

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería Mexicali

Ingeniería en Mecatrónica



# **DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ÓPTICO PARA CORTE DE ACRÍLICO Y MDF UTILIZANDO LUZ INFRARROJA**

Tesis que presenta para obtener el Título Profesional de Ingeniero en Mecatrónica

**Jose Guadalupe Rodriguez Casarez**

**Matrícula: 1156525**

**Directora**

**Dra. Rosa Citlalli Anguiano Cota**

Mexicali, Baja California México

2023

**DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN  
DE UN SISTEMA ÓPTICO PARA CORTE DE  
ACRÍLICO Y MDF UTILIZANDO LUZ  
INFRARROJA**

## Dedicatoria

Lleno de agradecimiento primeramente quiero dedicar este proyecto a Dios, por su presencia, permitirme y regalarme los dones junto a todo lo necesario para poder lograr el desarrollo deseado durante mi carrera universitaria.

También quiero dedicarle este proyecto a toda mi familia que me apoyó durante mi desenvolvimiento como profesionista.

Me gustaría dedicarle este proyecto a mi mejor amiga, quien fue acompañante y en ocasiones soporte durante esta etapa de mi vida.

También quiero dedicar este proyecto a mis auxiliares de grupo y amigos del Bosco, quienes han contribuido en un proceso a nivel espiritual, que sirvió como impulso y a su vez soporte indirecto en mi etapa universitaria.

Por último pero no menos importante me gustaría dedicarle este proyecto a mi directora de tesis Dra. Rosa Citlalli Anguiano Cota y al padrino de generación M.I. Javier Colado Basilio, por haber sido docentes quienes me han impulsado a querer aprender más en distintas áreas además de ser gran inspiración para realización de proyecto.

## Resumen

Actualmente dentro de la industria manufacturera, se ha comenzado a implementar la óptica para mejorar sus procedimientos, por ejemplo, tener tiempos de producción más cortos o automatizar algunos procesos, obteniendo así una mejor precisión y exactitud al momento de elaborar distintos productos o piezas. En el mecanizado de piezas se utiliza el corte por plasma o corte por láser, estas técnicas tienen áreas de oportunidad que se deben tomar en cuenta, tal como podría ser el que no funcionen con cierto tipo de material o bien que podrían requerir bastante consumo de energía para su uso. Se tiene como propuesta una lámpara de cuarzo tungsteno halógeno (QTH) junto al diseño de un arreglo óptico adecuado, se puede alcanzar el objetivo de realizar un corte en forma y tamaño similar a los dos tipos de corte anteriormente mencionados. Se obtuvo como resultado que el material acrílico fue necesario que estuviera pintado de color negro para el aprovechamiento de calor, no obstante, el material MDF no necesitó de algún cambio debido a sus propiedades orgánicas se aprovechaba el calor lo suficiente.

## Abstract

Nowadays Optic is getting into industry as a form for improvement in the processes, for example reducing time in production or autonomous process, this way we have more precision factoring products or pieces. Machining pieces uses plasma or lasers as a better alternative, otherwise these techniques have some issues that we should consider, like they aren't for any material or they take a lot of energy to work. As a proposal we have a quartz tungsten halogen lamp with the right optical system, it can achieve a cut similar to plasma or lasers. As a result the system worked, although we had to paint acrylic for a better performance, in case of MDF we didn't need any change because of its organic properties.

# Índice

<b>Capítulo 1 Introducción</b>	<b>6</b>
<b>Capítulo 2 Fundamento teórico</b>	<b>8</b>
2.1 Espectro electromagnético	8
2.2 Ley de la reflexión	10
2.3 Ley de la refracción	11
2.4 Fuentes de luz	14
2.5 Espejos	14
2.6 Lentes	15
2.6.1 Lentes convergentes	16
2.6.2 Lentes divergentes	16
2.7 Fotometría	17
2.8 Radiometría	18
2.9 Formas de conducción de calor	19
2.9.1 Conducción	20
2.9.2 Radiación	20
2.9.3 Convección	21
<b>Capítulo 3 Diseño de sistema óptico</b>	<b>23</b>
3.1 Cálculos de parámetros ZEMAX	24
3.2 Cálculos de irradiancia necesaria	25
3.3 Simulación del sistema óptico A	25
3.4 Simulación del sistema óptico B	27
3.5 Diseño de soportes para las lentes	28
<b>Capítulo 4 Resultados experimentales</b>	<b>33</b>
4.1 Resultado experimental del sistema óptico B con el material acrílico	34
4.2 Resultado experimental del sistema óptico B con el material MDF	43
4.3 Resultado experimental del sistema óptico A con el material acrílico y MDF	45
4.4 Resultado con cámara termográfica del sistema óptico B	47
4.5 Resultado con cámara termográfica del sistema óptico A	49
4.6 Propuesta final	51
<b>Capítulo 5 Conclusiones</b>	<b>53</b>
5.1 Trabajos futuros	54
<b>Referencias</b>	<b>55</b>

# Capítulo 1 Introducción

Dentro de la rama de la ingeniería las máquinas herramientas han sido parte fundamental para la manufactura de distintos productos con el avance de la tecnología se han mejorado estos procesos, por ejemplo, tenemos la automatización que por medio de una máquina CNC se realizan los cortes necesarios para una pieza sin que el usuario se encuentre manipulando directamente la máquina a utilizar, de esta forma existe un ahorro de tiempo y se logra una mayor precisión en los mismos cortes.

Sustituyendo la herramienta de corte convencional por plasma o un haz láser se obtienen resultados con mejores tiempos y de mayor calidad, cabe mencionar que al utilizar plasma o láser existe un desgaste menor hacia las máquinas herramientas que participan en el proceso. Este proyecto busca una propuesta que pueda alcanzar resultados que sean cercanos a lo que se logra utilizando corte por plasma o por láser, como lo es corte y/o perforación de placas no metálicas.

De acuerdo con Ortiz (2021) el corte por plasma consiste en elevar la temperatura del material por encima de los 20, 000°C, para ello existe una acción térmica y mecánica de gas calentado por un arco eléctrico de corriente continua establecido entre un electrodo de la pieza a maquinar y la antorcha. El punto débil de este proceso es el uso del electrodo, lo que no permite que pueda ser utilizado para otros materiales no metales.

Una CNC láser proyecta un haz láser que choca con un material, de esta manera se alcanzan altas temperaturas lo que permite que exista una amplia gama de materiales donde se puedan utilizar, además de que el resultado obtenido es de alta calidad (Salvador, 2019). Cabe mencionar que las CNC laser suelen consumir bastante energía según sea el proceso a realizar.

La radiación IR, también llamada infrarrojo es lo que se percibe como calor. Jenkins y otros (2019) afirman que existen distintas fuentes de radiación IR que logran alcanzar las temperaturas necesarias para realizar un corte, la que se tendrá a prueba para este proyecto será la lámpara de halógeno cuarzo de tungsteno (QTH), esta fuente de radiación ha sido aplicada en proceso de manufactura, tales como: soldadura, fabricación de conductores cubiertos, procedimientos térmicos, formación de acero de alta resistencia, etc.

El objetivo de esta tesis es el diseñar un sistema óptico que guíe y concentre la luz proveniente de una lámpara infrarroja para ser aplicado para corte o perforación de materiales no metálicos, tales como madera y plástico, como alternativa al uso de láser y plasma.

Para dicho objetivo se necesita conocer el espectro electromagnético, junto a las leyes de refracción y reflexión, puesto que para un sistema óptico se requiere de lentes junto a una fuente de luz, la cual utiliza reflectores.

Se realizaron los diseños de los soportes del sistema óptico con el software de SolidWorks, estos fueron impresos de material PLA, se montaron en carritos 3 los cuales están sobre un riel, una vez el sistema óptico diseñado, posteriormente alineado se procedió a realizar las pruebas con los materiales acrílico y MDF.

Para cada material se requiere alcanzar una temperatura diferente, por sus distintas características que presentan, es necesario mencionar que el acrílico presenta propiedades similares al vidrio, lo que obliga a que se tenga un tratamiento antes de utilizarlo y en el caso del MDF por sus propiedades orgánicas fue más sencillo obtener el resultado esperado.

Se realizaron dos propuestas de sistemas ópticos, ambos con los resultados esperados sin embargo fue necesaria una propuesta teórica final que enfoca de mejor manera el haz de luz infrarroja, por lo tanto un menor tiempo al lograr el objetivo.

# Capítulo 2 Fundamento teórico

## 2.1 Espectro electromagnético

StudySmarter (s.f.) establece que en el momento que un electrón se encuentra en movimiento produce efectos que son parte eléctricos y parte magnéticos. Estas ondas al ser producida por fluctuaciones en los campos magnéticos y eléctricos reciben el nombre de ondas electromagnéticas. Se ha determinado que la luz visible, los rayos infrarrojos, y los ultravioleta también está constituido por ondas electromagnéticas.

Pérez (2012) define a James Clerk Maxwell como el primer científico en proponer la naturaleza electromagnética de la luz, para eso Maxwell consideró: “Así como un campo magnético variable genera un campo eléctrico, también es posible que un campo eléctrico variable produzca uno magnético. De tal manera que se produzca una perturbación electromagnética siendo uno generador del otro”. La velocidad de la propagación de las ondas electromagnéticas es de 300 mil km/s, lo que es equivalente a la velocidad de la luz. Por lo tanto, pudo proponer que la luz está formada por ondas electromagnéticas, las cuales se pueden propagar por el vacío sin necesidad de un medio material.

El espectro electromagnético está constituido por distintos tipos de radiación con distintas longitudes de onda por ende distinta frecuencia. A continuación, se muestra la tabla 2.1 donde podemos observar la clasificación del tipo de radiación por longitud de onda y frecuencia.

Tabla 2.1 Longitudes de onda y frecuencia del espectro electromagnético. Perez (2012)

Tipo de radiación	Frecuencia (en ciclos/s)	Longitud de onda en el vacío (m/ciclo)
Rayos gamma	Mayor que $1 \times 10^{18}$	Menor que $1 \times 10^{-10}$
Rayos X	Mayor que $3 \times 10^{16}$	Menor que $1 \times 10^{-8}$
Rayos ultravioletas	De $8 \times 10^{14}$ a $3 \times 10^{16}$	De $1 \times 10^{-8}$ a $3.8 \times 10^{-7}$
Rayos de luz visible	De $4 \times 10^{14}$ a $8 \times 10^{14}$	De $3.8 \times 10^{-7}$ a $7.5 \times 10^{-7}$
Rayos infrarrojos	De $3 \times 10^{11}$ a $3 \times 10^{14}$	De $7.5 \times 10^{-7}$ a $1 \times 10^{-3}$
Ondas de radio y microondas	Menor que $1 \times 10^{13}$	Varía de algunos milímetros a algunos hasta miles de metros por ciclo

De acuerdo con Pérez (2012) las ondas de radio son utilizadas para transmitir señales a grandes distancias, son las de menor frecuencia y son producidas por electrones que oscilan en una antena, la frecuencia de estas ondas puede variar de acuerdo a la estación transmisora.

Se dividen en:

- VLF (muy bajas frecuencias)
- LF (bajas frecuencias)
- MF (frecuencias medias)
- HF (altas frecuencias)
- VHF (muy altas frecuencias)
- UHF (ultra altas frecuencias)

Pérez (2012) nos indica que las microondas se utilizan para calentar los alimentos en un horno de microondas sin que se llegue a perder el sabor y la consistencia, esto es debido a que las microondas hacen vibrar por resonancia a las moléculas de agua presentes en los alimentos, estas moléculas absorben la energía, lo que permite elevar la temperatura. También son utilizadas para transmisiones telefónicas o de televisión vía satélite.

Hecht, (2000) nos explica que la región del infrarrojo se extiende aproximadamente desde  $3 \times 10^{11}$  Hz hasta alrededor de  $4 \times 10^{14}$  Hz, esta banda de radiación electromagnética se encuentra justo por debajo de la roja. El IR se suele dividir en:

- IR cercano (780-3,000 nm)
- IR intermedio (3,000-6,000 nm)
- IR lejano (6,000-15,000 nm)
- IR extremo (15, 000 nm-1.0 mm)

Hecht (2000) postula *“En efecto cualquier material irradiará o absorberá luz infrarroja por agitación térmica de las moléculas que lo constituyen”*. La radiación IR es aquella radiación que se percibe como calor y es emitida por cualquier cuerpo que tenga una temperatura mayor 0 K.

NASA (2020) asegura que la luz visible son los rayos del espectro electromagnético que puede percibir el ojo humano, contiene indicios científicos que permiten conocer propiedades ocultas de los objetos, a pesar de que el ojo humano no pueda detectar estas propiedades por su baja sensibilidad, existen equipos científicos si pueden hacerlo.

Por dar ejemplos tenemos su composición, la atmosfera al tener alto contenido de nitrógeno se puede observar de color azul, en el momento en el que el haz del sol baja las longitudes de onda recorren más atmosfera lo que permite observar longitudes de onda más largas tal como el rojo o el amarillo, es por eso que se pueden visualizar atardeceres tan espectaculares. (NASA, 2020)

NASA (2020) también menciona que de acuerdo a la temperatura podemos visualizar cierto color, tal es el caso de una flama que al momento de aumentar la temperatura observamos como esta cambia de color amarilla o color azul. El espectro visible ayuda a estudiar los cambios que ocurren en la Tierra.

Hecht (2000) expone que la luz ultravioleta es emitida por el sol y puede causar quemaduras en la piel sin tener la necesidad de calentarla, de esta forma se quema la piel en un día frío o nublado. Dentro de las aplicaciones de la luz ultravioleta ha sido en lámparas de ultravioleta para secar o desinfectar áreas.

Pérez (2012) presenta que los rayos X se generan cuando un electrón se encuentra a muy alta velocidad en el vacío y este es frenado al chocar bruscamente por un obstáculo. Lo que provoca una pérdida de energía; energía que se convierte en rayos X. Son utilizados para realizar radiografías de huesos y órganos internos. Inclusive se usa para destruir células cancerosas sin embargo se debe evitar una exposición prolongada y no controlada debido a que causa daños a las células reproductoras que controlan la herencia, por lo tanto, los hijos de las personas expuestas pueden presentar defectos orgánicos.

Pérez (2012) declara que los rayos gamma son producidos durante las transformaciones nucleares, suelen ser utilizados para el tratamiento de algunas células cancerosas y su manejo debe ser muy cuidadoso junto a un equipo especial.

## 2.2 Ley de la reflexión

Cuando un haz de luz incide sobre una superficie de un cuerpo u objeto, esta es reflejada total o parcialmente en todas direcciones. Si la superficie es lisa los rayos son reflejados en un solo sentido y dirección (Malacara, 2015).

Pérez (2012) enuncia que las leyes propuestas por Descartes son las siguientes:

- El rayo de luz incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en un mismo plano.
- El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

En la figura 2.1 podemos observar como un haz o rayo de luz incide en una superficie con un ángulo  $\theta$  con respecto a la normal y este es reflejado con un ángulo  $\alpha$ .

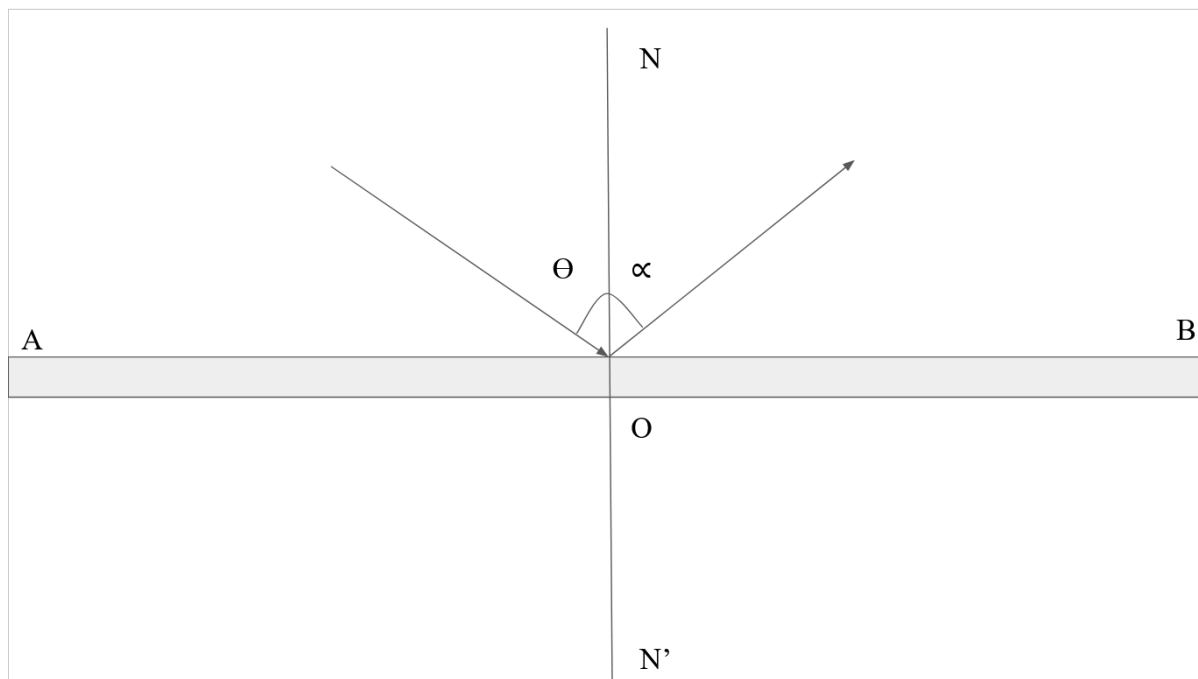


Figura 2.1 Representación gráfica de la ley de la reflexión.

