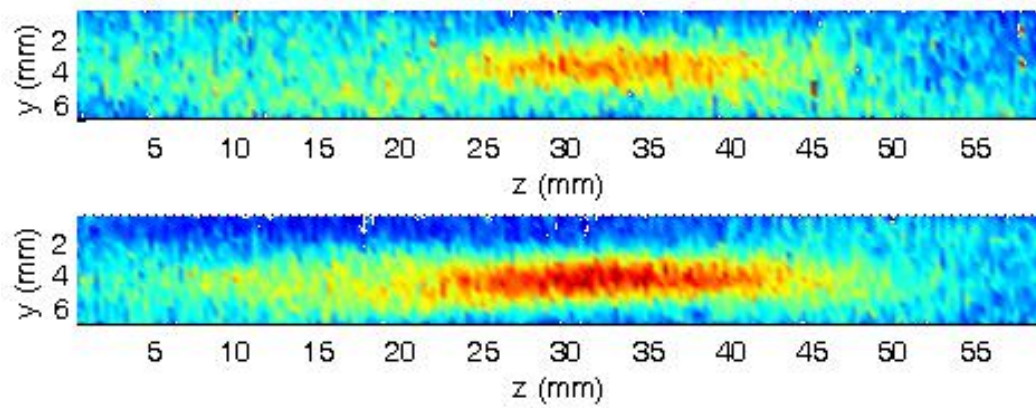


Figura 5.15: Imagen axial del foco de la lente a 300 GHz: TPX $f = 5.4$ cm (arriba) y PE $f = 7$ cm (abajo).

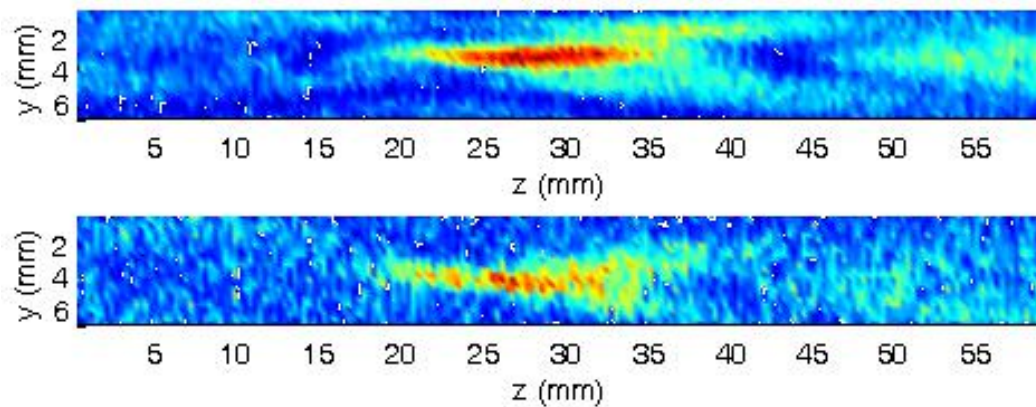


Figura 5.16: Imagen axial del foco de la lente a 300 GHz: PS $f = 5$ cm (arriba) y ABS $f = 5$ cm (abajo).

lizó el iris con el objetivo de reconstruir axialmente la imagen del plano focal, moviéndose en posición Z (a los lados) e Y (arriba y abajo). El diámetro del iris fue de aproximadamente 1 mm.

A modo de comparación se midieron las mismas 4 lentes esféricas de las mediciones anteriores. Las imágenes axiales del foco de las lentes de TPX y PE y de las lentes de PS y ABS se muestran en la Figura 5.15 y Figura 5.16 respectivamente.

La lente de PS impresa presenta su máxima amplitud a una distancia de 28 mm en Z y de 27.6 mm en Y, si le agregamos la distancia de la cual se empezó a medir en Z que fue de aproximadamente 20 mm eso nos da un aproximado de 50 mm que es la distancia focal para la cual fue diseñada esa lente. En el caso de la lente de ABS impresa presenta su máxima amplitud a una distancia de 26 mm en Z y de 4.5 mm en Y y si le sumamos de igual forma la distancia de la cual se empezó a medir en Z nos da similarmente un aproximado de 50 mm. A 300 GHz el nivel de señal ruido es inadecuado para distinguir el foco de la lente de ABS, debido al incremento de su absorción a medida que aumenta la frecuencia.

Posteriormente, para comparar las mediciones transversales de los focos de las lentes asféricas con las esféricas se utilizó el mismo sistema TDS-THz en transmisión con las dos plataformas en configuración transversal, con el objetivo de mover el iris en el plano focal, de la misma forma que en la Figura 5.11. Además se utilizó la plataforma rotacional motorizada sobre la cual se ubicó la lente asférica o esférica a medir y se realizaron mediciones transversales a diversos ángulos, con el objetivo de determinar el grado de afectación en el foco debido a la aberración de coma. Los ángulos a los cuales

