



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

“DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA LA PRODUCCIÓN DE LUZ BLANCA, BASADO EN ILUMINACIÓN LÁSER DE ESTADO SÓLIDO”



Tesis que para obtener el grado de Maestro en Optomecatrónica

Presenta: Jesús Abraham Álvarez Jáuregui

Director de Tesis: Dr. Haggeo Desirena Enrriquez

León · Guanajuato · México
Diciembre de 2020

Agradecimientos Institucionales

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico recibido durante mis estudios como alumno en el programa de Maestría en Optomecatrónica; ya que sin este apoyo no hubiese sido posible la culminación del programa de estudios.



Al Centro de Investigaciones en Óptica A.C., por la formación integral que recibí por parte de todo el personal docente durante mi estancia en él, por la amabilidad y gran servicio brindado por el personal administrativo; igualmente por el espacio de trabajo y los recursos proporcionados para la realización de este trabajo.



Agradecimientos

A Dios, por darme la vida y salud para seguir adelante.

A mis padres, por todo el apoyo y confianza que me brindaron en toda esta etapa y siempre, sin la cual no hubiera sido posible este logro.

Al Dr. Haggeo Desirena Enriquez, por el tiempo, orientación y conocimientos que me brindó, al igual que sus grandes consejos y experiencia.

A mi esposa María, por todos los ánimos y paciencia que en todo éste tiempo me ha brindado.

A todos los integrantes del grupo del laboratorio de NAFOMA Paulina, Jorge, Alex y Luis, por su gran comañerismo y buenas ideas, que me brindaron cada vez que fue necesario.

A los excompañeros del grupo del laboratorio de NAFOMA: José e Ignacio, por el apoyo incondicional de su experiencia y conocimientos.

Resumen

La iluminación de estado sólido (SSL) está actualmente gobernando la industria de la iluminación. Los principales elementos de la SSL son los diodos emisores de luz LEDs y los fósforos conversores. Cuando la combinación de estos dos elementos produce luz blanca, se le denomina WLED.

Una de las aproximaciones para un WLED, es la combinación de un LED de emisión azul y un fósforo de emisión amarilla. Algunas de las razones del gran éxito de los WLED son su eficiencia y durabilidad; sin embargo, los WLED tienen el problema de no poder alcanzar potencias altas de manera nativa; debido a que, la naturaleza del funcionamiento de los LED les impide mantener su eficiencia a altas densidades de corriente eléctrica.

Por lo anterior descrito, se ha llegado a proponer la sustitución del LED, por un diodo láser (LD). Los LD sí pueden alcanzar potencias elevadas sin perder eficiencia; pero conlleva a otro problema y es la degradación del fósforo conversor.

En los WLED, se suelen contener los fósforos en resinas orgánicas, pero estos materiales no son capaces de resistir la potencia de un LD. Por lo tanto, es necesario utilizar materiales soportes más resistentes. Por ejemplo, los materiales cerámicos que tienen mejor conductividad térmica y estabilidad química a temperaturas mayores que las resinas.

En este trabajo se propone el diseño para un prototipo de iluminación, que utiliza pastillas cerámicas con fósforo amarillo y un láser azul de alta potencia como fuente de luz blanca. El dispositivo está pensado para su implementación en un faro de automóvil, de manera específica en un faro de luz alta.

Se realizó el diseño de las piezas, circuitos, así como la selección de materiales y componentes que se necesitan para construir el dispositivo. El dispositivo comprende la fuente de luz, el sistema auxiliar para el funcionamiento de la fuente de luz y un reflector que genera el patrón de iluminación.

Igualmente se propone un método de fabricación para las pastillas de fósforo que se utilizan en el dispositivo. Incluyendo la composición química del material y los parámetros de fabricación a través de sus diferentes etapas, como lo son tiempos, temperaturas, atmósfera y tratamientos superficiales.