## 2.3 Ley de la refracción

Pérez (2012) sugiere que la ley de refracción consiste en la desviación que sufre el haz de luz cuando llega a una superficie de separación en dos medios de diferente densidad. La refracción de la luz es causada por la diferencia en la magnitud de la velocidad de la luz al entrar a un medio con una densidad diferente.

- Primera ley: “El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran siempre en el mismo plano”.
- Segunda ley: “Para cada par de medios transparentes, la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el ángulo de refracción, tiene un valor constante que recibe el nombre de índice de refracción”.

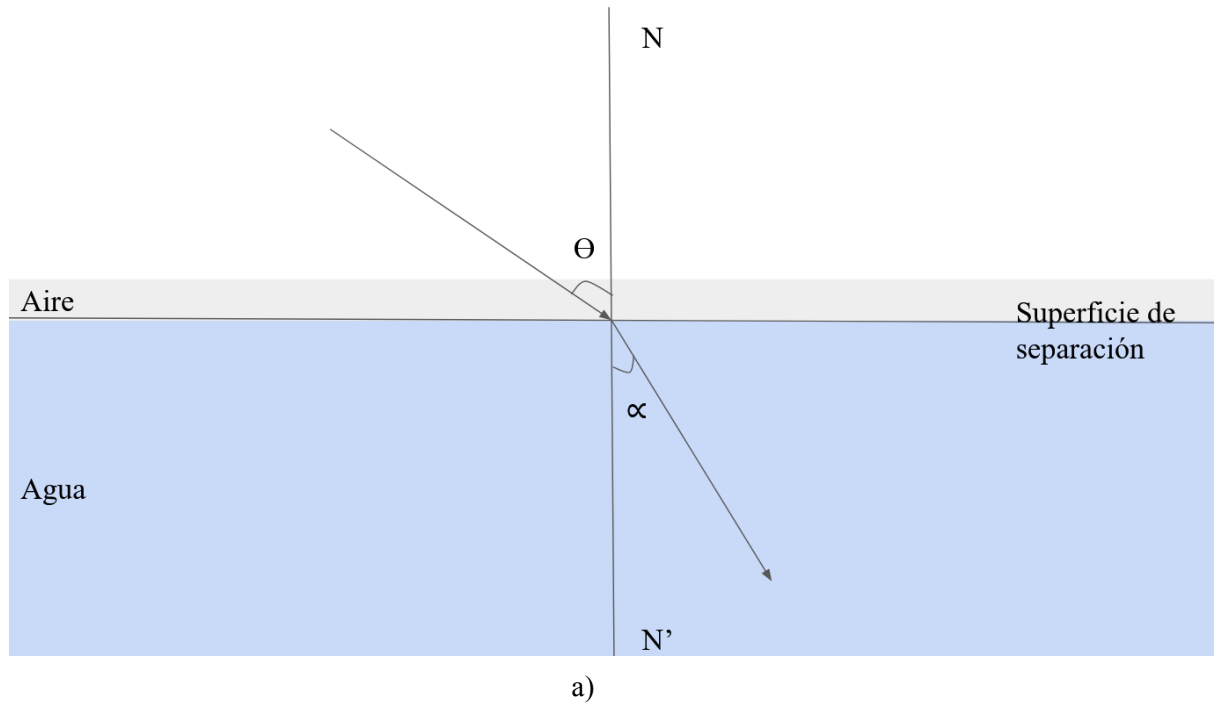
$$n = \sin(\alpha) / \sin(\Theta) \quad (1)$$

Valenzuela (s.f.) nos propone como Ley de Snell: “La refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda cuando pasa de un medio a otro”.

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \Theta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

La velocidad de la luz tiene una magnitud de 300 mil km/s en el vacío, mientras que en el aire tiene una magnitud de 299 030 km/s. El índice de refracción del medio es la relación que existe entre las magnitudes de las velocidades de la luz en el medio y en el vacío. (Pérez, 2012)

En la figura 2.2 a) podemos observar la ley de refracción, cuando pasa un rayo de luz de un medio menos denso a uno más denso, se acerca de la normal; la figura 2.2 b) muestra cuando un rayo de luz pasa de un medio más denso a otro menos denso, se aleja de la normal. En la tabla 2.2 nos muestra algunos medios junto a su índice de refracción del medio.



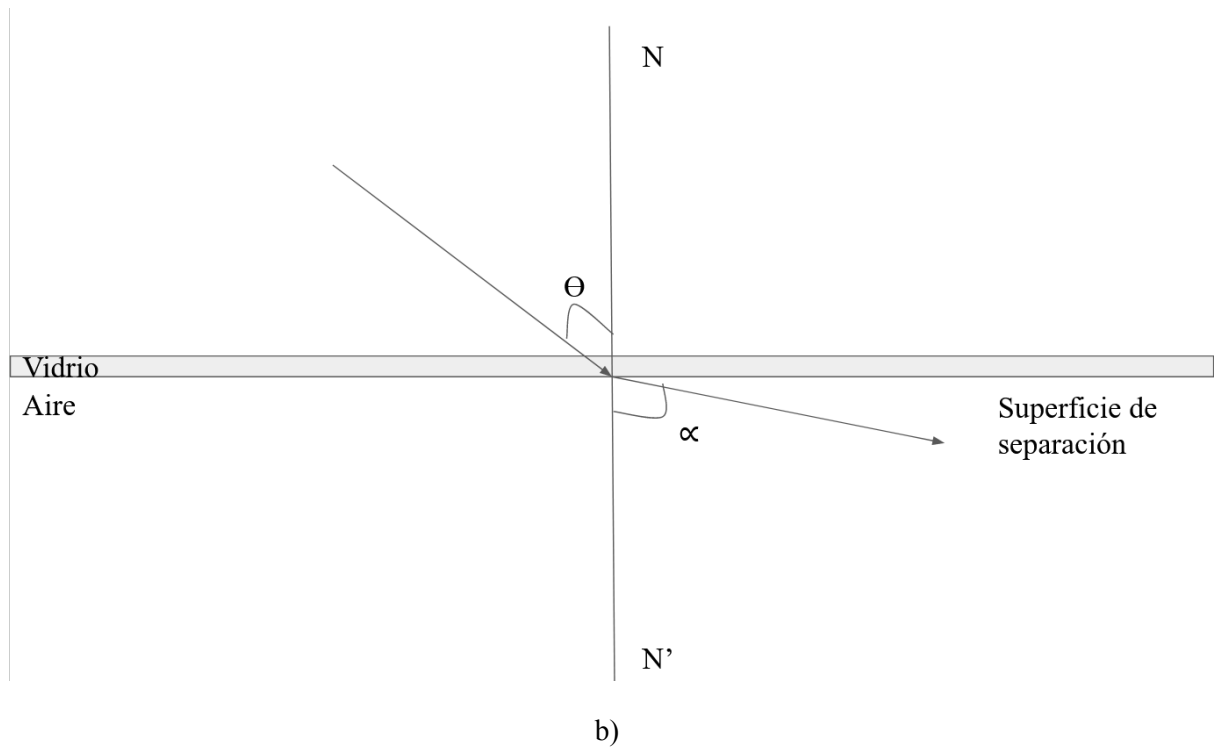


Figura 2.2 Ley de refracción a) El rayo de luz pasa a un medio más denso se acerca a la normal.

b) El rayo de luz pasa a un medio menos denso, se aleja de la normal.

Tabla 2.2 Índices de refracción del medio. Pérez (2012)

Medio	Índice refracción (n)
Aire	1.0030
Agua	1.3300
Alcohol	1.3600
Vidrio	1.5000
Diamante	2.4200
B270	1.5230
BK7	1.5168
SiO <sub>2</sub>	1.4570

## 2.4 Fuentes de luz

Un diodo emisor de luz (LED) es una fuente continua de luz, con un encapsulado en forma de domo que actúa como lente, al momento de aplicarle un voltaje al semiconductor, a este efecto se le conoce como electroluminiscencia. De acuerdo con el semiconductor que sea fabricado, será el color de la luz (Visual Led, s.f.).

Carillo y Monroy (2009) exponen que las lámparas QTH cuenta con un filamento de tungsteno en gas inerte con una pequeña cantidad de halógeno al cual cuando se le aplica una corriente eléctrica el filamento se calienta lo que produce una luz visible incandescente y emite radiación infrarroja. Un detalle sobre estas lámparas es que solo usan el 9% de la energía producida. Las lámparas trabajan con una longitud de onda de 390 nm a 500 nm.

Un láser produce un haz de luz estrecho en el cual las longitudes de ondas son muy similares y los picos se encuentran alineados o en fase, por lo tanto, se puede concentrar mucha energía en un pequeño punto. El láser al ser una luz colimada de alta potencia puede viajar grandes distancias a diferencia de una lámpara incandescente (NASA, 2021).

Pérez (2012) nos presenta que para producir un láser se requiere que exista una inversión de población, es decir tener el mayor número posible de electrones en estado metaestable, este proceso es conocido como bombeo óptico. El estado metaestable es un nivel de energía medio que existe dentro del rubí utilizado para producir el láser.

Los láseres tienen distintas aplicaciones tal como herramienta de corte para metales gruesos o diamantes, también suelen ser utilizados para cirugías, esto debido a que cuentan con una mayor precisión. Otras aplicaciones son las impresoras láser, reproductores de DVD, escáner de código de barras, etc (NASA, 2021).

## 2.5 Espejos

Son superficies que reflejan los haces de luz, como ejemplo se encuentran una pieza de vidrio negro o una superficie metálica finamente pulida. Son particularmente utilizados en las regiones de rayos X, infrarrojo y ultravioleta del espectro, tiempo atrás los espejos se creaban por medio de un recubrimiento de plata en el vidrio, por su alta eficacia en las regiones UV e IR (Benatti, Rojas & Pricco, 2020).

Hecht (2000) nos dice que los espejos planos pueden recubrirse en la superficie frontal o posterior. Para uso cotidiano se suele recubrir la parte posterior porque permite que el cristal protege la parte reflectiva metálica, en cambio para su uso técnico se recubre la superficie frontal.

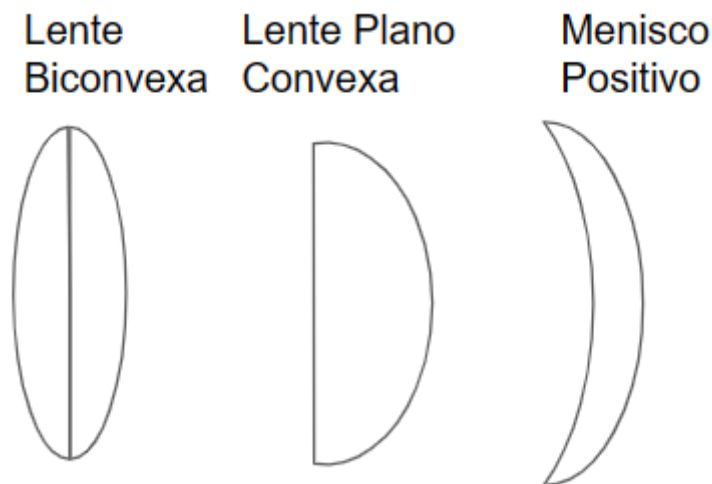
Los espejos esféricos forman imágenes similares al de las lentes o superficies refractoras curvas desde la antigua Grecia. Para determinar la configuración de un espejo debe tener como fin de que una onda plana se reforme bajo reflexión en una onda esférica convergente (Hecht, 2000).

Los espejos esféricos consisten en media esfera hueca la cual refleja los rayos de luz que inciden sobre la superficie. Suelen ser cóncavos si la superficie reflectora es la interior y convexos si la superficie reflectora es la exterior (Pérez, 2012).

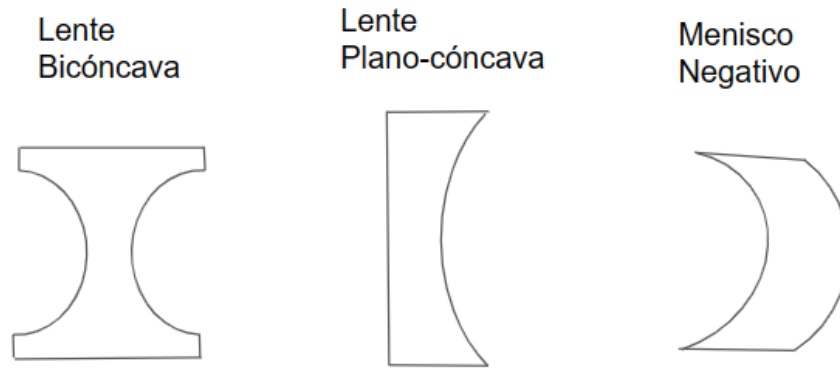
## 2.6 Lentes

Se le denomina lente al cuerpo transparente limitado por dos superficies esféricas por una superficie esférica y una plana. Tienen el fin de desviar los rayos luminosos con base en las leyes de refracción (Pérez, 2012). También puede definirse como un dispositivo refractor que reconfigura la distribución de energía emitida (Hecht, 2000).

Pérez (2012) asegura que cuando un haz de luz pasa en una lente convergente de forma paralela por su eje principal, este al refractarse pasará por el foco principal, este tipo de lentes se muestra en la figura 2.3 a); en cambio con una lente divergente cuando un haz de luz pasa de forma paralela a su eje principal, al refractarse se separará como si procediera de un foco, la figura 2.3 b) nos permite observar este tipo de lentes.



a)



b)

Figura 2.3 Lentes a) convergentes b) divergentes.

### 2.6.1 Lentes convergentes

Tienen la característica de que su espesor va disminuyendo del centro hacia los bordes, por lo tanto, su centro es más grueso que sus orillas. Debido a su forma desvía el haz de luz hacia el eje permitiendo que el haz pueda converger en un punto llamado foco. El comportamiento de los rayos de luz los podemos visualizar en la figura 2.4 (Pérez, 2012).

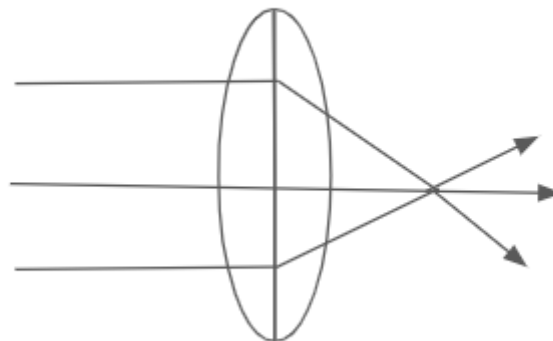


Figura 2.4 Comportamiento de los haces de luz al refractarse en una lente convergente.

### 2.6.2 Lentes divergentes

Tienen la característica de que su espesor va disminuyendo de los bordes hacia el centro, por lo tanto, sus extremos son más gruesos. Debido a su forma desvían el haz de luz fuera del eje óptico. El comportamiento de los rayos de luz los podemos visualizar en la figura 2.5 (Pérez, 2012).

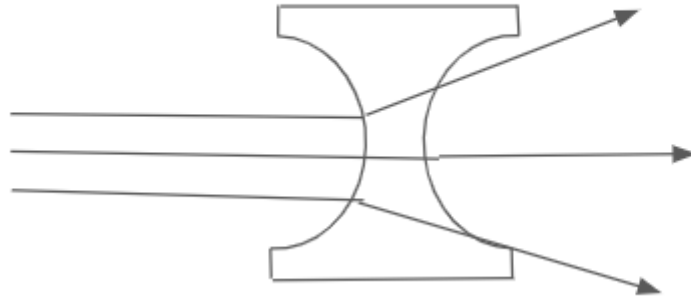


Figura 2.5 Comportamiento de los haces de luz al refractarse en una lente divergente.

Gómez (2018) argumenta que la ecuación del fabricante de lentes nos permite calcular la distancia focal de una lente, la distancia focal es la distancia a la cual se forma la imagen, la distancia focal puede ser positiva para lentes convergentes y negativa para lentes divergentes.

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

dónde:

$f$  es la distancia focal de la lente.

$R_1$  es el radio de la superficie 1.

$R_2$  es el radio de la superficie 2.

$n$  es el índice de refracción de la lente.

## 2.7 Fotometría

Campos & Pons (s.f.) Explican que la fotometría es el estudio de las propiedades psicofísicas del espectro electromagnético, lo que es visible al ojo humano, hace referencia a la luz visible. La fotometría se define en términos de la percepción humana. Las magnitudes fotométricas surgen de la necesidad de evaluar la cantidad de luz en un ambiente visual.