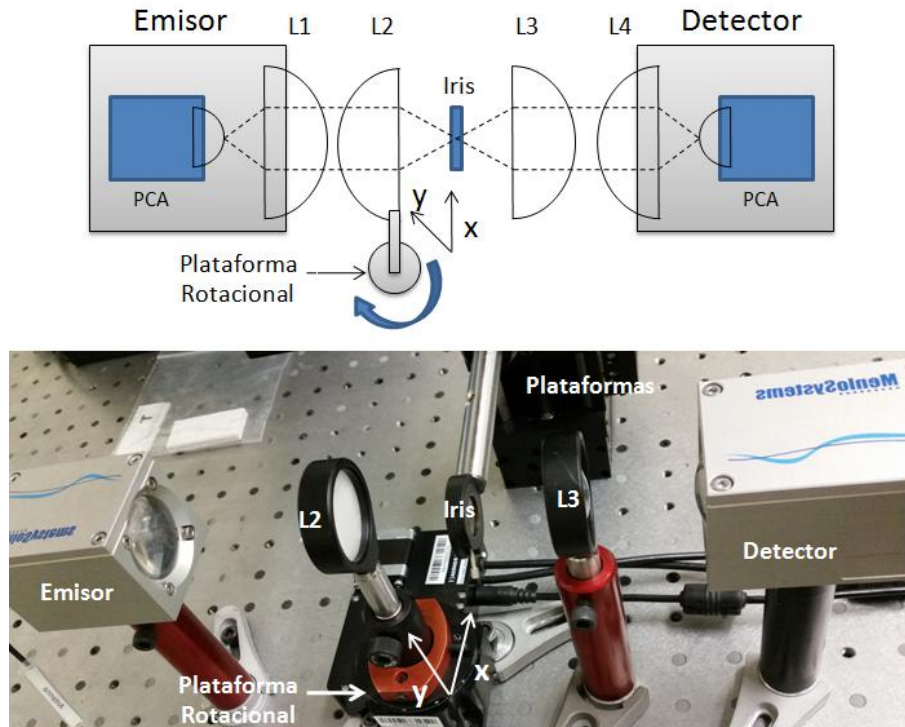


Figura 5.17: Representación esquemática del arreglo (arriba) y fotografía del arreglo (abajo) para las mediciones transversales del foco de las lentes esféricas y esféricas a diferentes ángulos. L2 es la lente a medir, el iris se utiliza para construir la imagen en eje del foco de L2 punto por punto, y L3 enfoca el haz en el detector. Se utiliza una plataforma rotatoria para girar la lente L2 y tomar mediciones a diferentes ángulos.

se realizaron las mediciones fueron de 0° a 14° con incremento de 2° . Las plataformas traslacionales se movían en dirección X e Y con un paso de 0.2mm con el objetivo de obtener la imagen transversal del foco a cada ángulo. Se puede observar la representación esquemática del arreglo y la fotografía del arreglo para las mediciones transversales del foco de las lentes esféricas y esféricas a diferentes ángulos en la Figura 5.17.

Primeramente se realizó el trazado de rayos en un programa de diseño óptico comercial (OSLO), con el objetivo de poder visualizar la representación del foco de las lentes diseñadas a distintos ángulos, y esto es posible

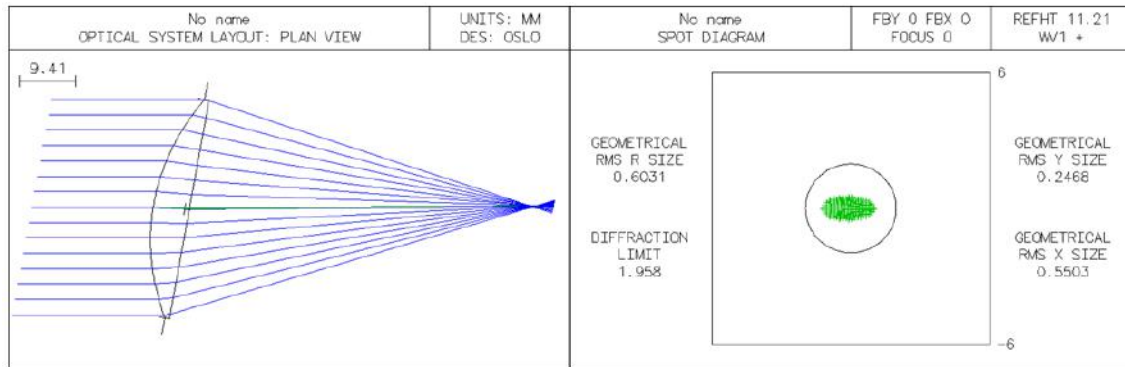


Figura 5.18: Trazado de rayos (izquierda) y diagrama de manchas (derecha) para un ángulo de 10° de la lente esférica de $f = 6$ cm.

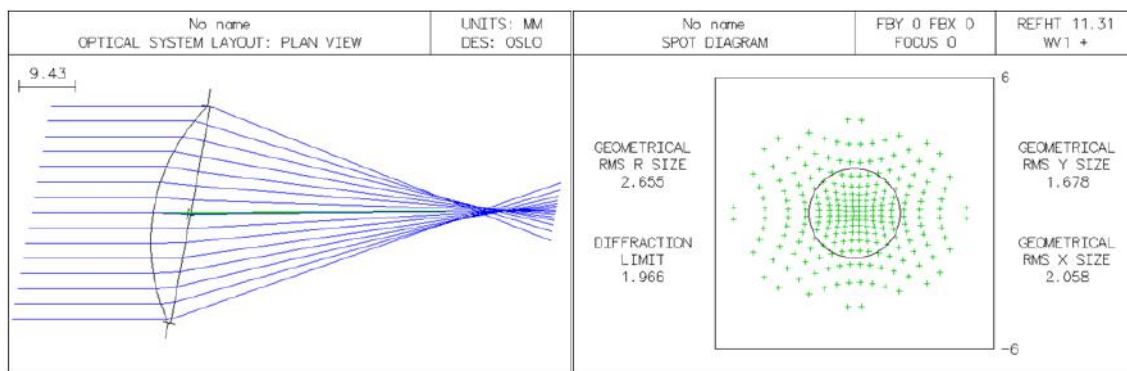


Figura 5.19: Trazado de rayos (izquierda) y diagrama de manchas (derecha) para un ángulo de 10° de la lente esférica de $f = 6$ cm.