Índice general

| | |
|--|-------------|
| Índice de figuras | VIII |
| Índice de tablas | IX |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Objetivos y metas | 2 |
| 1.2. Justificación | 2 |
| 1.3. Estructura de la tesis | 3 |
| 2. La iluminación de estado sólido | 4 |
| 2.1. Iluminación de estado sólido basada en LED, SSL | 4 |
| 2.1.1. Producción de luz blanca por medio de SSL | 4 |
| 2.1.2. Los diodos emisores de luz, LED | 7 |
| 2.1.3. Los fósforos conversores y los materiales soporte | 9 |
| 2.2. Iluminación de estado sólido basada en láser, SSSL | 12 |
| 2.2.1. El láser de estado sólido azul | 12 |
| 2.2.2. Los primeros pasos de la tecnología SSSL | 13 |
| 2.2.3. Los materiales soporte para aplicaciones de SSSL | 13 |
| 2.2.4. Aplicaciones industriales del SSSL | 15 |
| 2.2.5. El SSSL en la industria automotriz | 16 |
| 2.3. Conclusión del capítulo | 16 |
| 3. Fabricación del material soporte y las pastillas de fósforo | 17 |
| 3.1. Características de un material soporte para SSSL | 17 |
| 3.2. Metodología de fabricación del material soporte | 18 |
| 3.3. Metodología de las pastillas de fósforo | 20 |
| 3.4. Metodología de caracterización de las pastillas de fósforo | 23 |
| 3.5. Conclusión del capítulo | 26 |
| 4. Diseño del prototipo | 27 |
| 4.1. Características fotométricas requeridas en un faro de automóvil | 27 |
| 4.2. Consideraciones y limitaciones para el prototipo | 30 |
| 4.3. Metodología para el diseño del prototipo | 33 |
| 4.3.1. Diseño de los reflectores | 34 |
| 4.3.2. Diseño del sistema de refrigeración | 39 |
| 4.3.3. Diseño del sistema electrónico de alimentación y control | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4. Conclusión del capítulo | 42 |
| 5. Resultados y análisis | 43 |
| 5.1. Metodo de fabricación de las pastillas de fósforo | 43 |
| 5.2. Características fotoluminiscentes de las pastillas de fósforo | 45 |
| 5.2.1. Espectros de emisión | 46 |
| 5.2.2. Pruebas de temperatura | 48 |
| 5.2.3. Características fotométricas de las pastillas | 50 |
| 5.2.4. Discusión de los resultados de las pastillas de fósforo | 53 |
| 5.3. Diseño resultante del prototipo de iluminación | 54 |
| 5.3.1. Simulaciones para el sistema de refrigeración | 55 |
| 5.3.2. Simulaciones para el trazo de rayos | 61 |
| 5.3.3. Circuito electrónico del módulo láser | 65 |
| 5.3.4. Discusión de resultados del prototipo de iluminación | 68 |
| 6. Conclusiones | 71 |
| 6.1. Trabajo futuro | 71 |
| A. Iteraciones del diseño del material | 73 |
| B. Elementos de fabricación para circuito electrónico del prototipo | 77 |
| C. Piezas y planos para la construcción del prototipo | 83 |
| D. Cálculo del coeficiente de convección para una placa vertical | 97 |
| Referencias | 99 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 2.1. Radiación del Sol | 5 |
| 2.2. Emisión de semiconductores | 6 |
| 2.3. Configuraciones para fósforos conversores | 6 |
| 2.4. Suma de emisión de LED azul y YAG:Ce ³⁺ | 7 |
| 2.5. Diagrama simplificado del funcionamiento de un LED | 7 |
| 2.6. Comparativa de potencia y eficiencia para un LED y LD | 8 |
| 2.7. Diagramas del mecanismo upconversion y downconversion | 10 |
| 2.8. Niveles energéticos de excitación y emisión del YAG:Ce ³⁺ | 11 |
| 2.9. Degradación de la resina orgánica por temperatura | 11 |
| 2.10. Fenómeno de la interdifusión | 11 |
| 2.11. Diagrama de funcionamiento de un LD | 13 |
| 2.12. Comportamiento de la eficiencia de los LEDs y LDs | 14 |
| 3.1. Celda unitaria del granate YAG | 18 |
| 3.2. Metodología para el diseño del material | 19 |
| 3.3. Metodología para la fabricación de las pastillas | 21 |
| 3.4. Ejemplo de un patrón de speckle | 22 |
| 3.5. Metodología de caracterización de las pastillas | 24 |
| 3.6. Experimento para medir espectros de emisión | 25 |
| 3.7. Experimento para evaluar del quenching térmico | 25 |
| 3.8. Experimento para medir el calentamiento en las pastillas | 25 |
| 3.9. Experimento para mediciones en la esfera integradora | 26 |
| 4.1. Patrones de iluminación en los faros de automóvil | 28 |
| 4.2. Patrón de iluminación para la luz alta | 28 |
| 4.3. Distribución puntual de candelas para luz alta y baja | 29 |
| 4.4. Tabla de los valores de candelas para luz alta y baja | 30 |
| 4.5. Mapa de color publicado en el estándar SAE J578 | 31 |
| 4.6. Diagrama simplificado del reflector | 33 |
| 4.7. Metodología para el diseño del prototipo | 34 |
| 4.8. Configuraciones para espejos parabólicos | 35 |
| 4.9. Herramientas utilizadas para el diseño del reflector | 36 |
| 4.10. Sólidos y configuración del escenario de la simulación de trazo de rayos | 37 |
| 4.11. Simulación de trazo de rayos por APEX | 38 |
| 4.12. Circuito básico de control de corriente por voltaje | 42 |