Existen cuatro unidades dentro del área fotométrica, las cuales son:

- Flujo luminoso: Es la cantidad de luz por unidad de tiempo que emite una fuente de radiación en todas las direcciones del espacio, es medida en lúmenes ( $lm$ ).
- Intensidad luminosa: Es la cantidad de flujo luminoso emitido en una dirección determinada por el ángulo sólido, es medida en candelas ( $cd$ ).

- Iluminancia: Es la cantidad de flujo luminoso concentrada sobre una superficie. Es la magnitud análoga de la irradiancia, es medida en lux ( $lx$ ).
- Luminancia: Es la cantidad de flujo luminoso emitida en una dirección por unidad de ángulo sólido ( $cd/m^2$ ).

## 2.8 Radiometría

Campos & Pons (s.f.) explican que la radiometría es el estudio de la radiación electromagnética se ha mencionado que es el complemento de la óptica geométrica porque aporta la evaluación energética de la radiación. Las magnitudes radiométricas surgen como respuesta a la necesidad de evaluar la potencia óptica.

Dentro del área radiométrica existen cuatro unidades:

- Flujo radiante: Es la cantidad de energía radiante emitida por una fuente, recibida en una superficie o transmitida por un medio, es medido en watts ( $w$ ).
- Intensidad radiante: Es la cantidad de flujo radiante emitido por una fuente por unidad de ángulo sólido en una dirección dada ( $w/m^2$ ).
- Irradiancia: Es la cantidad de flujo radiante emitido por una fuente en una dirección dada por unidad de ángulo sólido y de área proyectada ( $w/sr$ ).
- Radiancia: Es la cantidad de flujo radiante emitido por una fuente en una dirección dada por unidad de ángulo sólido y de área proyectada. ( $w/m^2 sr$ ).

Para la conversión de unidades radiométricas a unidades fotométricas es necesario conocer la curva de eficiencia lumínica, la cual nos dice la respuesta que tiene el ojo humano para cada onda de luz. Dicha curva se muestra en la figura 2.6.

$$Lm = V(\lambda)(P)\left(683 \frac{lm}{w}\right) \quad (2)$$

dónde:

$Lm$ = Es la potencia fotométrica medida en lúmenes (lm).

$V(\lambda)$ = Es una regresión no lineal para datos experimentales.

$P$ = Es la potencia radiométrica medida en watts (w).

La definición para una candela es de 683 lm/w para 555nm de propagación en el vacío.

Para obtener la potencia radiométrica despejamos, teniendo la expresión:

$$P = \frac{Lm}{\left(683 \frac{lm}{w}\right)(V(\lambda))} \quad (3)$$

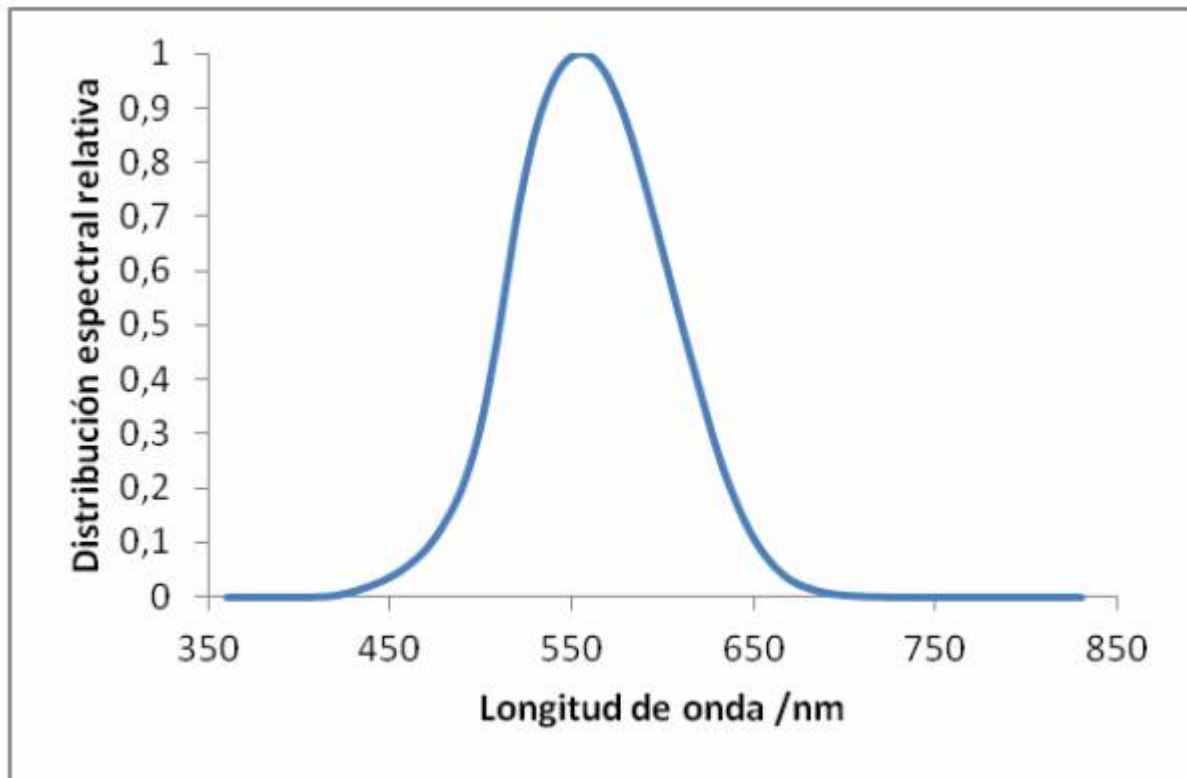


Figura 2.6 Curva de eficiencia lumínica.

Thorlabs (s.f.) expone que para obtener el valor de .096 se consideró que la longitud de onda fuera 650 nm. La regresión no lineal aproximada se calcula de la siguiente forma:

$$V(\lambda) = 1.019e^{-285.4(\lambda-.559)^2} \quad (4)$$

## 2.9 Formas de conducción de calor

Beléndez (2017) sostiene que el calor siempre se propaga de un cuerpo caliente a un cuerpo frío, cuando un cuerpo en algún punto o este se encuentre en contacto con un cuerpo diferente, es más caliente, todos alcanzaran a tener la misma temperatura.

Para propagar calor de un cuerpo caliente a un cuerpo frío existen 3 maneras:

- Conducción
- Convección
- Radiación

## 2.9.1 Conducción

Es causado por el choque de moléculas, existe propagación de calor a través de un cuerpo sólido. Mientras exista una diferencia de una temperatura entre los distintos extremos de un cuerpo, esto es por la energía que existe en un extremo del cuerpo, que se va transmitiendo a lo largo del cuerpo, por lo tanto, la propagación termina cuando en cada punto del cuerpo existe la misma temperatura. Los metales son buenos conductores de calor, en cambio los materiales no metales tal como el corcho, madera, plástico, lana, vidrio y papel son malos conductores. (Pérez, 2012)

Connor (2020) plantea que la ley de conducción térmica de Fourier con la expresión:

$$q = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (5)$$

dónde:

$q$  es el flujo de calor (W).

$k$  es la conductividad térmica del material ( $W * m^{-1} * K^{-1}$ .)

$A$  es el área de ambas superficies ( $m^2$ ).

$L$  es el espesor del material (m).

## 2.9.2 Radiación

Es causado por ondas electromagnéticas esparcidas. Todo cuerpo caliente emite radiación calorífica, cuando llega a un cuerpo una parte se absorbe y otra se refleja. Los colores oscuros suelen absorber más las radiaciones, los colores claros las refleja. (Pérez, 2012)

Britannica T. Editors of Encyclopaedia (s.f.) presenta la ecuación:

$$E = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_d^4) \quad (6)$$

Donde:

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann igual a  $5.67 \times 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 * K^4}\right)$

$\varepsilon$  es la emisividad del material ( $0 < \varepsilon < 1$ )

$T_s$  es la temperatura de la fuente (K).

$T_d$  es la temperatura del material (K).

$A$  es el área de la superficie donde incide la radiación.

La emisividad es la efectividad en la emisión de energía como radiación de energía térmica y varía entre 0 y 1.

La tabla 2.4 nos muestra las propiedades de los materiales tales como los índices de reflexión junto a la temperatura que se desea alcanzar con la propuesta y su emisividad.

### 2.9.3 Convección

Como señala Pérez (2012) la transferencia de calor propagación de calor por convección es provocada por el movimiento de la sustancia caliente. Kapter (2019) define la transferencia de calor por convección como la transmisión de energía calorífica causada por el movimiento físico de las moléculas “calientes” desde las zonas de altas temperaturas hacia las de menor temperatura. Este fenómeno se produce en líquidos y gases.

Una forma de modelar la transferencia de calor por convección es la ley de enfriamiento de Newton:

$$H = h A (T_A - T) \quad (7)$$

Donde:

$h$  es el coeficiente de convección.

$A$  es la superficie que entrega calor.

$T_A$  es la temperatura de la superficie.

$T$  es la temperatura del fluido adyacente.

La figura 2.7 nos muestra las 3 formas de transferencia de calor, en la parte inferior podemos observar una fuente de radiación que en este caso es una flama que transmite calor al recipiente de agua por medio de radiación, donde se produce una transferencia por convección debido al calor que se presenta en la superficie y este afecta al líquido que contiene. Por último, si se toma el mango del recipiente existe una transferencia de calor por conducción debido al contacto.

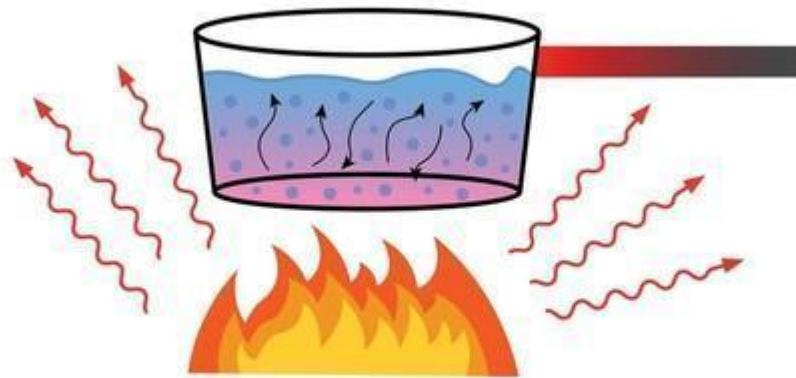


Figura 2.7 Formas de propagación de calor. (Shutterstock, s.f.)

Tabla 2.4 Propiedades de los materiales.

Material	Temperatura de ablandamiento (Punto de ebullición para el caso de metales)	Índice de reflexión (%)	Emisividad
Aluminio	2470°C	Pulido 65-75	.09 (100C)
Aluminio	2470°C	Mate 55-75	.02 (25C)
Aluminio	2470°C	Mate 55-76	.03 (100C)
Acero	3000°C	Inoxidable 80-90	.75-.85(93C laminado en frío)
Roble	450°C	Claro pulido 25-35	.94(70C)
Roble	450°C	Oscuro pulido 10-15	.94(70C)
Cobre	2652°C	Muy pulido 60-70	.03(40C)
Cristal	350°C	05-10	.94 (90C)
Hierro	2862°C	50-55	.97(0C liso)
Acrílico	150°C - 170°C	05-10	.91(70C)
MDF	250°C	30-50	.94(70C)

# Capítulo 3 Diseño de sistema óptico

## Introducción

Para el diseño del sistema óptico fue necesario calcular la potencia radiométrica de la fuente de luz, a su vez los distintos parámetros para diseñar los soportes en el software ZEMAX, estos parámetros son:

- Radio de la superficie 1
- Radio de la superficie 2
- Grosor

Los cálculos se realizaron con base a la distancia focal de cada lente utilizada, la distancia se tomó de forma empírica midiendo la distancia entre la lente y la superficie donde se proyectaba la imagen, en cambio para el grosor fueron estimaciones.

Dentro de este capítulo también se muestra la irradiación necesaria para poder realizar una perforación, ya sea para el material MDF o acrílico. Además, también se incluye el diseño de los soportes para las lentes utilizadas en el sistema óptico.

Los soportes y bases fueron diseñados con el software SolidWorks, estos soportes fueron fabricados con una impresora 3D siendo estos de material PLA.

## Herramientas y software utilizados

ZEMAX es un software que permite el diseño de sistemas ópticos, se puede realizar un análisis de forma secuencial y de forma no secuencial, para la propuesta se decidió utilizar el método no secuencial. En 1990 inició a ofrecer sus servicios y software para apoyar a ingenieros, científicos, investigadores y estudiantes. Zemax nos brinda distintas herramientas en Óptico Studio para cada necesidad, tales como OpticsBuilder para elementos CAD y OpticsViewer para procesos de manufactura (ZEMAX, s.f.).

Fluke (s.f) nos declara que SmartView es un software que nos permitirá analizar, visualizar y optimizar imágenes infrarrojas o por IR, de esta manera podemos observar el comportamiento de la temperatura alcanzada por las distintas pruebas realizadas, utilizando como herramienta una cámara termográfica.

Omega Engineering desarrolló un software en el cual por medio de un termómetro conectado a la PC se puede observar el comportamiento de la temperatura alcanzada en tiempo real, utilizando un termopar como objeto de contacto para realizar esta medición. El termómetro nos permite también guardar la información que vaya adquiriendo y nosotros deseemos conservar. (SoftDeluxe, s.f.)

### 3.1 Cálculos de parámetros ZEMAX

Para poder desarrollar el sistema óptico es necesario conocer las distintas variables, partiendo de la fuente, en este caso es una lámpara QTH, el fabricante nos brinda su potencia fotométrica por lo tanto se requiere realizar una conversión de potencia fotométrica a radiométrica tomando como referencia la ecuación (2) (ver página 17).

$$P = \frac{900 \text{ lm}}{\left(683 \frac{\text{lm}}{\text{w}}\right)(.096)}$$

Por lo tanto, el resultado es de:

$$P = 13.72 \text{ w}$$

Se realizó el diseño de las lentes en el software de ZEMAX y para ello se requiere utilizar la ecuación de fabricación de lentes vista en la expresión (1), la cual nos permite conocer los radios de las superficies con las que cuentan las lentes.

Al ser lentes simétricas tendremos esta relación:

$$R_1 = -R_2 = R$$

Para la lente biconvexa con una distancia focal de 70 mm

$$\frac{1}{70} = (1.45704 - 1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

Resolviendo paréntesis obtenemos:

$$\frac{1}{70} = (0.45704)\left(\frac{2}{R}\right)$$

Despejando R obtenemos:

$$R = (0.45704)(2)(70)$$

Por lo tanto, el resultado es:

$$R = 63.9856 \text{ mm}$$

Para la lente biconvexa con distancia focal de 30 mm solo sustituimos

$$R = (0.45704)(2)(30)$$

Teniendo como resultado:

$$R = 27.4224 \text{ mm}$$

Para la lente biconvexa con distancia focal de 150 mm solo sustituimos

$$R = (0.45704)(2)(150)$$

Teniendo como resultado:

$$R = 137.112 \text{ mm}$$

### 3.2 Cálculos de irradiancia necesaria

Se decidió utilizar el material acrílico como material de prueba por su baja temperatura de ablandamiento además de las distintas aplicaciones que este material cuenta, por ejemplo, en prototipos y/o proyectos escolares, al tener propiedades similares al vidrio en suele ser utilizado como protección, en especial por el tiempo de pandemia que se acaba de acontecer. Para el material de acrílico se busca alcanzar una temperatura de 170°C, sus dimensiones son de 13.65 cm por 17.8 cm con un espesor de 2.4 mm, usando la expresión (6) podemos calcular la irradiación que llega al material.

$$E = (0.024)(0.91)(5.67 \times 10^{-8})(1473.15^4 - 443.15^4)$$

Teniendo como resultado que la irradiación que llega al material es

$$E = 5.784 \times 10^3 \frac{w}{m^2}$$

Se decidió el material MDF como material de prueba por sus características similares a la de la madera, tales como la emisividad y la combustión, lo que permitirá lograr el objetivo de este proyecto, además de que suele ser utilizado en construcción y constante uso para proyectos didácticos y/o escolares. Para el material MDF se requiere alcanzar una temperatura de 250°C. Las dimensiones del material para la prueba son de 11 cm de ancho, 13 cm de largo y 3mm de espesor, cuenta con una emisividad de .94. Nuevamente se utiliza la expresión (6).

$$E = (0.0143)(0.94)(5.67 \times 10^{-8})(1473.15^4 - 523.15^4)$$

Como resultado obtenemos que la irradiación que llega al material es

$$E = 3.532 \times 10^3 \frac{w}{m^2}$$

### 3.3 Simulación del sistema óptico A

En la figura 3.1 podemos observar el trazo de rayos del sistema óptico A, los rayos de luz pasan a través de lentes de SiO<sub>2</sub> (Fused Silica) hasta llegar a un detector de forma rectangular con unas dimensiones de 70 mm de largo y 70 mm de ancho. Siendo ambas lentes biconvexas, una de 150 mm de distancia focal y otra de 30 mm de distancia focal. Se incluyó una lente esférica de 20 mm de distancia focal. Se eligieron este tipo de lentes debido a que el objetivo es concentrar el haz de luz hasta alcanzar el diámetro más pequeño posible.