obtenerlo con el diagrama de manchas de cada lente. Por lo que con dicho programa se determinó el diagrama de manchas teórico de la lente esférica y la lente esférica con una rotación de 10° para observar cómo debería quedar el foco con respecto al disco de Airy a ese ángulo de rotación de las lentes. Los resultados obtenidos para la lente esférica de $f = 6$ cm y para la lente esférica de la misma distancia focal se pueden observar en la Figura 5.18 y Figura 5.19 respectivamente.

Las mediciones de ambas lentes a diferentes ángulos se muestran en la Figura 5.20 a una frecuencia de 350 GHz, solamente se muestran los ángulos

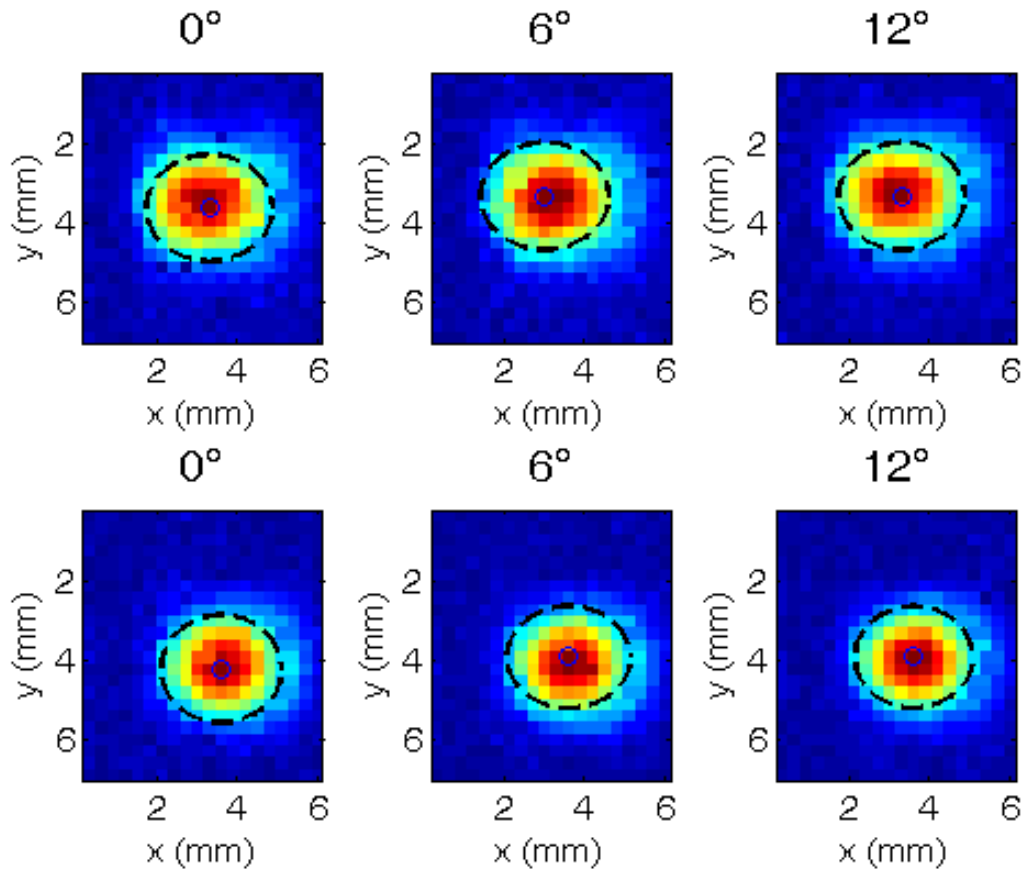


Figura 5.20: Resultados de las mediciones transversales del foco de las lentes esférica (arriba) y esférica (abajo) de $f = 6$ cm a ángulos de 0° , 6° y 12° .

0° , 6° y 12° . En las imágenes se graficaron además elipses con líneas discontinuas. Las elipses se graficaron ubicando el punto central (máxima amplitud) de las imágenes y ajustando dos gaussianas (una vertical y otra horizontal) a partir de ese punto central, con el ancho de las gaussianas se construyeron las elipses representando y cuantificando así la deformación del foco con el objetivo de determinar si la lente esférica presentaba más deformación, con respecto a la aberración de coma, que la lente esférica. Como se observa en la figura no existen diferencias cualitativas entre ambas.