| | |
|---|----|
| 5.1. Diagrama del proceso de fabricación | 45 |
| 5.2. Base para sostener muestras en las pruebas | 46 |
| 5.3. Ejemplo de pastilla excitada por el láser | 47 |
| 5.4. Ejemplos de pastillas fabricadas | 48 |
| 5.5. Espectros de emisión de las pastillas fabricadas | 48 |
| 5.6. Pruebas de temperatura con cámara térmica | 49 |
| 5.7. Quenching térmico de las pastillas | 50 |
| 5.8. Tendencia de la ELO, con respecto al <i>wt %</i> de YAG:Ce ³⁺ | 52 |
| 5.9. Componentes del prototipo de iluminación | 55 |
| 5.10. Ensamblaje del sistema de refrigeración | 56 |
| 5.11. Máxima diferencia de temperatura alcanzada por el peltier | 57 |
| 5.12. Simulación termodinámica del disipador de la pastilla de fósforo | 58 |
| 5.13. Simulación termodinámica del disipador del LD | 59 |
| 5.14. Distancia del centro de la pastilla a los perfiles parabólicos | 60 |
| 5.15. Vista hacia la pastilla desde la perspectiva del láser | 61 |
| 5.16. Mapa de distribución de candelas a 18.3 m del faro | 62 |
| 5.17. Mapa de distribución de luxes a nivel de piso | 63 |
| 5.18. Diseño final del dispositivo de iluminación | 64 |
| 5.19. Diagrama del circuito regulador de corriente por voltaje | 66 |
| 5.20. Diagrama del circuito para el microcontrolador | 66 |
| 5.21. Diagrama del circuitos de alimentación | 67 |
| 5.22. Toma de decisiones por control de temperatura | 68 |
| 5.23. Representación virtual del circuito electrónico del dispositivo | 69 |
| | |
| B.1. Plantilla superior para fabricar el circuito principal | 77 |
| B.2. Plantilla inferior para fabricar el circuito principal | 78 |
| B.3. Plantilla para fabricar el circuito regulador de corriente derecho | 78 |
| B.4. Plantilla para fabricar el circuito regulador de corriente izquierdo | 79 |
| B.5. Programa del microcontrolador del dispositivo parte 1 | 79 |
| B.6. Programa del microcontrolador del dispositivo parte 2 | 80 |
| B.7. Programa del microcontrolador del dispositivo parte 3 | 80 |
| B.8. Programa del microcontrolador del dispositivo parte 4 | 81 |
| | |
| C.1. Plano para la base del lente del láser | 84 |
| C.2. Plano para el sujetador del láser | 85 |
| C.3. Plano para la base del láser | 86 |
| C.4. Plano de base aislante | 87 |
| C.5. Plano del disipador del láser | 88 |
| C.6. Plano de la montura de los láseres | 89 |
| C.7. Plano de la cubierta del reflector | 90 |
| C.8. Plano del reflector alto | 91 |
| C.9. Plano del disipador de la pastilla de fósforo | 92 |
| C.10. Plano del sujetador de la pastilla de fósforo | 93 |
| C.11. Plano de la parte inferior del encapsulado | 94 |
| C.12. Plano de la parte superior del encapsulado | 95 |
| C.13. Plano de la parte posterior del encapsulado | 96 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 2.1. Comparativa de tecnologías de iluminación | 5 |
| 3.1. Elementos de sustitución en el material soporte | 20 |
| 3.2. Compuestos precursores | 20 |
| 3.3. Parámetros de fabricación | 23 |
| 4.1. Estándares para faros de automóvil por la SAE | 28 |
| 4.2. Coeficientes de convección | 41 |
| 5.1. Parámetros de fabricación finales para las pastillas de Sr | 44 |
| 5.2. Parámetros de fabricación finales para las pastillas de Sr | 44 |
| 5.3. Resultados de los rendimientos térmicos | 50 |
| 5.4. Características fotométricas de las pastillas | 52 |
| 5.5. Comparativa de las pastillas contra trabajos similares | 54 |
| 5.6. Parámetros para simulaciones termodinámicas | 57 |
| 5.7. Resultado de distribución de candelas para el reflector | 63 |
| A.1. Iteraciones realizadas para la fabricación del material parte 1 | 74 |
| A.2. Iteraciones realizadas para la fabricación del material parte 2 | 75 |
| A.3. Iteraciones realizadas para la fabricación del material parte 3 | 76 |
| B.1. Componentes electrónicos | 82 |
| C.1. Piezas que conforman el prototipo | 83 |
| C.2. Tornillería del prototipo | 83 |
| D.1. Características del aire consideradas para la simulación | 98 |