La figura 3.2 nos muestra la irradiación que presenta el sistema, en la cual el color rojo es donde existe una mayor concentración de la luz infrarroja, lo que quiere decir es que ahí es donde se alcanza la máxima temperatura.

Con el resultado de la simulación podemos afirmar que la irradiación que llega a la pantalla de prueba es un poco inferior a la calculada para el material acrílico, aunque es suficiente para el material MDF.

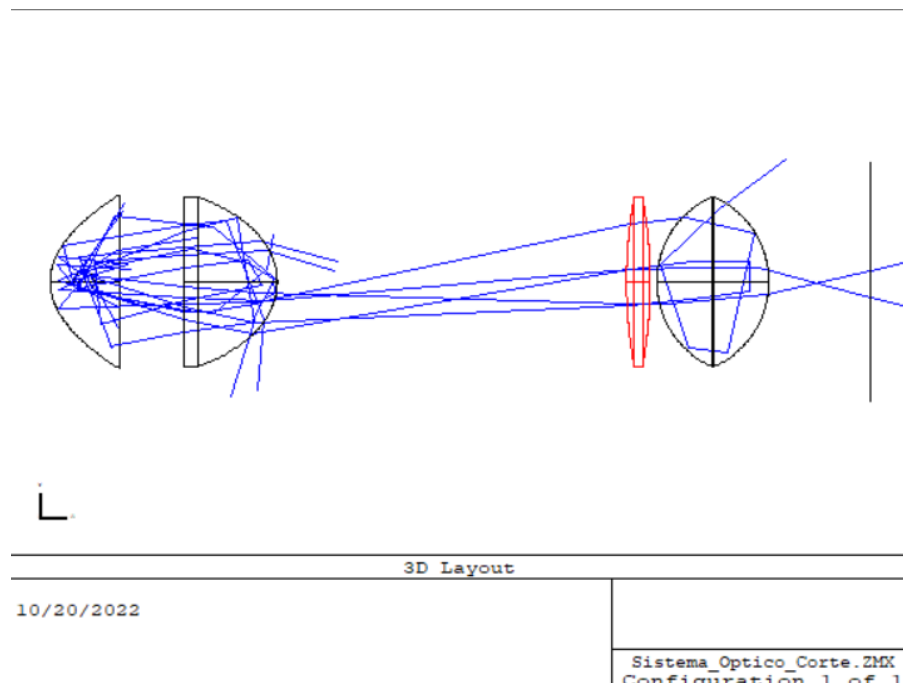


Figura 3.1 Trazo de rayos del sistema óptico A en el software ZEMAX.

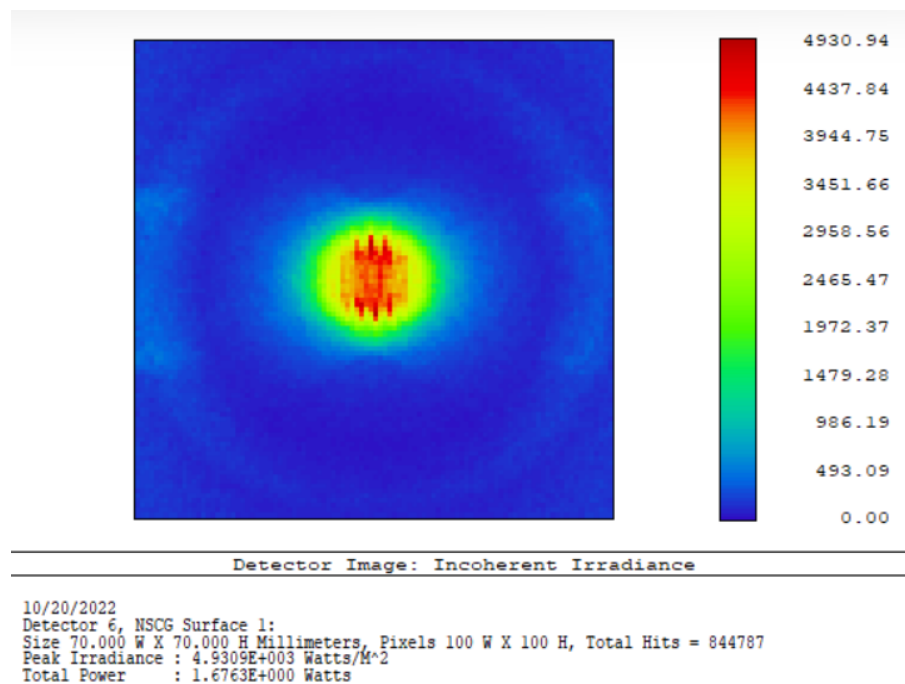


Figura 3.2 Resultado de la simulación en el software ZEMAX.

### 3.4 Simulación del sistema óptico B

La figura 3.3 nos muestra el trazo de rayos del sistema óptico B, para este sistema se agregó otra lente biconvexa de 70 mm de distancia focal con el objetivo de poder concentrar aún más el haz de luz, lo que supone una mayor temperatura comparada con el sistema óptico A. En la figura 3.4 podemos visualizar el resultado de simulación donde el color rojo al igual que con el sistema óptico A significa que existe una mayor concentración de luz.

De acuerdo con la simulación se obtuvo un resultado el cual nuevamente es menor la irradiación calculada que llega al material acrílico pero superior a la radiación calculada que llega al material MDF.

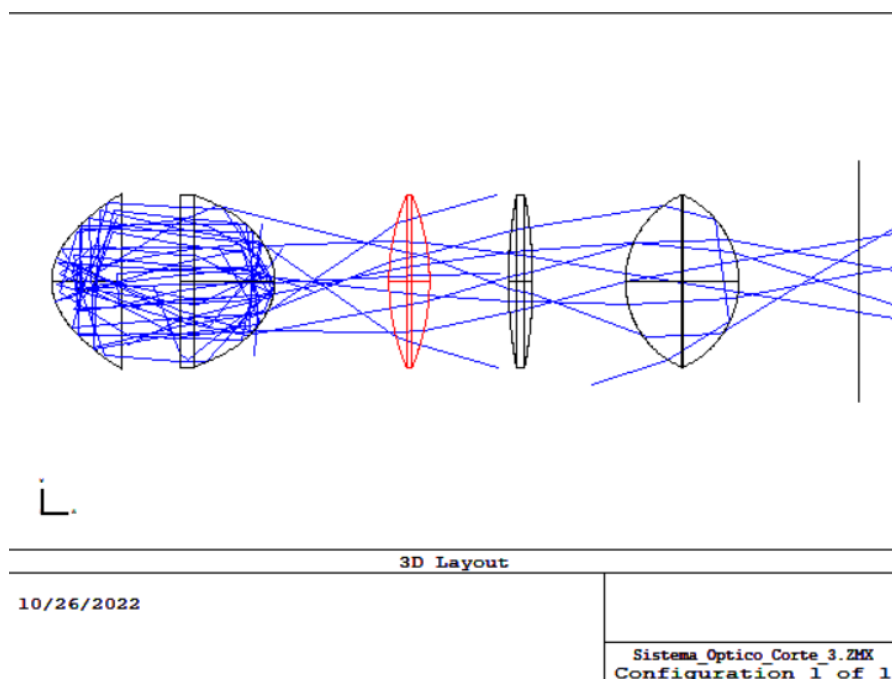


Figura 4.3 Trazo de rayos del sistema óptico B en el software ZEMAX.

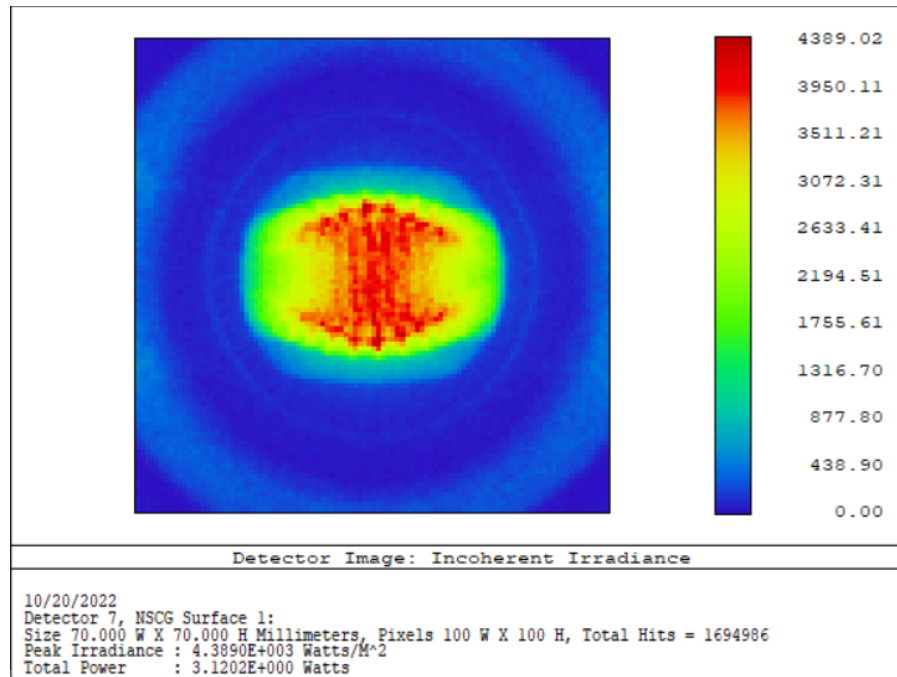


Figura 4.4 Resultado de simulación del sistema óptico B en el software ZEMAX.

### 3.5 Diseño de soportes para las lentes

Los soportes se realizaron en el software SolidWorks y se imprimieron en 3D con el material PLA para realizar las pruebas de ambos sistemas ópticos. En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 contemplamos los soportes para las lentes biconvexa, esférica y el difusor respectivamente. Cada soporte tiene una apertura para una segunda pieza que sirve como apoyo, de esta forma se evita que el elemento se pueda mover. Pues bien, con esto podemos evitar problemas de alineación y/o accidentes hacia los elementos.

Es de suma importancia decir que los soportes se fabricaron con una impresora 3D Lulzbot TAZ 5 cabe señalar que para la impresión se decidió dejar .5 mm de tolerancia para los cortes realizados en la pieza y para sus pies se dejó una inclinación de 43°, en efecto se evitan problemas al ensamblar el sistema y se logre de forma correcta.

Recordemos que el material con el que se fabrican las piezas también juega un rol importante, en el caso de los soportes se presentaron problemas con el material ABS, por la exposición del material a temperatura ambiente provocado por la falta de una protección. Por lo tanto, para realizar las pruebas de ambos sistemas ópticos lo mejor fue optar por el material PLA.

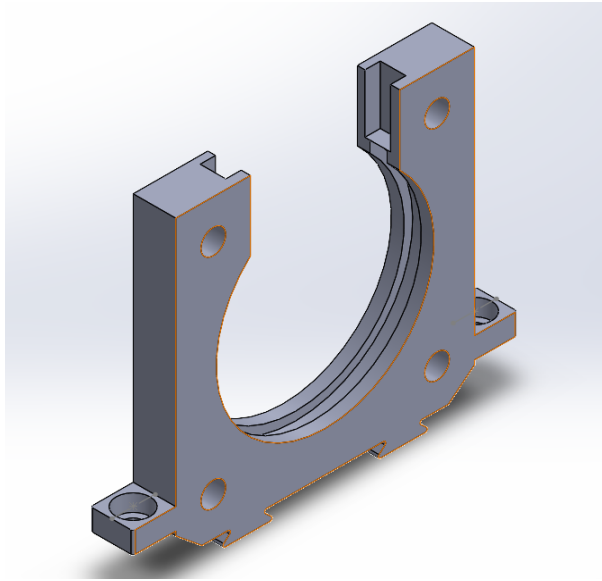


Figura 3.5 Soporte para lente biconvexa.

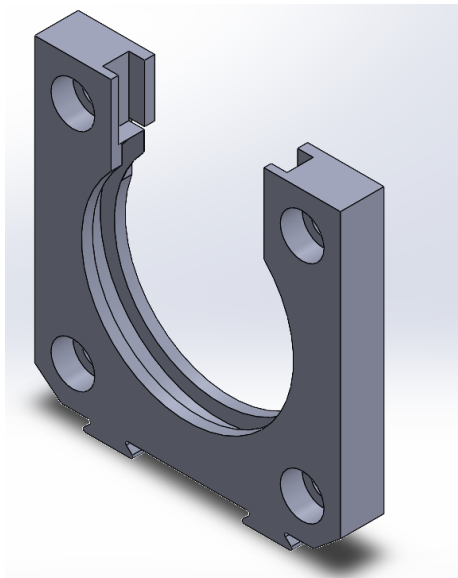


Figura 3.6 Soporte para lente esférica

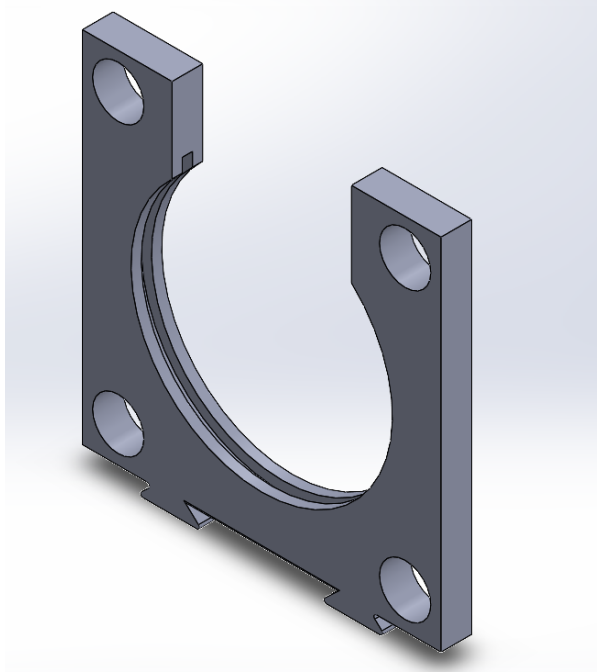


Figura 3.7 Soporte para el difusor.

En la figura 3.8 podemos observar la base donde se coloca el difusor y la lente esférica, en la figura 3.9 se visualiza que la base es un riel donde se colocan las lentes biconvexas necesarias para ambos sistemas ópticos, el riel permite que las lentes se puedan ajustar a cualquier distancia que se desee dentro de sí mismo.

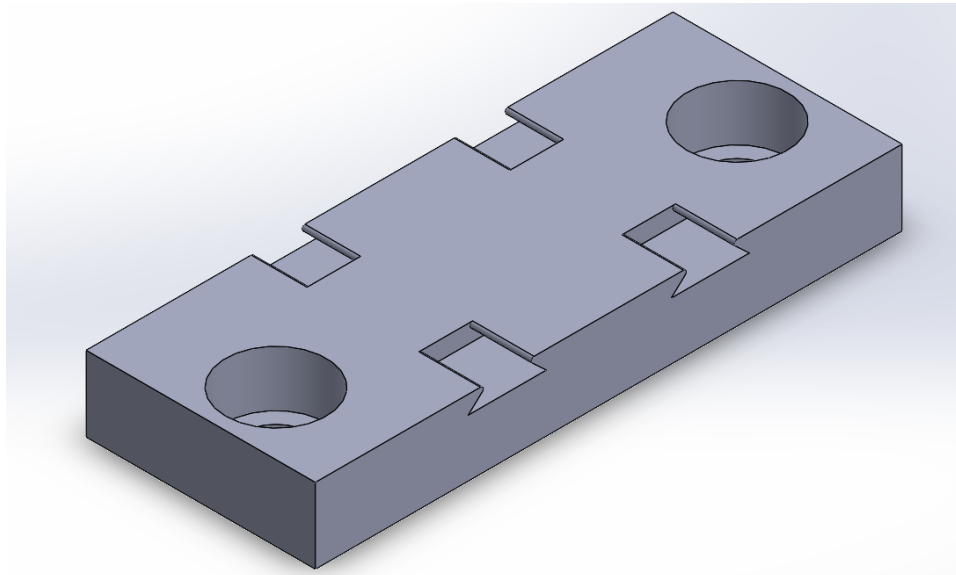


Figura 3.8 Base para el difusor y la lente esférica.

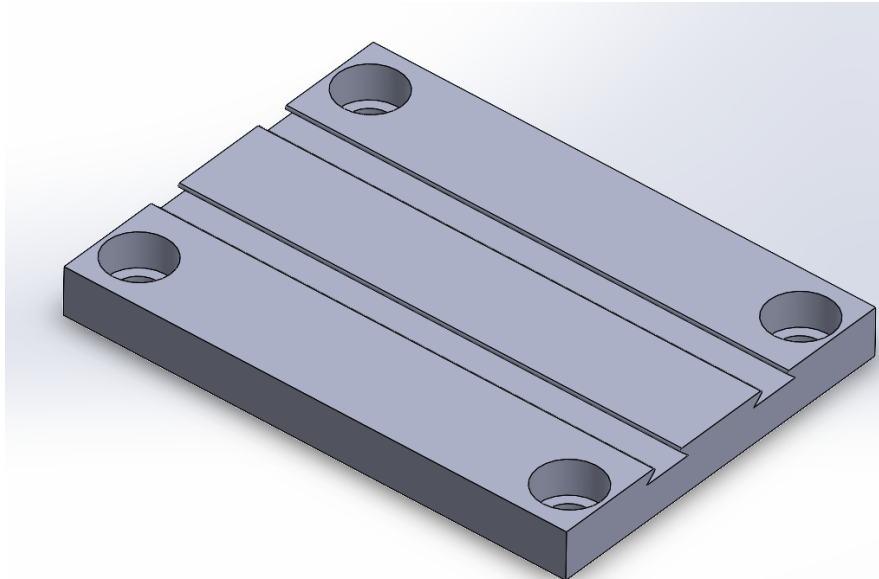


Figura 3.9 Base riel para lentes biconvexas.