Para tener un resultado cuantitativo se determinó la excentricidad, que

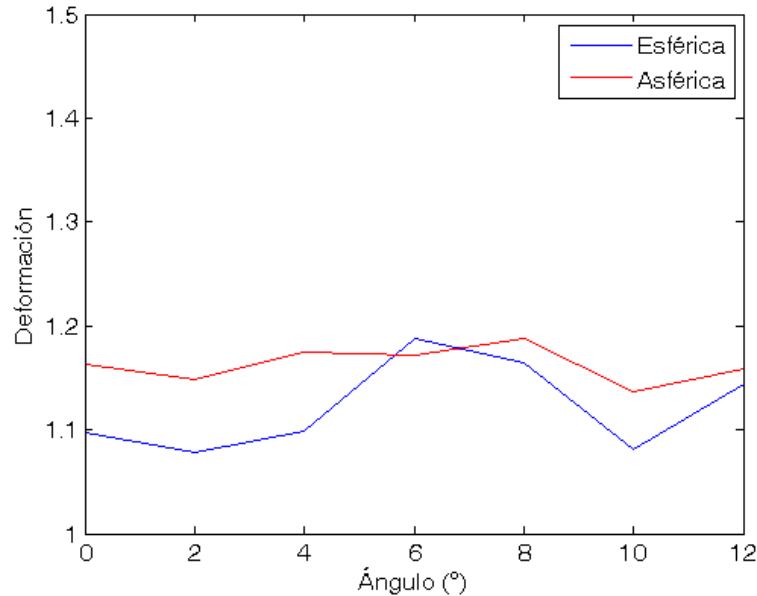


Figura 5.21: Excentricidad de la lente asférica y la esférica de $f = 6$ cm con respecto a los ángulos de rotación.

es la razón de los ejes mayor y menor de las elipses ajustadas. Se procedió a graficar la excentricidad de ambas lentes en función a los ángulos de rotación en las mediciones en la Figura 5.21. Se esperaba que la excentricidad de la lente esférica tuviera una susceptibilidad mayor al ángulo que la lente asférica, pues eso indicaría que sí presenta más coma a medida que aumenta el ángulo de rotación en las mediciones. Pero, como se puede observar en la figura, no existen grandes diferencias entre la lente esférica y la lente asférica de distancia focal igual a 6 cm. Esto puede deberse a que la diferencia entre ambos radios de curvatura es muy pequeña ($100 \mu\text{m}$), que, comparada con la longitud de onda a 1 THz ($300 \mu\text{m}$) representa la tercera parte. Además se puede suponer que por el factor de resolución en la impresora no se logró fabricar satisfactoriamente la lente asférica, pues se necesita mayor precisión para este tipo de lente.

Por lo anterior se decidió fabricar dos lentes más, una asférica y otra

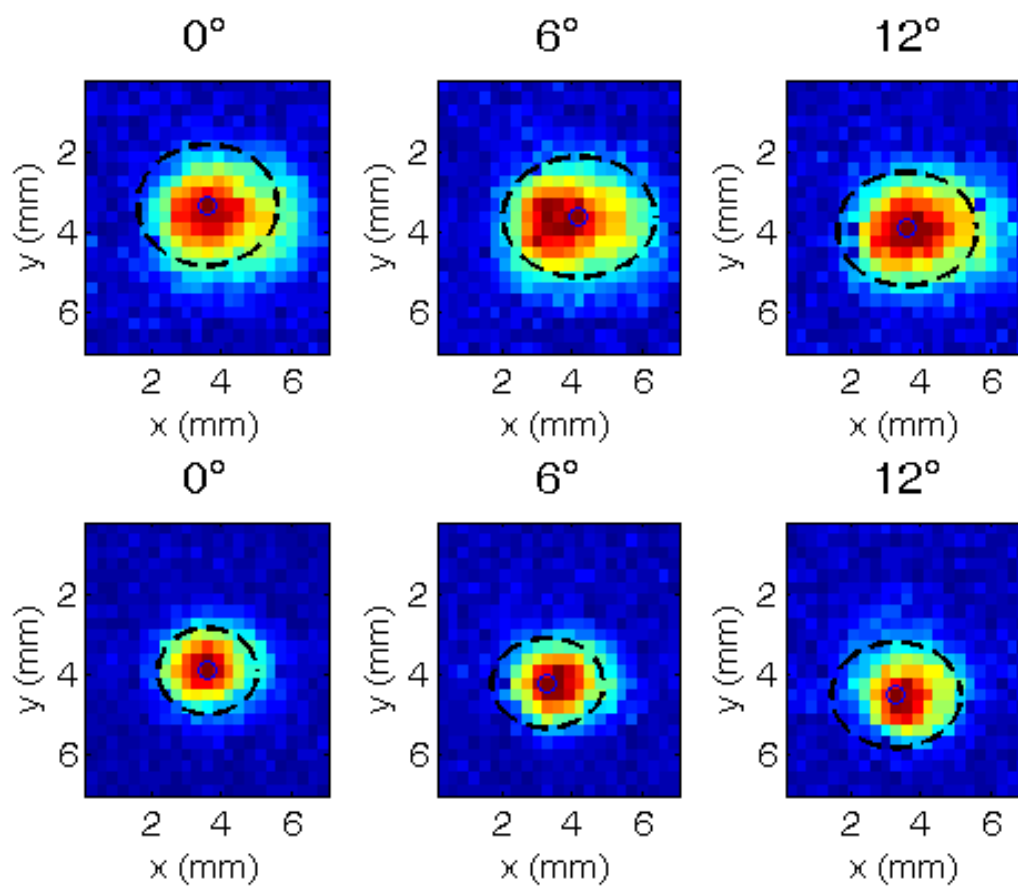


Figura 5.22: Resultados de las mediciones transversales del foco de las lentes asférica (arriba) y esférica (abajo) de $f = 3$ cm a ángulos de 0° , 6° y 12° .