Introducción

La iluminación de estado sólido (SSL), por medio de los diodos emisores de luz (LED), ha revolucionado la industria de la iluminación. Es una de las tecnologías más eficientes y una de las más limpias para generar luz de todo tipo. Los LEDs de luz blanca estándar WLEDs, utilizan un fósforo con emisión amarilla soportados por una pasta basada en resinas orgánicas; la cual, es excitada con un chip LED de luz azul, la combinación de ambas emisiones genera la luz blanca. Sin embargo, la tecnología aún presenta algunas limitaciones en su desempeño; por ejemplo, cuando es expuesta a altas densidades de corriente la temperatura sube, dando como resultado la degradación de la eficacia luminosa del fósforo y la disminución de la eficiencia o daño irreversible del chip LED.

Algunos trabajos muestran que la potencia máxima que pueden alcanzar los WLED es cercana a los 5 a 10 W/cm^2 [1, 2]. Esto limita su rango de aplicación; por ejemplo, en sistemas como proyectores, faros de vehículos e iluminación de recintos de gran envergadura. Dichas aplicaciones demandan potencias mayores a las proporcionadas por los WLEDs. La utilización de la iluminación láser de estado sólido (SSL) basados en diodos láser (LDs) abre las puertas al mundo de la alta potencia, ya que los LDs son capaces de suministrar hasta 25 kW/cm^2 [1, 2].