Para poder realizar una alineación adecuada se diseñó una base para reciclar uno de los soportes que se encontraban defectuosos y aprovechar el que ya se contaba con el láser. La figura 3.10 muestra la base que es bastante similar a la de la figura 3.8.

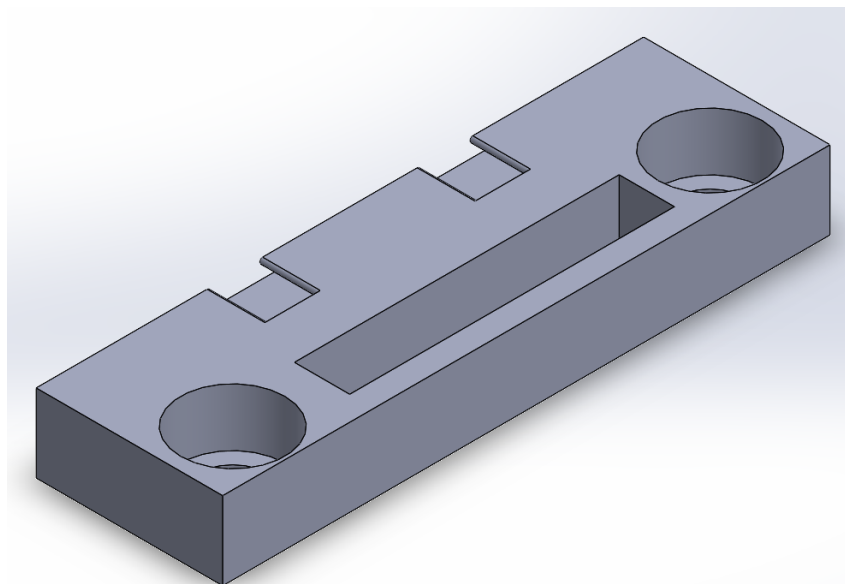


Figura 3.10 Base para el láser guía.

Por último, tenemos el diseño de una segunda pieza del soporte de las lentes mostrada en la figura 3.11 para las lentes biconvexas y 3.12 para lente esférica, las cuales les da mayor firmeza y evita posibles movimientos que pudieran provocar una desalineación en el mejor de los casos. A los costados tiene una pestaña que le permite sujetarse al soporte lo que facilita el sostener la lente.

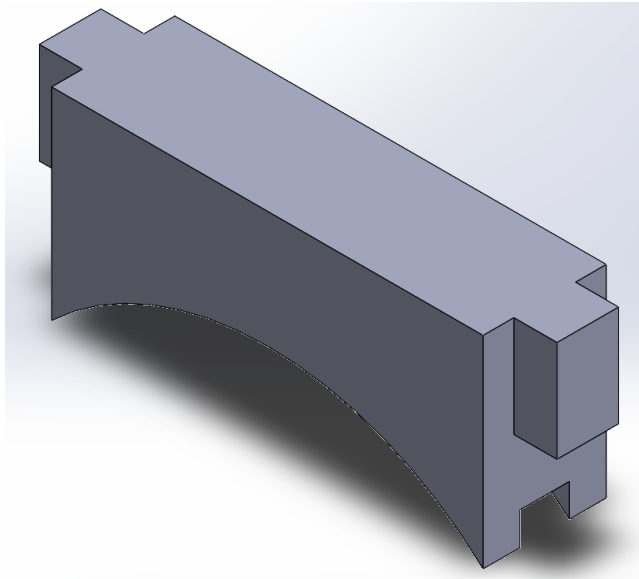


Figura 3.11 Segunda pieza de soporte lente biconvexa.

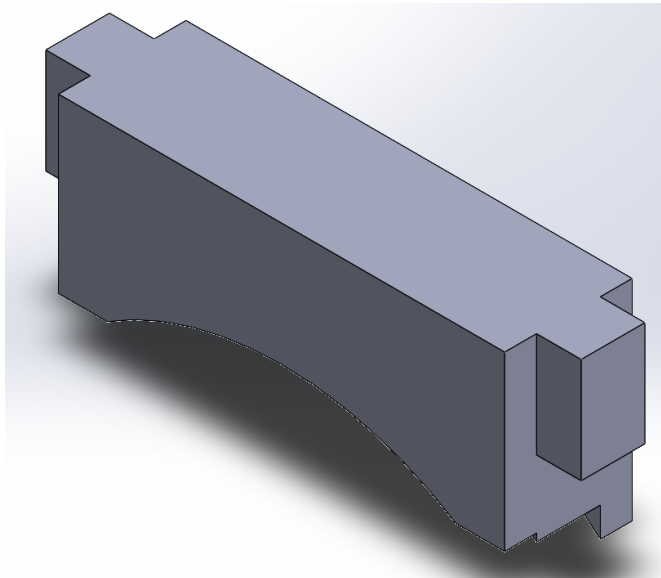


Figura 3.12 Segunda pieza de soporte de lente esférica.

## Capítulo 4 Resultados experimentales

### Sistema óptico A

En un sistema óptico la alineación es crítica para obtener el mejor aprovechamiento de la fuente luz, para las pruebas se utilizó un láser guía que permite una mejor percepción del eje óptico. Una vez alineados los elementos ópticos se cambió el láser guía por la lámpara QTH.

Debido a que los soportes no permiten que exista algún giro o inclinación que provoque un error de alineación. Por otro lado, al momento de realizar las pruebas de alineación con la lámpara QTH, fue necesario inclinarla hacia arriba debido a que el soporte con el que ya contaba no tenía la altura suficiente y gran parte se perdía en el soporte tal como podemos ver en la figura 4.1.



Figura 4.1 Alineación del sistema óptico A con la lámpara QTH.

### Sistema óptico B

Ahora bien, se realizó la alineación del sistema óptico con la lámpara QTH, tal como podemos ver en la figura 4.2, donde se utilizó una hoja de papel como pantalla y se agregó la lente biconvexa con distancia focal de 70 mm. Al incluir otra lente fue necesario agregar otro riel para respetar las distancias utilizadas en la simulación.

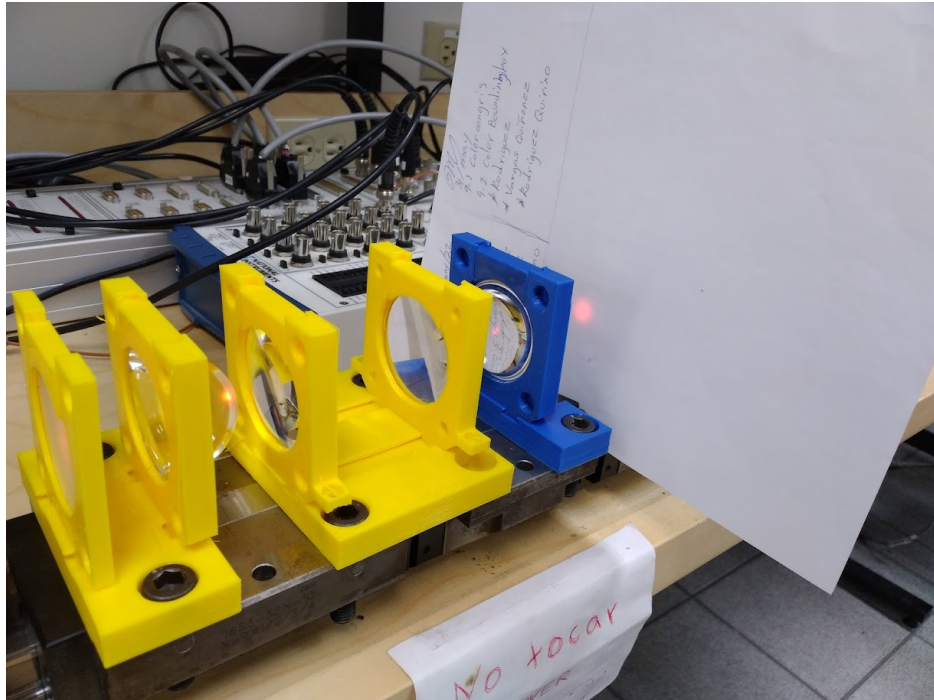


Figura 4.2 Alineación Sistema óptico B alineado con la lámpara QTH.

## 4.1 Resultado experimental del sistema óptico B con el material acrílico

En la figura 4.3 podemos observar los resultados que obtuvo el primer óptico A en el rectángulo negro de la parte de abajo y en los rectángulos negros de arriba el resultado del sistema óptico B. Para ambos sistemas se decidió dejar una exposición de 5 minutos como máximo para observar si se lograba realizar alguna perforación al material, sin embargo, no se logró el objetivo de perforar la lámina de acrílico, de acuerdo a dos factores: la ventana de transmisión del material y el índice de reflexión. En efecto existe un número considerable de pérdidas al momento de incidir en el material.

Durante esta prueba se corroboró con la cámara termográfica la temperatura que se alcanza en el material demostrando que se queda bastante corta al ser de alrededor de  $100^{\circ}\text{C}$ . Este resultado se puede visualizar en la figura 4.4. El comportamiento de la temperatura en un gráfico 3D se puede observar en la figura 4.5.

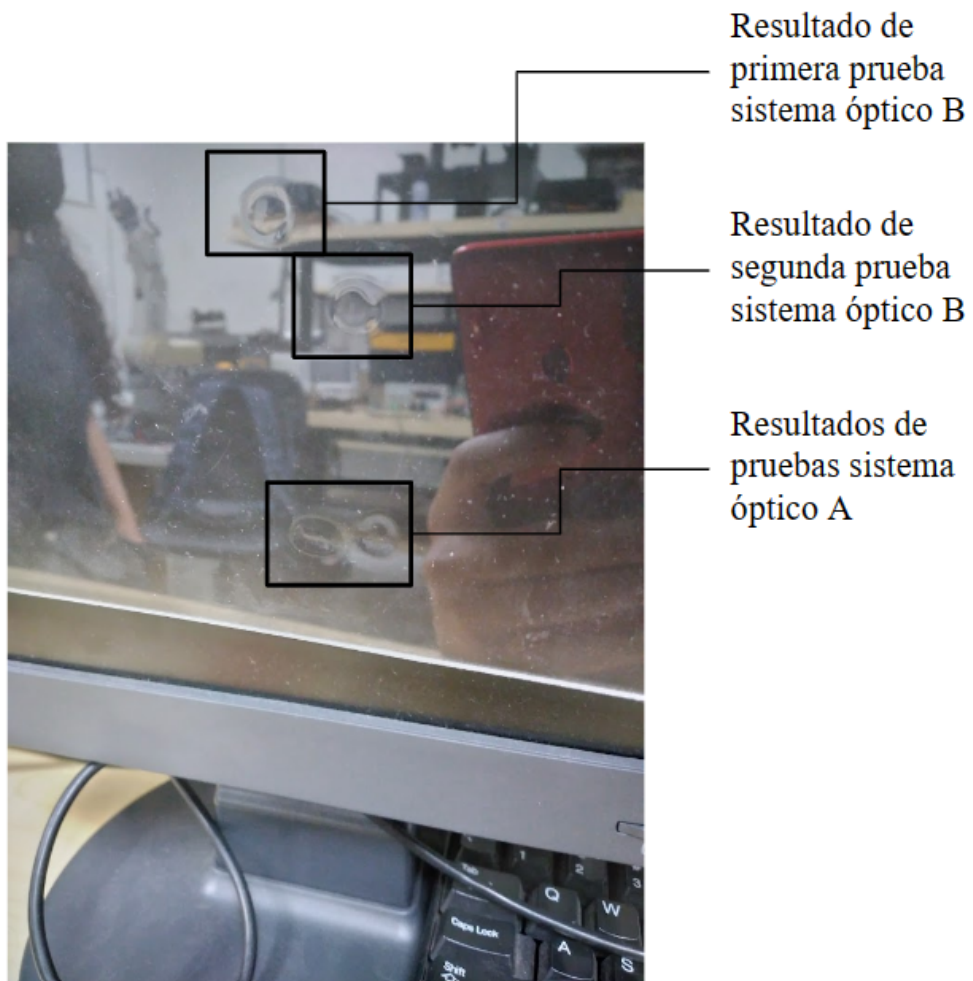


Figura 4.3 Comparación de resultados sistema óptico A con sistema óptico B.

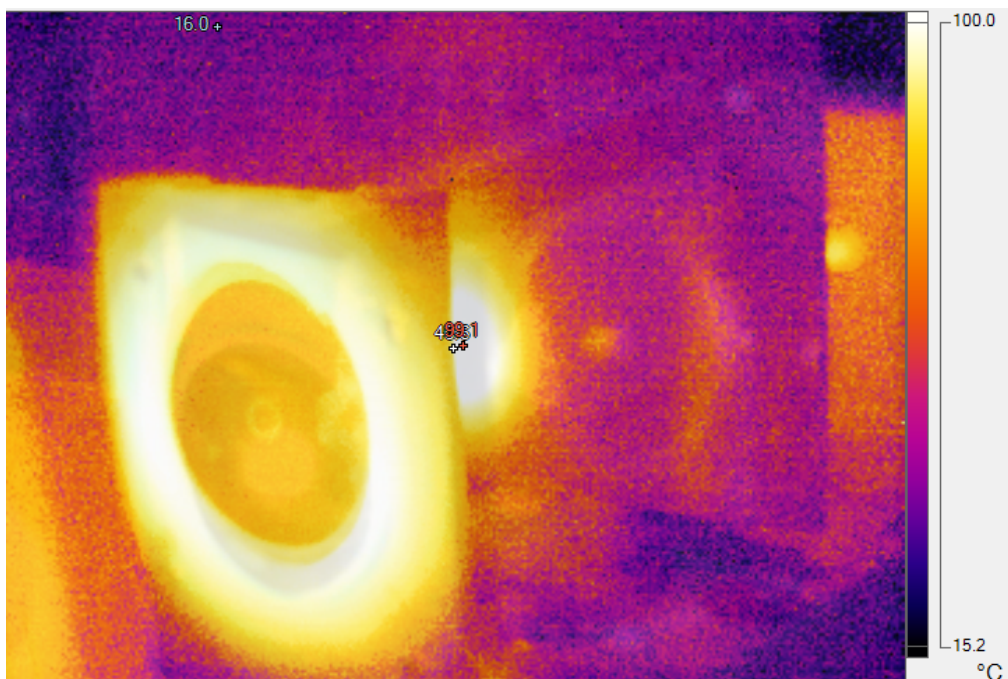


Figura 4.4 Temperatura alcanzada por el material acrílico.

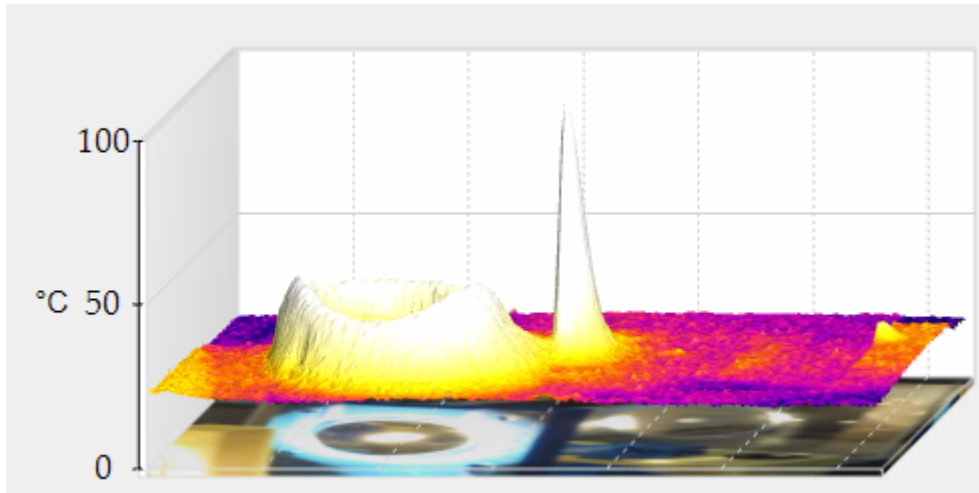


Figura 4.5 Comportamiento de la temperatura con respecto al material acrílico.

Para las siguientes pruebas no se realizaron mediciones con la cámara termográfica, estas pruebas se realizaron con distintas formas de cubrir o alterar algunas características del material para alcanzar el objetivo de realizar una perforación. En la tabla 4.1 podemos observar un resumen de los resultados obtenidos tras las distintas pruebas realizadas, desde la figura 4.6 hasta la figura 5.14 se muestran los resultados con cada alteración del material.

Tabla 4.1 Resultados de pruebas con acondicionamiento del material acrílico.