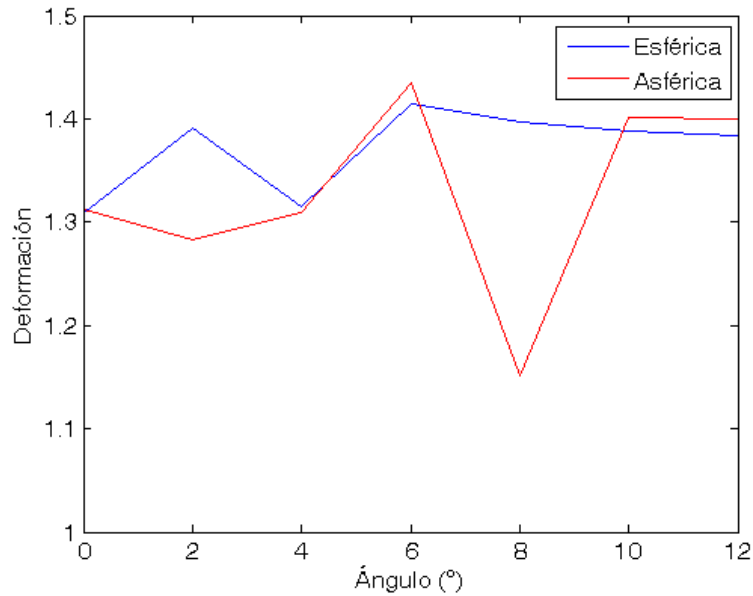


Figura 5.23: Excentricidad de la lente asférica y la esférica de $f = 3$ cm con respecto a los ángulos de rotación.

esférica de distancia focal 3 cm con lo que las diferencias dimensionales de las dos lentes son mucho mayores a la resolución de la impresora (2 mm), ver Figura 5.9. Aún así como se puede observar en las imágenes transversales del foco de las lentes a diferentes ángulos en la Figura 5.22 y en la excentricidad de las lentes en relación con el ángulo de rotación en la Figura 5.23, la deformación por coma presentadas por ambas lentes es similar. Se pudiera suponer que con una mejor resolución en la impresora se pudieran obtener resultados satisfactorios en estos casos.

Capítulo 6

Conclusiones

En esta investigación se demostró que las técnicas de impresión 3D son efectivas para la fabricación de componentes ópticos en THz. Siendo esto un resultado relevante debido a su bajo costo, versatilidad, rápida y fácil fabricación y la posibilidad de generar geometrías más complejas con respecto a las técnicas comunes de fabricación de dispositivos ópticos.

En primer lugar se fabricaron satisfactoriamente filamentos de materiales transparentes en THz, como el PS y PE, para realizar las impresiones de los componentes ópticos. Se lograron imprimir componentes ópticos con el PS pero con el PE no fue posible debido a que por su alto nivel de dificultad para impresión no se lograban fabricar componentes correctamente.

Posteriormente se expuso el diseño, la fabricación y la simulación de las rejillas de difracción y de las lentes esféricas y esféricas. Se explicaron además los arreglos utilizados para las mediciones de los diferentes dispositivos ópticos impresos, explicando su funcionamiento y mostrando los resultados experimentales obtenidos en las mediciones, obteniendo buena concordancia entre los datos teóricos planteados y los experimentales resultantes.

Los resultados planteados establecen que en frecuencias de THz las propiedades ópticas de los materiales con los que se imprimió fueron favorables, al menos para frecuencias bajas. También la resolución de impresión fue lo suficientemente buena para las longitudes de onda de interés, al menos para las lentes esféricas y las rejillas de difracción. Por lo que se puede decir que la impresión 3D es una herramienta muy útil para el prototipo de componentes ópticos.

6.1. Trabajo a futuro

Se recomienda intentar la fabricación de filamentos de mezclas de diferentes materiales transparentes en THz, con el objetivo de imprimir componentes ópticos de un material resultante de estas mezcla y probar su transparencia en THz, pues podrían ser filamentos más fáciles de imprimir y con una mayor transparencia en THz.

Se propone diseñar e imprimir componentes ópticos más complejos, como metamateriales, guías de onda, entre otros. Para ello puede ser necesario un aumento de la resolución de la impresora y esto puede ser logrado fabricando las boquillas con un orificio de diámetro menor de $400\ \mu\text{m}$. También se recomienda alcanzar mayores temperaturas con el extrusor para que puedan ser extruidos los materiales fundidos por las boquillas de menor diámetro, eso puede ser posible obteniendo un nuevo extrusor para la impresora que permita alcanzar más altas temperaturas.

Otra recomendación para lograr mejores resultados en las impresiones sería encerrar la impresora en una caja para que la impresión no sea afectada por corrientes de aire ni factores externos y también fijar la base de la

impresora a una mesa plana para que esté rígida y no exista la posibilidad de que tenga pequeños movimientos por su inestabilidad.