Si se sustituye el LED por un LD, se puede solventar el problema en aplicaciones de alta potencia; debido a que, los LD pueden funcionar a altas densidades de corriente y la temperatura no afecta de manera considerable su eficiencia. Pero, para poder implementar dicha sustitución, se deben hacer cambios en el encapsulado de fósforo que se utilizaría con el LD. Como ya se mencionó, se utilizan resinas orgánicas para contener los fósforos en los WLED, pero a altas potencias estos materiales simplemente se destruyen. Por lo que, se debe generar un nuevo tipo de material soporte que contenga al compuesto fotolumincente y así poder utilizarlo con un LD.

Existen algunas aproximaciones que intentan solucionar el anterior dilema, sustituyendo los materiales soporte orgánicos por materiales amorfos inorgánicos tales como el vidrio, mejorando así la conductividad térmica. Sin embargo, durante su proceso de fabricación, el material amorfo puede llegar a degradar al fósforo conversor por medio de un fenómeno conocido como interdifusión [3]. Esto nos indica que no se ha llegado a una solución definitiva para éste problema.

1.1. Objetivos y metas

Este trabajo pretende contribuir de manera incremental a un trabajo previamente realizado en el laboratorio de Nanofotónica y Materiales Avanzados (NAFOMA) [4]. Con esto se busca dar el siguiente paso para generar aplicaciones de algunos de los materiales que se desarrollan en dicho laboratorio.

Objetivos:

- Proponer una metodología de fabricación de pastillas de fósforo en encapsulante; las cuales, tengan mejor conductividad térmica y resistencia mecánica que los encapsulados de resinas orgánicas ampliamente utilizados. Además, las pastillas deben de mantener lo mejor posible las propiedades fotoluminiscentes del fósforo.
- Diseñar un prototipo de iluminación de estado sólido que utilice las pastillas de fósforo fabricadas y retroiluminación láser, centrando su aplicación para un faro de automóvil.

Metas:

- Obtención de los datos experimentales de la eficiencia y capacidades, de las pastillas fabricadas del fósforo comercial YAG:Ce³⁺ utilizando retroiluminación láser con emisión azul.
- Realizar una metodología de fácil reproducción e implementación, tanto para la fabricación del material como para la construcción del prototipo.
- Realizar pruebas en entornos simulados de las partes del sistema diseñado, para comprobar su funcionamiento antes de su fabricación.

Además, el trabajo considera lo siguiente:

- Que el material soporte será basado en investigaciones y conocimiento previo desarrollado en el laboratorio de NAFOMA.
- Que el dispositivo de iluminación diseñado será una prueba de concepto, por lo que no incluirá todos los elementos necesarios para su industrialización.

1.2. Justificación

La utilización de compuestos cerámicos fotoluminiscentes con retroalimentación láser es el futuro de la iluminación de alta potencia, gracias a ellos se pueden crear dispositivos muy eficientes, lo cual es lo más buscado hoy en día para el ahorro de la energía. Algunos ejemplos de trabajos que abordan la creación de este tipo de sistemas

se pueden leer en [5–7].

La demanda actual, de dispositivos de iluminación láser de estado sólido de alta potencia, ha aumentado considerablemente más que la de los dispositivos de baja potencia; especialmente en la industria automotriz, justo como lo podemos leer en [8].

En años recientes, la industria automotriz se ha incrementado considerablemente en la zona del bajío en Guanajuato [9, 10]. Con el desarrollo de esta clase de tecnología se abre la posibilidad de vincular al CIO con tales empresas.