Número de prueba	Alteración del material	Resultado	Tiempo de exposición
1	Lijado, por un lado.	Sin perforación.	5 minutos
		Peor rendimiento que sin lijar.	
2	Lijado por ambos lados.	Sin perforación.	5 minutos
		Peor rendimiento que sin lijar.	
3	Pintado con plumón para pizarrón Expo, por un lado.	Ligero hundimiento del material.	5 minutos
4	Pintado con plumón para pizarrón Expo por ambos lados.	Hundimiento del material.	5 minutos
5	Cubierto con tape negro.	Sin perforación.	3 minutos
		El tape se quema.	
6	Pintado con pintura en aerosol negra HS.	Hundimiento del material a punto de quiebre.	5 minutos
7	Pintado con pintura en aerosol negra HS por ambos lados.	Perforación exitosa.	3 minutos
8	Pintado con pintura en aerosol plateada PD, por un lado.	Hundimiento del material muy leve.	5 minutos
9	Pintado con pintura en aerosol plateada PD por ambos lados.	Hundimiento del material muy leve.	5 minutos

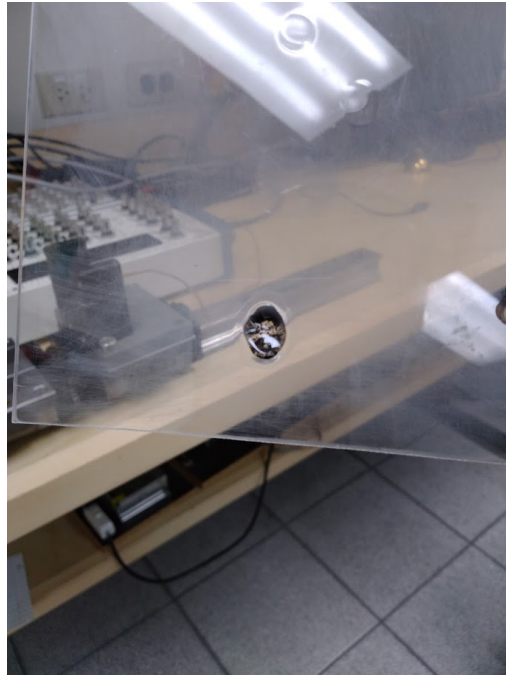


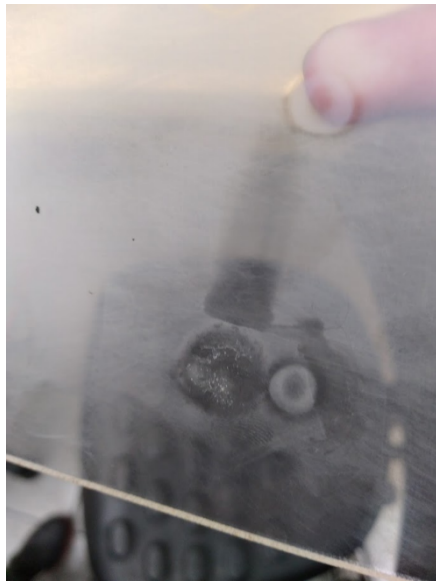
Figura 4.6 Resultado de la prueba con el plumón Expo por un lado.



Figura 4.7 Resultado de la prueba con el plumón Expo por ambos lados.



a)



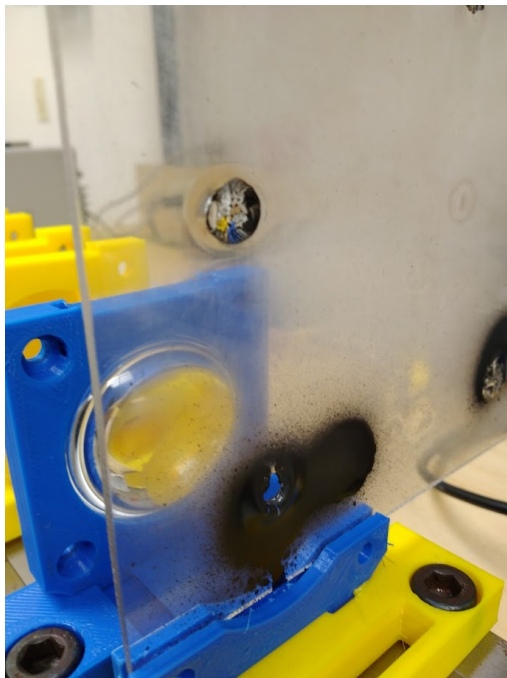
b)

Figura 4.8 a) Resultado de la prueba con el tape negro.

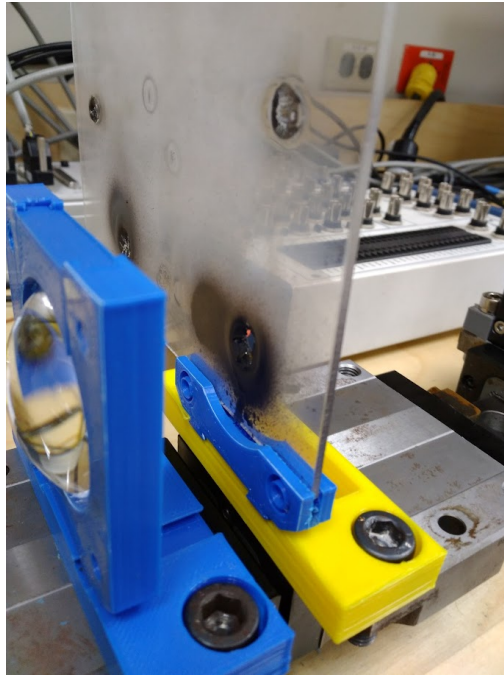
b) Resultado de la prueba con el tape removido.



Figura 4.9 Resultado de la prueba con la pintura aerosol negra HS.



a)



b)

Figura 4.10 a) Resultado de la pintura aerosol negra HS por ambos lados visto de atrás.

b) Resultado de la pintura aerosol negra HS por ambos lados visto de frente.

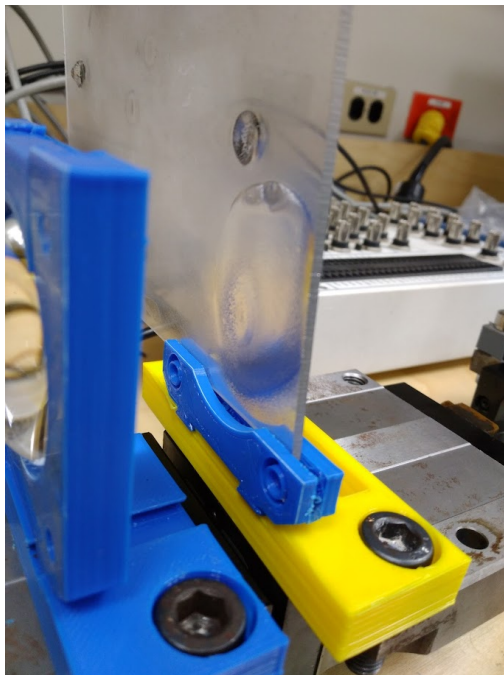
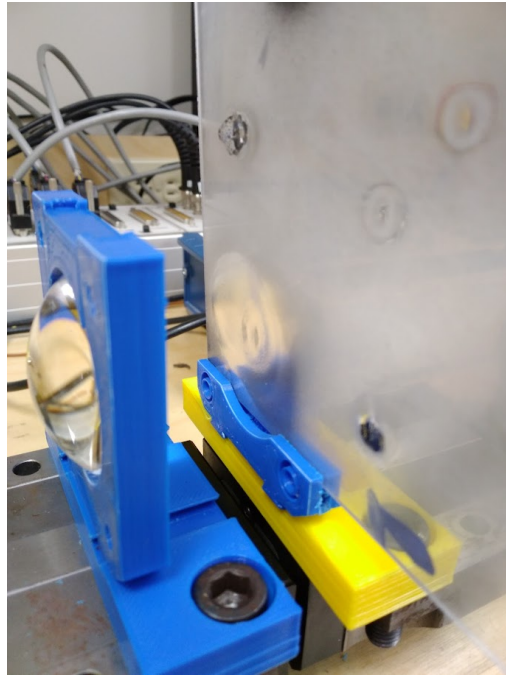


Figura 4.10 Resultado de la prueba pintura aerosol plateada PD por un lado.



a)

Figura 4.11 a) Resultado de la prueba pintura aerosol plateada PD por ambos lados vista de atrás.

b) Resultado de la prueba pintura aerosol plateada PD por ambos lados vista de atrás.

#### Pruebas repetidas

Una vez alcanzado el objetivo se realizaron pruebas repetidas para asegurar un resultado, en la tabla 4.1 podemos observar los tiempos y resultados que se lograron con el material acrílico, los resultados se muestran en la figura 4.17.

Tabla 4.1 Pruebas repetidas con el material acrílico.

	<b>Resultado</b>	<b>Tiempo (min: s)</b>
Prueba 26	Perforación.	03:01.9
Prueba 27	Perforación.	01:46.8
Prueba 28	Perforación.	01:46.4
Prueba 29	Perforación.	01:47.3



Figura 4.17 Resultado de pruebas repetidas con el material acrílico.

## 4.2 Resultado experimental del sistema óptico B con el material MDF

En la figura 4.16 podemos observar el resultado de distintas pruebas para el material MDF hasta encontrar la perforación más pequeña, cambiando el tiempo de exposición. A diferencia del acrílico el MDF es un material que cuenta con la característica de que es orgánico esto permite alcanzar la temperatura necesaria incluso superiores para alcanzar el objetivo.

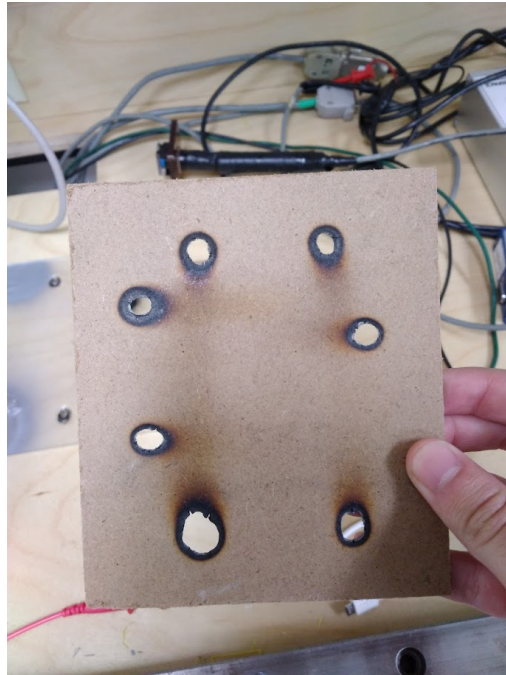


Figura 4.16 Resultado de prueba con el material MDF.

Para el caso del material MDF se realizaron distintas repeticiones de distintas pruebas, iniciando por realizar la perforación más que pequeña posible la cual se muestra en la figura 4.18, en esta prueba fue necesario esperar a remover la ceniza para visualizar el resultado, la tabla 4.2 nos dice los tiempos y resultados obtenidos, en la figura 4.19 se visualiza el resultado de la prueba donde no se esperar a que la ceniza se retire, teniendo como resultados y tiempos en la tabla 4.3.

Tabla 4.2 Pruebas repetidas con el material MDF.

	<b>Resultado</b>	<b>Tiempo (min: s)</b>
Prueba 20	Perforación.	02:00.3
Prueba 21	Perforación.	02:00.9
Prueba 22	Perforación.	02:01.7

Tabla 4.3 Pruebas repetidas con el material MDF tiempo extendido.

	<b>Resultado</b>	<b>Tiempo (min: s)</b>
Prueba 30	Se debe esperar a remover la ceniza.	04:00.4
Prueba 31	Se debe esperar a remover la ceniza.	04:00.0

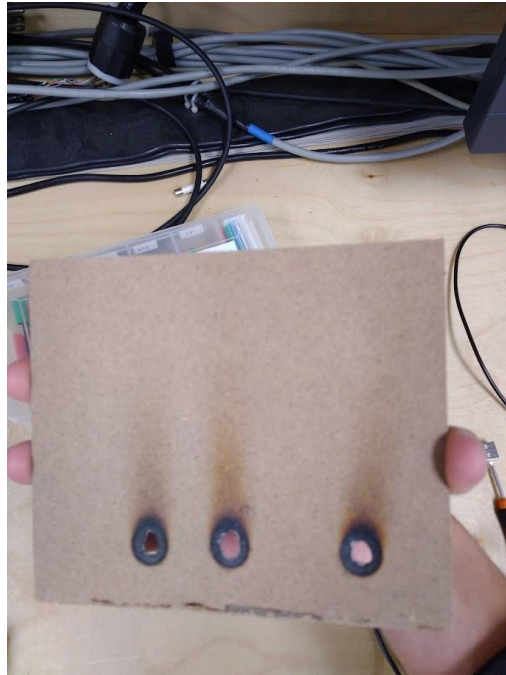


Figura 4.18 Resultados de pruebas repetidas con el material MDF.

### 4.3 Resultado experimental del sistema óptico A con el material acrílico y MDF

A través de las pruebas realizadas con el segundo sistema, se optó por realizar directamente las pruebas repetidas con el primer sistema, en el caso del acrílico se pasó directamente a que este sea pintado por ambos lados. En la tabla 4.3 podemos visualizar los resultados y tiempos de estas pruebas, en la tabla 4.4 para el caso del MDF. Las figuras 4.19 y 4.20 muestran los resultados respectivamente.

Tabla 4.3 Pruebas repetidas con el material acrílico.

	<b>Resultado</b>	<b>Tiempo (min: s)</b>
Prueba 33	Perforación	01:20.0
Prueba 38	Perforación	01:21.7
Prueba 39	Perforación	01:47.7



Figura 4.19 Resultados de prueba repetidas con el material acrílico.

Tabla 4.4 Pruebas repetidas con el material MDF.

	<b>Resultados</b>	<b>Tiempo (min: s)</b>
Prueba 34	Perforación	01:25.0
Prueba 35	Perforación	01:25.0
Prueba 36	Perforación	01:25.7
Prueba 37	Perforación	01:25.7

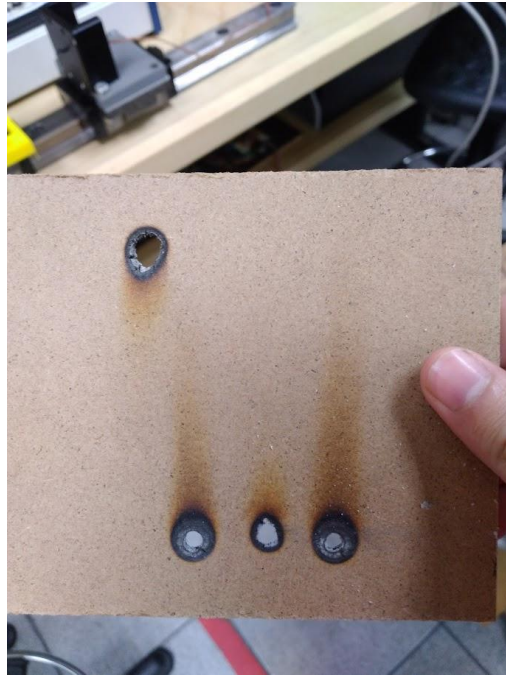


Figura 4.20 Resultado de pruebas repetidas con el material MDF.

#### 4.4 Resultado con cámara termográfica del sistema óptico B

Después de realizar los experimentos repetitivos, se realizaron dos pruebas finales para observar qué temperatura alcanza y poder compararla con el resultado obtenido dentro de la simulación del sistema, la figura 4.21 nos indica la temperatura máxima que alcanza el material en el tiempo que se comienza a realizar el corte para el material acrílico pintado con pintura negra y la figura 4.22 la temperatura que alcanza el material MDF. Debido a las características de la pintura negra el acrílico es capaz de alcanzar 408°C y el MDF 474°C.

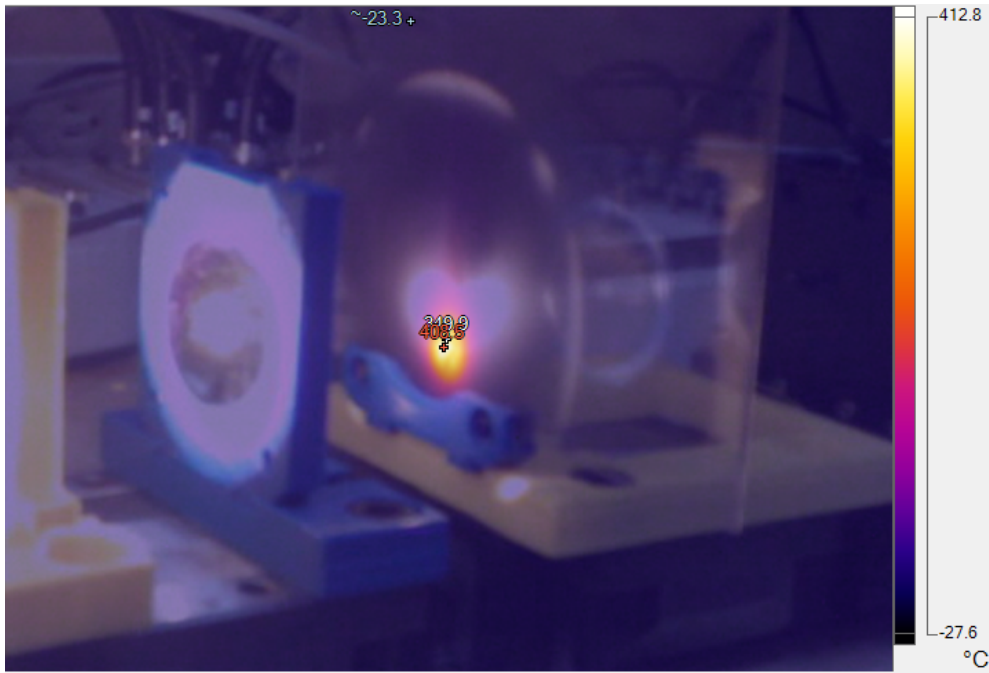


Figura 4.21 Temperatura alcanzada por el material acrílico.