Bibliografía

- [1] Y.S. Lee. *Principles of Terahertz Science and Technology*. Springer, 2010.
- [2] Doc. Enrique Castro Camus. *Polarisation resolved terahertz time domain spectroscopy*. PhD thesis, University of Oxford, 2006.
- [3] Susan L. Dexheimer. *Terahertz Spectroscopy. Principles and Applications*. Taylor & Francis Group, 2008.
- [4] Ho-Jin Song and Tadao Nagatsuma. *Handbook of Terahertz Technologies. Devices and Applications*. Pan Santford Publishing, 2015.
- [5] K. F. Renk F. Klappenberger. Transient-pulse nonlinear spectroscopy with the radiation of a multimode thz gas laser. 24(9):1405–1414, 2003.
- [6] S. R. Keiding M. Schall, H. Helm. Far infrared properties of electro-optic crystals measured by thz time-domain spectroscopy. 20(4):595–604, 1999.
- [7] Jiayin Qin Dongfeng Liu. Dependence of thz time-domain spectroscopy on the crystal thickness and optical width in electro-optic sampling. 24(6):929–939, 2003.
- [8] Feng Huang Dale Gary Robert Barat Filipe Oliveira John F Federici, Brian Schulkin and David Zimdars. Thz imaging and sensing for security applications: explosives, weapons and drugs. 20(7):S266, 2005.
- [9] Hai-Bo Liu, Hua Zhong, Nicholas Karpowicz, Yunqing Chen, and Xi-Cheng Zhang. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications. 95(8):1514–1527, 2007.
- [10] Alexander M. Sinyukov Robert B. Barat Dale E. Gary Zoi-Heleni Michalopoulou John F. Federici Aparajita Bandyopadhyay, Amartya Sen-gupta. Artificial neural network analysis in interferometric thz imaging for detection of lethal agents. 27(8):1145–1158, 2006.

-
- [11] Kiwon Moon Meehyun Lim Youngwoong Do Haewook Han Hyuck Jae Choi Byung-Hyun Min Sangin Kim Ikmo Park Hanjo Lim Euna Jung, Hongkyu Park. Thz time-domain spectroscopic imaging of human articular cartilage. 33(6):593–598, 2012.
- [12] Fabio Pavanello Emilien Peytavit Mohammed Zaknoune Denis Bacquet Alexandre Beck Tahsin Akalin-Jean Francois Lampin. Guillaume Ducournau, Pascal Szriftgiser. Thz communications using photonics and electronic devices: the race to data-rate. 36(2):198–220, 2015.
- [13] John M. Cioffi Yonghoon Choi, Ji-Woong Choi. A geometric-statistic channel model for thz indoor communications. 34(7-8):456–467, 2013.
- [14] K. N. Kolesnikova D. K. Tuchina A. P. Popov A. A. Skaptsov M. M. Nazarov A. P. Shkurinov A. G. Terentyuk V. V. Tuchin A. S. Kolesnikov, E. A. Kolesnikova. Thz monitoring of the dehydration of biological tissues affected by hyperosmotic agents. 22(3):169–176, 2014.
- [15] Weiwei Yue Guozhong Zhao Cunlin Zhang Haibo Liu Xicheng Zhang Weining Wang, Haitao Yan. Thz spectrum of reduced glutathione. 48(5):585–592, 2005.
- [16] I. V. Nazarova O. A. Smolyanskaya A. A. Ezerskaya, M. K. Serebryakova. Scattering anisotropy of cellular cultures of leukemia lines in the thz frequency range. 22(3):216–218, 2014.
- [17] I. N. Smirnova A. A. Angeluts A. P. Shkurinov O. P. Cherkasova, M. M. Nazarov. Application of time-domain thz spectroscopy for studying blood plasma of rats with experimental diabetes. 22(3):185–188, 2014.
- [18] D. F. Liu and J. Y. Qin. Carrier dynamics of terahertz emission from low-temperaturegrown GaAs. *Appl. Opt.*, 42:3678–3683, 2003.
- [19] H. Nemeč, A. Pashkin, P. Kuzel, M. Khazan, S. Schnull, and I. Wilke. Carrier dynamics in low-temperature grown GaAs studied by terahertz emission spectroscopy. *J. Appl. Phys.*, 90:1303–1306, 2001.
- [20] Ronald Ulbricht, Euan Hendry, Jie Shan, Tony F Heinz, and Mischa Bonn. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy. *reviews of modern physics*. 83(2):543, 2011.
- [21] David Crawley, Christopher Longbottom, Vincent P Wallace, Bryan Cole, Don Arnone, and Michael Pepper. Three-dimensional terahertz pulse imaging of dental tissue. 8(2):303–307, 2003.