1.3. Estructura de la tesis

Este trabajo se encuentra dividido en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1**, contiene la naturaleza, el propósito y objetivo a grandes rasgos del trabajo de tesis.
- **Capítulo 2**, plantea los fundamentos teóricos y el estado arte en materia de iluminación de estado sólido SSL e iluminación láser de estado sólido SSLL.
- **Capítulo 3**, aborda las consideraciones y metodología para la fabricación del material aglutinante y las pastillas de fósforo.
- **Capítulo 4**, describe los elementos básicos para la implementación de la tecnología de SSLL y presenta la metodología para el diseño del prototipo.
- **Capítulo 5**, presenta de manera gráfica los resultados obtenidos, tanto para las pastillas de fósforo, como para los elementos del dispositivo de iluminación. Igualmente, se realiza una comparación de la competencia de las pastillas de fósforo fabricadas contra similares.
- **Capítulo 6**, recopila las conclusiones globales que se obtuvieron en este trabajo de tesis y la proyección del trabajo a futuro.
- **Apéndices**, en ellos se agregan planos, diagramas y los componentes necesarios para la construcción del prototipo. Así como, las iteraciones realizadas en la fabricación del material e información complementaria.
- **Referencias**, finalmente acompaña a este trabajo, el listado de fuentes de información consultadas para su realización.

La iluminación de estado sólido

2.1. Iluminación de estado sólido basada en LED, SSL

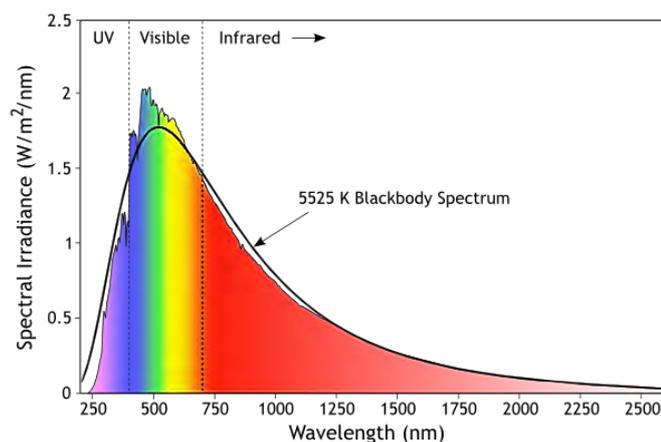
Debido al calentamiento global, la contaminación masiva del planeta y la disminución de los recursos naturales; se ha apresurado el desarrollo de las tecnologías limpias y amigables con el medio ambiente, buscando aprovechar al máximo los recursos y desperdiciar el mínimo de energía en cualquier sistema. Con la llegada de la invención del LED blanco en 1995 por Shuji Nakamura, se vislumbró el gran potencial de los LED para la iluminación. Claro está que desde entonces, el desarrollo de la tecnología LED ha seguido su curso y se ha mejorando su eficiencia y la calidad de la luz. Gracias a que los LEDs han llegado a alcanzar eficiencias altas y tiempos de vida largos, son candidatos excelentes para cumplir con los propósitos medioambientales actuales; por lo que, la iluminación de estado sólido basada en LED, mejor conocida como SSL, ha llegado para quedarse. En la Tabla 2.1 podemos ver la comparación entre las tecnologías de iluminación, donde se aprecia claramente la superioridad de la tecnología SSL (LED) en cuanto a eficacia luminosa y tiempos de vida. Adicionalmente, los LEDs son compactos, ligeros, mecánicamente resistentes y no utilizan elementos químicos agresivos al medio ambiente; como sí lo son los vapores de mercurio utilizados en las lámparas compactas fluorescentes (CFL).

2.1.1. Producción de luz blanca por medio de SSL

La luz blanca no es más que la combinación de todas las longitudes de onda visibles; por ejemplo, el espectro de emisión producido por el sol que se puede ver en la Figura 2.1; tiene un espectro de emisión que va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, pero la luz que nosotros vemos solo es una fracción del total, la cual va desde los 400 *nm* hasta los 700 *nm*. El SSL utiliza varias aproximaciones para la generación de luz blanca; ya que los LED por sí solos únicamente generan luz con un ancho de banda relativamente estrecho de alrededor de 30 a 50 *nm*.