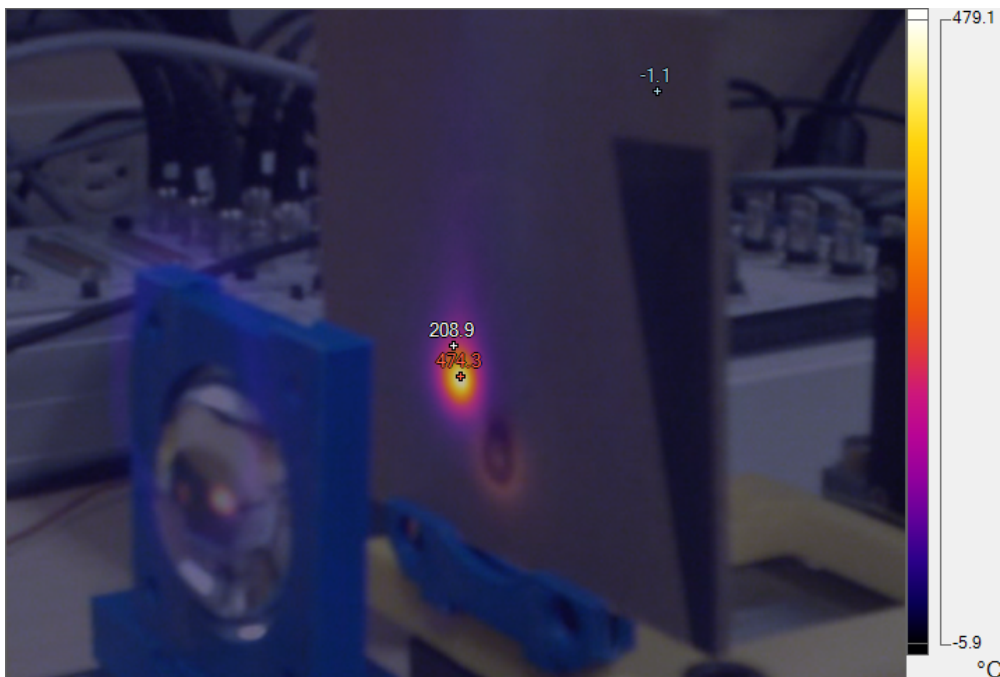


Figura 4.22 Temperatura alcanzada por el material MDF.

Utilizando el software SmartView de Fluke obtuvimos el comportamiento de la temperatura en un gráfico 3D de ambos materiales, en la figura 4.23 y figura 4.24 se visualiza el comportamiento que tuvo la temperatura con respecto al acrílico y el MDF respectivamente.

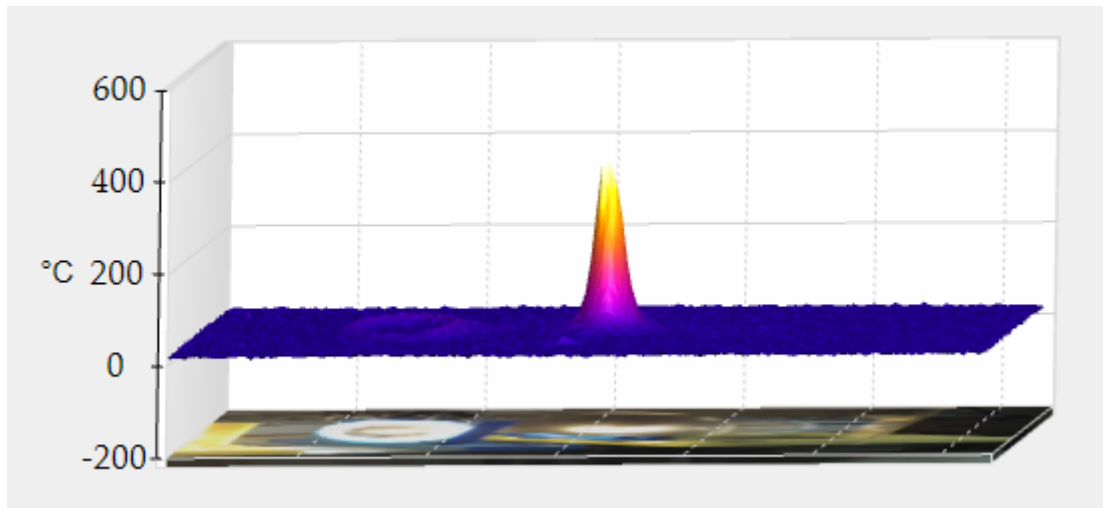


Figura 4.23 Gráfico de comportamiento de la temperatura con respecto al material acrílico.

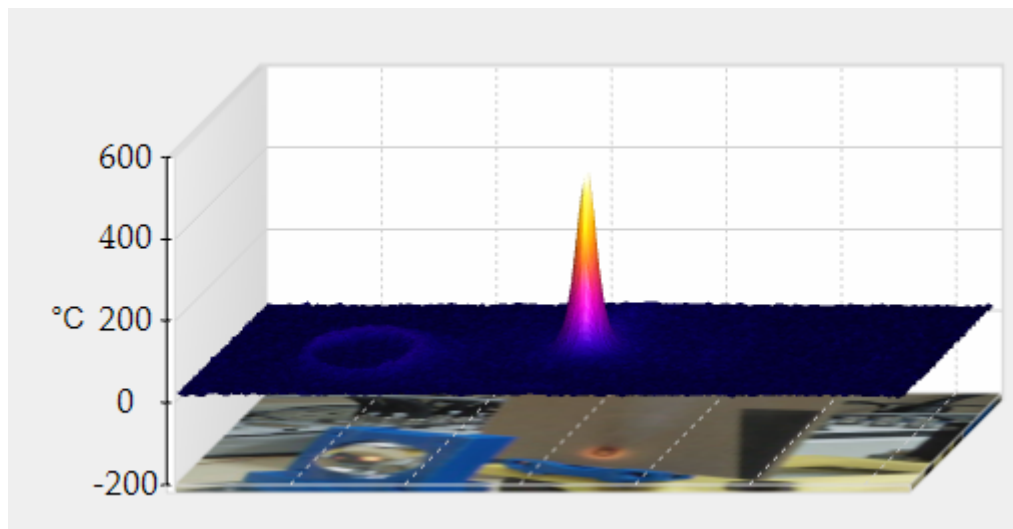


Figura 4.24 Gráfico de comportamiento de la temperatura con respecto al material MDF.

## 4.5 Resultado con cámara termográfica del sistema óptico A

En la figura 4.25 podemos observar la temperatura máxima alcanzada por el material acrílico y la figura 4.26 la temperatura máxima alcanzada por el material MDF utilizando el primer sistema, por las características de la pintura negra visualizamos que llega alcanzar una temperatura de alrededor 451°C para el caso del acrílico y 789°C para el caso del MDF.

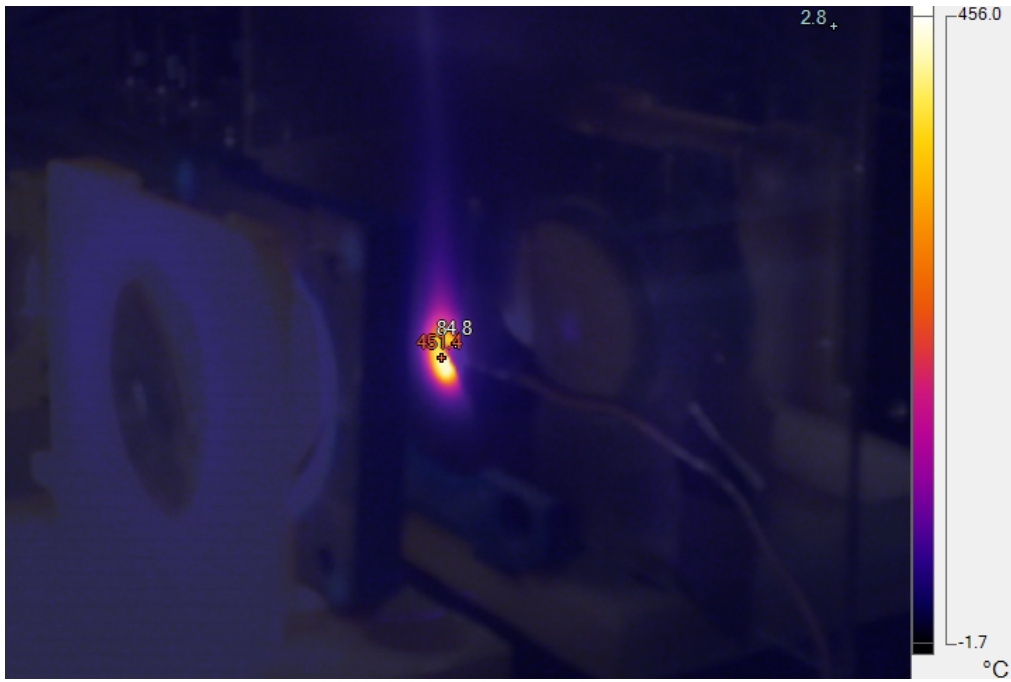


Figura 4.25 Temperatura máxima alcanzada por el material acrílico.

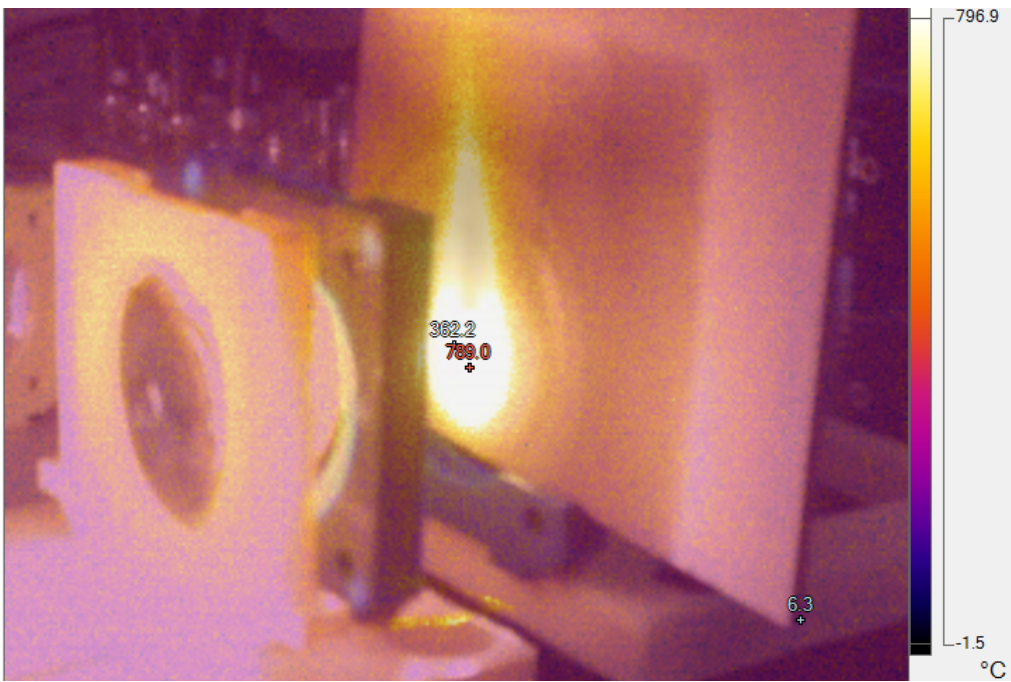


Figura 4.26 Temperatura máxima alcanzada por el material MDF.

Utilizando el software SmartView podemos observar respectivamente el comportamiento en un gráfico 3D, la figura 4.27 nos muestra el comportamiento que tiene el material acrílico y en la figura 4.28 podemos observar el comportamiento del material MDF.

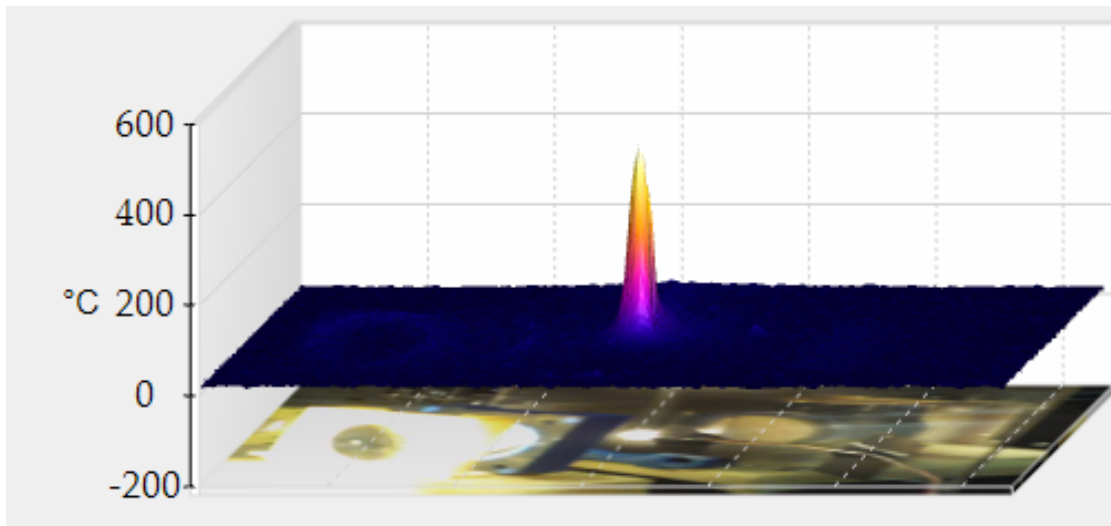


Figura 5.27 Comportamiento de la temperatura alcanzada por el material acrílico.

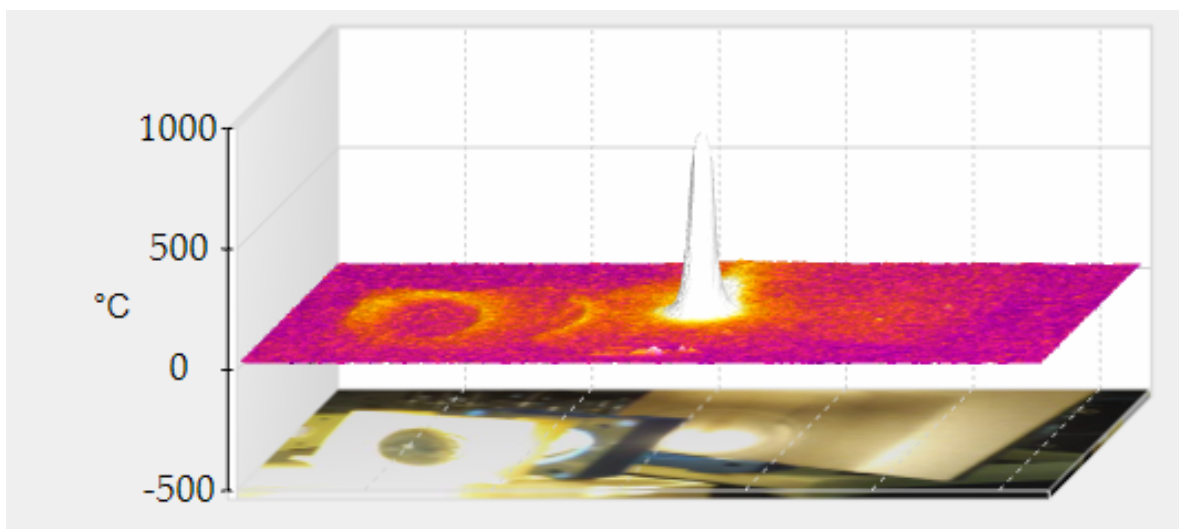


Figura 5.28 Comportamiento de la temperatura alcanzada por el material MDF.

## 4.6 Propuesta final

Basados en los resultados podemos proponer un sistema óptico final, que permite un mejor desempeño que los sistemas sometidos a prueba, este podemos observar su diagrama en la figura 4.29 y el resultado de la simulación respecto a la pantalla que se utiliza de prueba en la figura 4.30, este sistema funciona para los materiales que se sometieron a prueba, esto es debido a que no requieren una temperatura mayor a la máxima emitida por la fuente que se utilizó en las pruebas, además de eso es necesario recordar que existen pérdidas, esto porque las lentes no tienen película antirreflejante.