- [22] S. V. Smirnov, Ya. V. Grachev, A. N. Tsypkin, and V. G. Bespalov. Experimental studies of the possibilities of diagnosing caries in the solid tissues of a tooth by means of terahertz radiation. 81(8):464–467, 2014.
- [23] RM Woodward, VP Wallace, DD Arnone, EH Linfield, and M Pepper. Terahertz pulsed imaging of skin cancer in the time and frequency domain. 29(2-3):257–259, 2003.
- [24] Yiwen Sun Calvin Yu, Shuting Fan and Emma Pickwell-MacPherson. The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: A review of investigations to date. 2(1):33–45, 2012.
- [25] Pye RJ Cole BE Arnone DD Linfield EH Pepper M. Woodward RM1, Wallace VP. Terahertz pulse imaging of ex vivo basal cell carcinoma. 120(1):72–80, 2003.
- [26] D.D. Arnone E.H. Linfield M. Pepper R.M. Woodward, V.P. Wallace. Terahertz pulsed imaging of skin cancer in the time and frequency domain. 29(2-3):257–259, 2003.
- [27] Seung Jae Oh, Jinyoung Kang, Inhee Maeng, Jin-Suck Suh, Yong-Min Huh, Seungjoo Haam, and Joo-Hiuk Son. Nanoparticle-enabled terahertz imaging for cancer diagnosis. 17(5):3469–3475, 2009.
- [28] Luis M. Bernardoa Abilio Almeidaa Joaquim A. Moreiraa Patricia C. Lopesa Jan Macutkevici b Irmantas Kasalynas b Dalius Seliutab Ramunas Adomaviciusb Rui Henriquec Machado Lopes Faustino Wahaiiaa, Gintaras Valusisb. Detection of colon cancer by terahertz techniques. 1006(1-3):77–82, 2011.
- [29] Yiwen Sun Calvin Yu, Shuting Fan and Emma Pickwell-MacPherson. The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: A review of investigations to date. 2(1):33–45, 2012.
- [30] Yi-Xiang J Wang Anil T Ahuja Yuan-Ting Zhang Yiwen Sun, Ming Yiu Sy and Emma Pickwell MacPherson. A promising diagnostic method: Terahertz pulsed imaging and spectroscopy. 3(3):55–65, 2012.
- [31] John F Federici, Brian Schulkin, Feng Huang, Dale Gary, Robert Barat, Filipe Oliveira, and David Zimdars. Thz imaging and sensing for security applications, explosives, weapons and drugs. *Semiconductor Science and Technology*, 20(7):S266, 2005.
- [32] Wenhui Fan. Broadband terahertz spectroscopy. *Chinese Optics Letters*, 9(11):110008, 2011.

- [33] A. A. Covarrubias, E. Castro-Camus, and M. Palomar. Leaf water dynamics of *arabidopsis thaliana* monitored in-vivo using terahertz time-domain spectroscopy. 3(2910), 2013.
- [34] R. Gente, N. Born, N. Vo, W. Sannemann, J. Lon, M. Koch, and E. Castro-Camus. Determination of leaf water content from terahertz time-domain spectroscopic data. 34(3-4):316–323, 2013.
- [35] S. C. Corzo García. Diseño y construcción de un espectrómetro de thz para el estudio de la dinámica de portadores en compuestos de silicio nanoestructurado, 2011.
- [36] E Castro-Camus and MB Johnston. Conformational changes of photoactive yellow protein monitored by terahertz spectroscopy. 455(4):289–292, 2008.
- [37] Jepsen, Peter Uhd, Merbold, Hannes, et al. Investigation of aqueous alcohol and sugar solutions with reflection terahertz time-domain spectroscopy. *Optics Express*, 15(22):14717–14737, 2007.
- [38] Yomogida, Yoshiki, Sato, Yuki, Nozaki, Ryusuke, Mishina, Tomobumi, Nakahara, and Junichiro. Comparative study of boson peak in normal and secondary alcohols with terahertz time-domain spectroscopy. *Physica B: Condensed Matter*, 405(9):2208–2212, 2010.
- [39] Keiding SR. Dipole correlation functions in liquid benzenes measured with terahertz time domain spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry A*, 101(29):5250–5254, 1997.
- [40] A. I. Lobad J. L. W. Sidors S. A. Trugman R. D. Averitt, G. Rodriguez and A. J. Taylor. Nonequilibrium superconductivity and quasiparticle dynamics in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. *PHYSICAL REVIEW B*, 63, 2001.
- [41] Anca Monia Constantinescu Muneaki Hase, Masahiro Kitajima and Hrvoje Petek. The birth of a quasiparticle in silicon observed in time frequency space. *Nature*, 426:51–54, 2003.
- [42] M. S. Sherwin M. Sundaram A. C. Gossard J. Cerne, J. Kono and G. E. W. Bauer. Terahertz dynamics of excitons in GaAs/AlGaAs quantum wells. *Phys. Rev. Lett.*, 77(1131), 1996.
- [43] Nicholas Karpowicz, Hua Zhong, Cunlin Zhang, Kuang-I Lin, Jenn-Shyong Hwang, Jingzhou Xu, and X-C Zhang. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications. 86(5):054105–054105, 2005.