Tabla 2.1: Comparación entre las tecnologías de iluminación, datos obtenidos de [11].

| Parámetro | Lámpara Incandescente | Lámpara Halógena | Lámpara de Sodio | Lámpara de Mercurio | Lámpara Compacta fluorescente | SSL LED |
|--------------------------|-----------------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------------------|-------------|
| Potencia (W) | 60 | 40-100 | 200 | 40-1000 | 13-15 | 6-8 |
| Eficacia luminosa (lm/W) | 12-18 | 16-29 | 100-190 | 35-65 | 70 | 28-150 |
| Tiempo de vida (h) | 750-1200 | 1700-2500 | 18000 | 24000 | 8000 | 35000-50000 |

**Figura 2.1:** Longitud de onda contra la irradiancia producida por el sol, que se puede identificar a nivel de piso. Imagen recuperada de <https://www.quora.com/Which-wavelength-or-color-of-sunlight-contains-the-most-heat>

La emisión de un LED estará centrada a diferentes longitudes de onda, dependiendo de los materiales Figura 2.2 y la estructura del que este hecha su región activa del LED. Luego entonces; para poder producir luz blanca se necesita complementar las longitudes de ondas faltantes, puede ser combinado la emisión de varios LED con diferentes picos de emisión, o combinando la emisión de un solo LED con la de algún fósforo que emita en longitudes de onda adicionales. Esta ultima técnica es una de las mas utilizadas por su simplicidad y robustez [12]. A la combinación de LEDs que emiten en UV o azul y fósforos que emiten a longitudes de onda menos energéticas, para dar como resultado luz blanca se le denomina WLED.

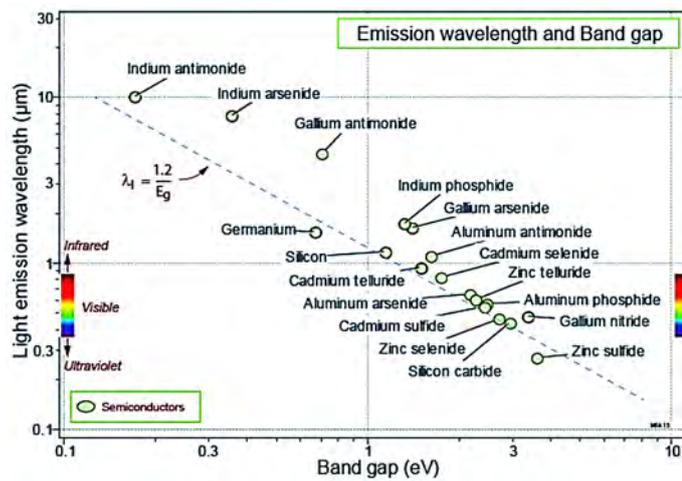


Figura 2.2: Emisión de los semiconductores dependiendo de la energía de banda prohibida, imagen obtenida de [13].

Para esto, es necesario hacer interactuar la emisión del chip LED con el fósforo convertidor; comúnmente se utiliza la técnica de transmisión, en donde la luz del LED se hace pasar a través de un fósforo soportado por algún material, comúnmente resinas orgánicas. El resultado de la combinación de la emisión del LED y del fósforo, genera luz blanca a diferentes tonalidades dependiendo del tipo de fósforo convertidor. En la Figura 2.3, podemos observar algunos de los arreglos de LEDs azules y fósforos amarillos. Igualmente en la Figura 2.4, podemos identificar el resultado de la suma de los espectros del LED azul y la del fósforo YAG:Ce³⁺.

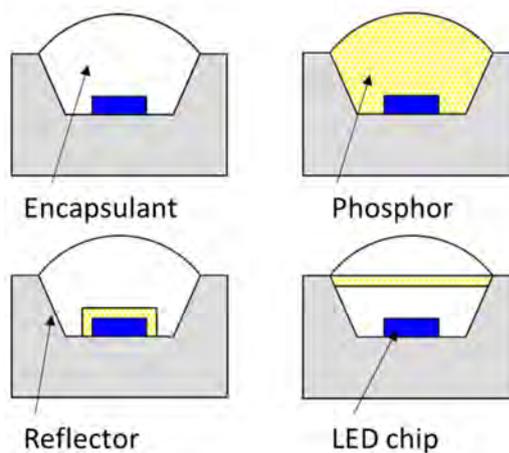


Figura 2.3: Algunas configuraciones utilizadas para la implementación de los fósforos conversores en un chip LED, imagen adaptada de [14].