No está de más mencionar que esta propuesta se queda solo en simulación debido a que el equipo con el que se realizó contaba con demás limitaciones aparte de las presentadas por los elementos ópticos.

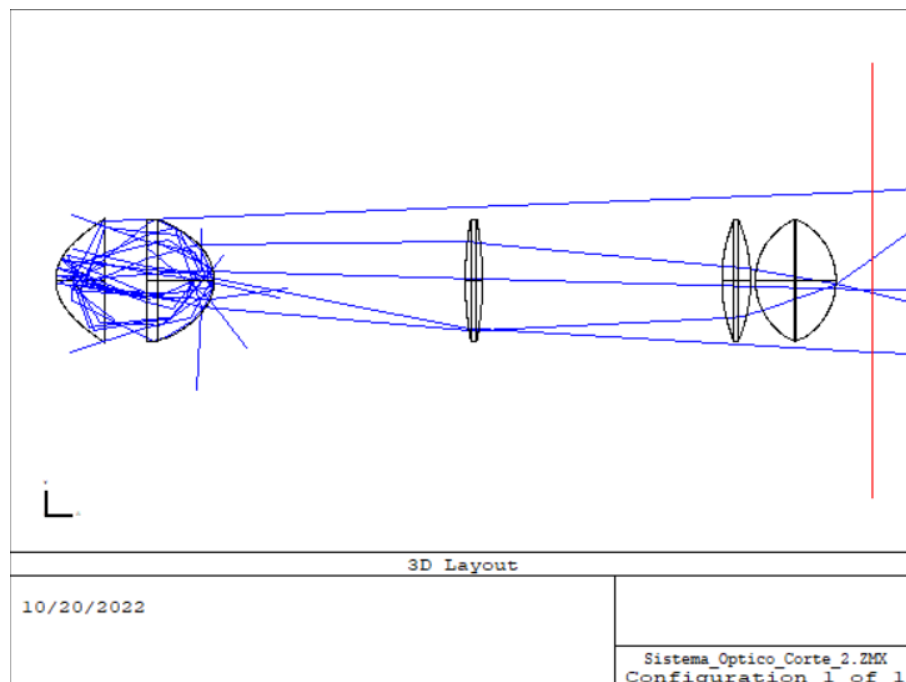


Figura 4.29 Trazo de rayos del sistema óptico propuesta final.

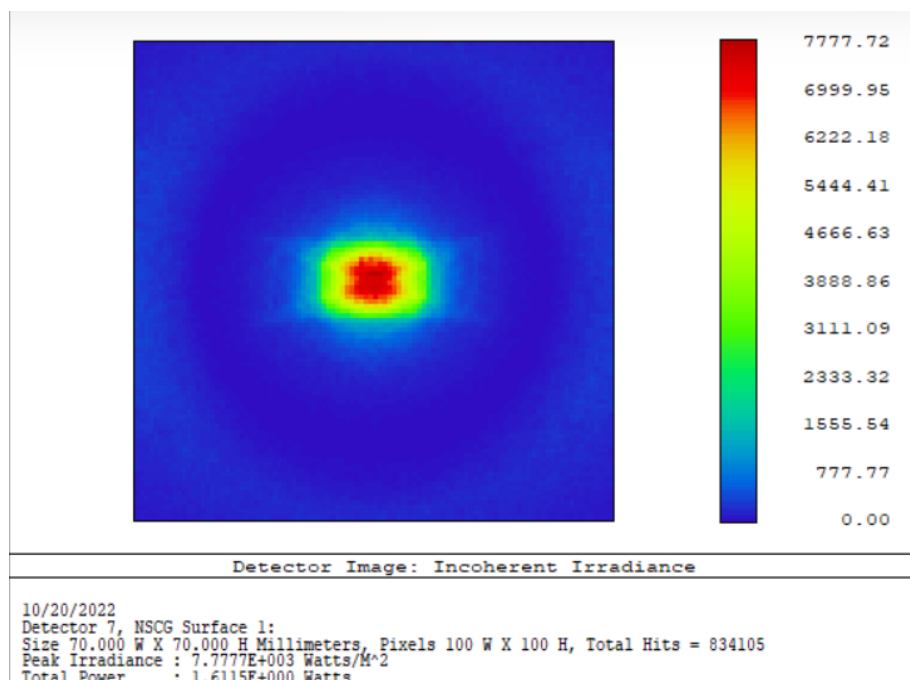


Figura 4.30 Resultado de la simulación de la propuesta final.

## Capítulo 5 Conclusiones

De acuerdo a los resultados presentados y la propuesta final podemos decir que al usar una lámpara de cuarzo de tungsteno halógeno (QTH) como fuente de luz para realizar corte a un material es factible, no obstante las limitaciones de herramientas y equipo son bastantes evidentes partiendo de las lentes, como se ha mencionado anteriormente no cuentan con película antirreflejante lo cual permite que existen pérdidas, esto se puede observar en el tiempo que requieren para poder realizar alguna perforación.

Podemos agregar que, aunque los soportes de los elementos ópticos hayan sido fabricados con PLA, al momento de estar correctamente alineados con la fuente de luz funcionan adecuadamente como prototipos teniendo en cuenta que se realizaron bastantes pruebas durante el desarrollo de esta tesis.

Podemos asegurar que los diseños de los soportes facilitan la alineación del sistema óptico, debido a su forma que mantiene a la lente en una posición fija, por otro lado es necesario decir que se debe tener cuidado al momento de fabricar los soportes y al momento de montarlos, puesto que sí no se encuentran bien sujetos, colocados o bien los rieles no se encuentran en óptimas condiciones el que exista una mala alineación es una posibilidad y esto como se ha comentado puede presentar pérdidas e incluso los soportes de PLA pueden sufrir un desgaste más rápido.

Aún con el diseño de los soportes es recomendable antes empezar con las pruebas realizar una alineación con la fuente de luz y/o un láser guía, de esta manera nos aseguramos de que no existan pérdidas y tengamos el mejor aprovechamiento del sistema.

Asimismo la lámpara de cuarzo de tungsteno halógeno alcanza una temperatura máxima de entre 1200°C y 1300°C, esto también limita con que otros materiales puede ser utilizada.

Por supuesto para realizar una perforación óptima y posteriormente un corte se necesita alcanzar una temperatura que sea alrededor de 3 veces mayor que la requerida.

El tiempo de exposición es un factor muy importante para el resultado que se obtuvo, por lo tanto es necesario recordar que por las características de ambos materiales se producen distintos efectos causados por el calor del área, para el acrílico al ser plástico se deforma bastante al momento de calentarse y para el caso del MDF al ser madera se tosta.

Además de lo mencionado anteriormente también influye si se desea implementar este sistema para el maquinado de piezas, debido a que el tiempo de fabricación

pueda ser bastante lento junto a los efectos que produce en los materiales de prueba, existe la posibilidad de que las piezas no sean de la calidad esperada.

Los resultados obtenidos de esta tesis demuestran que el proyecto tiene áreas de oportunidad al igual que el corte por láser o por plasma, lo que quiere decir que ya se dio un buen paso en desarrollar una alternativa que pueda ser igual de eficiente que las técnicas anteriormente mencionadas.

## 5.1 Trabajos futuros

Tomando en cuenta que se produce un cierto efecto en cada material que se utilizó, lo primero es investigar el cómo se pueden evitar o aprovechar estos efectos, como el caso del material acrílico se observa que por el calor existe cierta deformación en el material en el área donde se encuentra la radiación. En el caso del MDF recordemos que se debe remover la ceniza para visualizar el resultado.

Al observar que el sistema óptico puede perforar ciertos materiales, el siguiente paso sería implementarlo a un sistema XY de esta forma se puede crear un prototipo de una máquina CNC y de esta forma se puede realizar pruebas de cortes para producir distintas piezas.

Por último, se pueden realizar los soportes en maquinado, de esta forma pueden soportar una temperatura mucho mayor, por lo tanto, se puede a su vez cambiar la fuente de radiación a una con mayor potencia radiométrica, junto a ello también se pueden adecuar los diseños de los soportes para otro tipo de elementos ópticos tales como espejos o lentes que cuenten con otra forma.

# Referencias

- Beléndez, A. (2017). Calor y temperatura. *Fundamentos Físicos de la Ingeniería I*.
- Benatti, E., Rojas, N., & Pricco, F. (2020). 7002 TUOC Óptica Geométrica (parte I).
- Blasco, P. (s.f.). *Iluminacion*. Obtenido de Sitio web UPV:  
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/75442/ILUMINACION\\_\\_GIE-3\\_\\_2en1.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/75442/ILUMINACION__GIE-3__2en1.pdf)
- Boksman, L., & Coelho, G. (Marzo de 2012). *Principles of Light-Curing*. Obtenido de Sitio web Inside Dentistry:  
<https://www.aegisdentalnetwork.com/id/2012/03/principles-of-light-curing>
- Britannica T. Editors of Encyclopaedia. (s.f.). *Stefan-Boltzmann law*. Obtenido de Encyclopedia Britannica:  
<https://www.britannica.com/science/Stefan-Boltzmann-law>
- Campos, J., & Pons, A. (s.f.). *Radiometría y fotometría: Magnitudes y leyes básicas*. Obtenido de e-medida:  
<https://www.e-medida.es/numero-9/radiometria-y-fotometria-magnitudes-y-leyes-basicas/>
- Carillo, C., & Monroy, A. (5 de Septiembre de 2009). Métodos de activación de la fotopolimerización. *Revista ADM*, págs. 18-28. Obtenido de  
<https://www.medigraphic.com/pdfs/adm/od-2009/od95d.pdf>
- Central óptica (1 de noviembre de 2018). Tipos de lentes. Obtenido de:  
<http://coguada.com/cms/2018/11/01/tipos-de-lentes/>
- Connor, N. (2020). *¿Qué es la Ley de conducción térmica de Fourier? Definición*. Obtenido de Thermal Engineering.
- Donoso, C. (2010). *APLICACIÓN DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN UNA INDUSTRIA PRODUCTORA DE TABLEROS DE FIBRA DE MEDIANA DENSIDAD (MDF)*. Obtenido de Sitio web de Escuela Politecnica Nacional:  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2301/1/CD-3046.pdf>
- Fluke. (s.f.). *Fluke SmartView*. Obtenido de Fluke Web site:  
<https://www.fluke.com/es-mx/producto/software-de-fluke/fluke-smartview-ir-mobile>
- Gomez, E. (2010). *Radiometría y fotometría*. Obtenido de Sitio web de Laplace:  
<http://laplace.us.es/campos/optica/Optica%20-%20Tema%204%20-%20Radiometria%20y%20Fotometria%20-%202010-11.pdf>
- Gómez, R. (30 de Octubre de 2018). *La Ecuación del Fabricante de Lentes | Física | Óptica | V11 | Egg Educación*. Obtenido de Youtube:  
<https://www.youtube.com/watch?v=hdt6vUWRJEY>
- Habic. (2014). *MADERA Y FUEGO*. Obtenido de Sitio web Habic:  
<https://habic.eus/wood/madera-y-fuego.aspx>
- Hecht, E. (2000). *Optica*. España: Pearson.

Hernandez, M. (3 de Junio de 2014). *Transferencia de calor por convección y radiación*. Obtenido de Sitio web Slideshare:  
<https://es.slideshare.net/MiguelAngelHernandezTrejo/transferencia-de-calor-por-conveccion-y-radiacion#:~:text=Radiaci%C3%B3n%20EF%82%B7%20C%C3%A1culo%20de%20la%20transferencia%20de%20calor,crisol%20y%20DE%20el%20di%C3%A1metro%20externo%20del%20crisol.>

Hydrosight. (s.f.). *Ventanas de acrílico vs. ventanas de vidrio*. Obtenido de Sitio web de Hydrosight: <https://www.hydrosight.com/es/vidrio-vs-acrilico-la-comparacion>

Jenkins, R., Aldwell, B., Yin, S., Meyer, M., Robinson, A. J., & Lupoi, R. (Octubre de 2019). *Energy efficiency of a quartz tungsten halogen lamp: Experimental and numerical approach*. doi:10.1016/j.tsep.2019.100385

Kapter. (11 de Julio de 2019). *Las tres formas de transmisión de calor*. Obtenido de Kapter: <https://www.kapter.mx/2019/07/11/las-tres-formas-de-transmision-calor/>

Malacara, D. (2015). *Óptica básica*. Fondo de cultura económica.

Muros, A. (s.f.). *La madera y la iluminación del espacio*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/115232/la%20madera%20y%20la%20iluminaci%C3%B3n%20del%20espacio.pdf;jsessionid=18931C2BD160095101B3A72DE4967A52?sequence=1>

NASA. (23 de Abril de 2020). *El espectro electromagnético: luz visible*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=xlPoa3uH1PA>

NASA. (4 de Febrero de 2021). *Que es un Laser?* Obtenido de Sitio web Space Place: <https://spaceplace.nasa.gov/laser/sp/>

National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. (s. f.). *Rayos X* <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/rayos-x>

Nuclear power. (s.f.). *Stefan–Boltzmann Law – Stefan-Boltzmann Constant*. Obtenido de Sitio web Nuclear Power: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/radiation-heat-transfer/stefan-boltzmann-law-stefan-boltzmann-constant/>

Ortiz, J. (22 de Junio de 2021). *¿Cómo funciona un CNC Plasma?* Obtenido de Stanser: <https://www.stanser.com/como-funciona-un-cnc-plasma/>

OSRAM. (s.f.). *64635 HLX | OSRAM PIA*. Obtenido de Sitio web de OSRAM: [https://www.osram.es/ecat/L%c3%a1mparas%20hal%c3%b3genas,%20con%20reflector%20MR16-L%c3%a1mparas%20hal%c3%b3genas%20de%20bajo%20voltaje-L%c3%a1mparas%20hal%c3%b3genas-Industry-Iluminaci%c3%b3n%20especial/es/es/GPS01\\_1028532/ZMP\\_56082/](https://www.osram.es/ecat/L%c3%a1mparas%20hal%c3%b3genas,%20con%20reflector%20MR16-L%c3%a1mparas%20hal%c3%b3genas%20de%20bajo%20voltaje-L%c3%a1mparas%20hal%c3%b3genas-Industry-Iluminaci%c3%b3n%20especial/es/es/GPS01_1028532/ZMP_56082/)

Pérez, H. (2012). *Física general*. D.F., Mexico: Grupo Editorial Patria.

RP Photonics. (s.f.). *Optical power*. Obtenido de Sitio web de RP photonics: [https://www.rp-photonics.com/optical\\_power.html](https://www.rp-photonics.com/optical_power.html)

Ryer, A. (26 de Septiembre de 1997). *The Power of Light*. Obtenido de Sitio web de Homepages: [https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL\\_COPIES/RYER/ch02.html](https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/RYER/ch02.html)

Salvador, J. (5 de Julio de 2019). *Cortadora CNC láser. Beneficios, ventajas y utilidades*. Obtenido de Stanser:

<https://www.stanser.com/cortadora-cnc-laser-beneficios-ventajas-y-utilidades/>

SoftDeluxe. (s.f.). *SE309 4.2*. Obtenido de SoftDeluxe Website:

<https://softdeluxe.com/SE309-51289/>

Solidbi. (s.f.). *SOLIDWORKS. Qué es y para qué sirve*. Obtenido de Solidbi sitio web:

<https://solid-bi.es/solidworks/>

Shutterstock. (s.f.). *Conducta de convección de transferencia de calor y radiación. Métodos de transferencia de calor*. Obtenido de Shutterstock sitio web:

<https://www.shutterstock.com/es/image-vector/heat-transfer-convection-conduction-radiation-methods-2086620067>

StudySmarter. (s.f.) *Espectro electromagnético*. Obtenido de StudySmarter sitio web:

<https://www.studysmarter.es/resumenes/fisica/ondas/espectro-electromagnetico/>

Testo. (s.f.). *Tabla de emisividades*. Obtenido de Sitio web Media Testo:

<https://media.testo.com/media/bd/b7/179e2db5dca8/Emissivity-table-ES.pdf#:~:text=Material%20%28temperatura%20del%20material%29%20Emisividad%20Acero%20laminado%20en,%C2%B0C%29%200%2C09%20Aluminio%2C%20muy%20oxidado%20%2893%20%C2%B0C%29%200%2C2>

Thorlabs. (s.f.). *Radiometric vs. Photometric Units*. Obtenido de Sitio web de Thorlabs:

<https://www.thorlabs.de/catalogPages/506.pdf>

Valenzuela, D. (s.f.). *Refracción de la luz y ley de Snell*. Obtenido de fisic:

<https://www.fisic.ch/contenidos/optica/refracci%C3%B3n-de-la-luz-y-ley-de-snell/>

Valenzuela, D. (s.f.). *Refracción de la luz y ley de Snell*. Obtenido de fisic:

<https://www.fisic.ch/contenidos/la-luz/lentes-delgadas/>

Visual Led. (s.f.). *LED (light emitting diode)*. Obtenido de Sitio web de Visual Led:

<https://visualled.com/glosario/que-es-un-led/>

ZEMAX. (s.f.). *The optical design industry is moving forward*. Obtenido de ZEMAX Web site:

<https://www.zemax.com/pages/the-optical-design-industry-is-moving-forward>