- [44] A. I. Hernandez-Serrano, S. C. Corzo-Garcia, E. Garcia-Sanchez, M. Alfaro, and E. Castro-Camus. Quality control of leather by terahertz time domain spectroscopy. *53:7872–7876*, 2014.
- [45] Aurle JL Adam, Paul Planken, Sabrina Meloni, and Joris Dik. Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas. *Optics Express*, 17(5):3407–3416, 2009.
- [46] JB Jackson, M Mourou, JF Whitaker, IN Duling III, SL Williamson, M Menu, and GA Mourou. Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings. *Optics Communications*, 281(4):527–532, 2008.
- [47] Kaori Fukunaga and Marcello Picollo. Characterisation of works of art. In *Terahertz Spectroscopy and Imaging*, pages 521–538. Springer, 2013.
- [48] A. M. Gmez Sepúlveda. Aplicacin de la técnica de terahertz para la obtención de imágenes y análisis espectroscpicos de pintura de caballete. evaluación de una técnica de análisis no invasivo., 2015.
- [49] A. D. Squires, E. Constable, and A. Lewis. 3d printed terahertz diffraction gratings and lenses. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 36(1):72–80, 2015.
- [50] A. Pavolotsky, D. Meledin, C. Risacher, and and V. Belitsky M. Pantaleev. Micromachining approach in fabricating of thz waveguide components. *Microelectronics Journal*, 36(7):683–686, 2005.
- [51] Yat Hei Lo and Rainer Leonhardt. Aspheric lenses for terahertz imaging. *Optics Express*, 16(20):15991–15998, 2008.
- [52] E. Bonnetb A.V. Tishchenkob O. Parriauxb J.-L. Coutaza, F. Gareta and M. Nazarovc. Grating diffraction effects in the thz domain. *Acta Physica Polonica A*, 107(1):26–37, 2005.
- [53] Joan Horvath. *Mastering 3d printing*. Apress, 2014.
- [54] Rich Cameron Joan Horvath. *The New Shop Class*. Apress, 2015.
- [55] Charles Bell. *3D Printing with Delta Printers*. Apress, 2015.
- [56] Janelle Schrot, Todd Pietila, and Anurag Sahu. State of the art: 3d printing for creating compliant patient-specific congenital heart defect models. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 16(1):W19, 2014.

-
- [57] Yong He, Jingjiang Qiu, Jianzhong Fu, Jiong Zhang, and An Liu Yina Ren. Printing 3d microfluidic chips with a 3d sugar printer. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2015.
- [58] Barbara Leukers, Hülya Gülkan, Stephan H. Irsen, Stefan Milz, Carsten Tille, and Hermann Seitz Matthias Schieker. Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3d printing. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 16(12):1121–1124, 2005.
- [59] Sebastian Tremel and Klaus Henke. Wood based bulk material in 3d printing processes for applications in construction. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(1):139–141, 2012.
- [60] Min-Saeng Kim, Won-Shik Chu, Yun-Mi Kim, and Sung-Hoon Ahn Adrian Paulo Garcia Avila. Direct metal printing of 3d electrical circuit using rapid prototyping. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10(5):147–150, 2009.
- [61] Jing Liu and Lei Wang. Liquid phase 3d printing for quickly manufacturing conductive metal objects with low melting point alloy ink. *Science China Technological Sciences*, 57(9):1721–1728, 2014.
- [62] *Terahertz Optoelectronics*, chapter Terahertz Time-Domain Spectroscopy. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [63] A. Yariv and P. Yeh. *Optical waves in crystals: Propagation and control of laser radiation*. Wiley inter-science, 2003.
- [64] Grant R. Fowles. *Introduction to modern optics.*, volume 2. Dover Publications, 1975.
- [65] D. H. Auston and M. C. Nuss. Electrooptic generation and detection of femtosecond electrical transients. *IEEE J. Quantum Electron*, 24:184–197, 1988.
- [66] Bradley Ferguson and Xi-Cheng Zhang. Materials for terahertz science and technology. *Nature Materials*, 1:26–33, 2002.
- [67] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith. Picosecond photoconducting hertzian dipoles. *Applied Physics*, 45:284–286, 1984.
- [68] P. R. Smith, D. H. Auston, and M. C. Nuss. Subpicosecond photoconducting dipole antennas. *IEEE J. Quantum Electron.*, 24:255–260, 1988.

-
- [69] P. U. Jepsen, R. H. Jacobsen, and S. R. Keiding. Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas. *J. Opt. Soc. Am. B*, 13:2424–2436, 1996.
- [70] KA McIntosh, KB Nichols, S Verghese, and ER Brown. Investigation of ultrashort photocarrier relaxation times in low-temperature-grown gaas. *Applied physics letters*, 70(3):354–356, 1997.
- [71] D. Grischkowsky, S Keiding, M. Exter, and Ch. Fattinger. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors. *Journal of the Optical Society of America*, 7(10):2006–2015, 1990.
- [72] John David Jackson and John D Jackson. *Classical electrodynamics*, volume 3. Wiley New York etc., 1962.
- [73] F Garet L Duvallaret and J L Coutaz. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy. *Applied Optics*, 38:409–415, 1999.
- [74] Adrian Bowyer. Reprap, 2015.
- [75] Makermex, 2015.
- [76] M. Fey F. Schäfer T. Probst S. F. Busch, M. Weidenbach and M. Koch. 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*, 35:993–997, 2014.
- [77] Karl Dieter Möller. *Optics. Second Edition*. Springer, 2007.
- [78] Eugene Hecht. *Optics. Fourth Edition*. Addison Wesley, 2002.
- [79] Germain Chartier. *Introduction to Optics*. Springer, 2005.
- [80] Keigo Iizuka. *Engineering Optics. Third Edition*. Springer, 2008.
- [81] Camilo Valencia. Datos del diseño óptico de lentes esféricas.