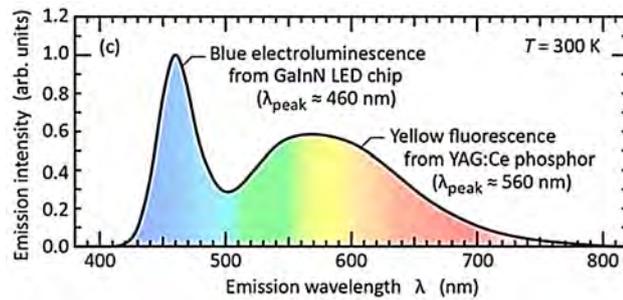


Figura 2.4: Suma de los espectros de emisión de un LED azul y el fósforo YAG:Ce³⁺, imagen obtenida de [12].

2.1.2. Los diodos emisores de luz, LED

Actualmente el SSL basado en LED, tiene aplicaciones tanto para baja potencia como alta potencia; utilizándose en la industria de las comunicaciones, alimentos, salud, automotriz, iluminación de casa habitación, alumbrado público o de recintos de gran envergadura, por mencionar algunas. En todas estas aplicaciones, la potencia óptica requerida puede llegar a variar desde menos de un Watt hasta centenas de Watts. Es bien sabido que la gran eficiencia de los LEDs, sólo se presenta cuando trabajan a bajas densidades de potencia, esto se debe al fenómeno conocido como “thermal droop”. Dicho fenómeno es consecuencia de la naturaleza de funcionamiento de los LEDs, donde se hace uso otro fenómeno llamado emisión espontánea y el cual tiene dependencia de la temperatura.

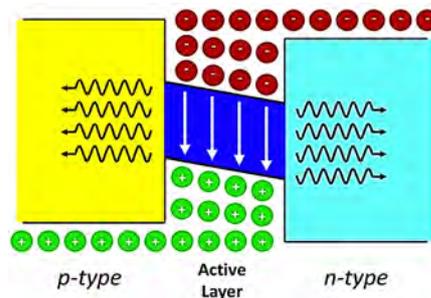


Figura 2.5: Diagrama simplificado del funcionamiento de un LED con doble heteroestructura; donde los círculos rojos representan los electrones, los círculos verdes los huecos, las flechas blancas representan la recombinación electrón/hueco y las flechas negras los fotones generados. Imagen obtenida de [19].

De manera general, la “emisión espontánea” se da gracias a la recombinación de un electrón con un hueco (ambos conocidos como portadores de carga) dentro de un material semiconductor, Figura 2.5. Por lo que, la eficiencia depende de la tasa de recombinación que presente la estructura y los materiales semiconductores que componen el LED. La longitud de onda de emisión y el voltaje de funcionamiento del LED, que-

dan definidos en cierta manera por el nivel de energía de la banda de conducción del material semiconductor utilizado. Por lo tanto, como el voltaje de funcionamiento no puede cambiar; si se quiere aumentar la potencia de un LED se necesita aumentar la corriente.

Como los materiales semiconductores presentan una cierta resistencia al paso de la corriente; al aumentar la potencia, el flujo de corriente aumenta y se genera calor. La tasa de recombinación de portadores es altamente dependiente de temperatura del material; ya que, provoca que la probabilidad de recombinación disminuya y los portadores no cambien de nivel de energía en un solo salto, provocando radiación fonónica, entre otros fenómenos [15–18]; lo que se traduce en más calor y menor eficiencia. Es por lo descrito anteriormente que, si se gráfica la potencia óptica contra a la corriente aplicada para cualquier LED, la gráfica resultante será como la mostrada en la Figura 2.6(a).

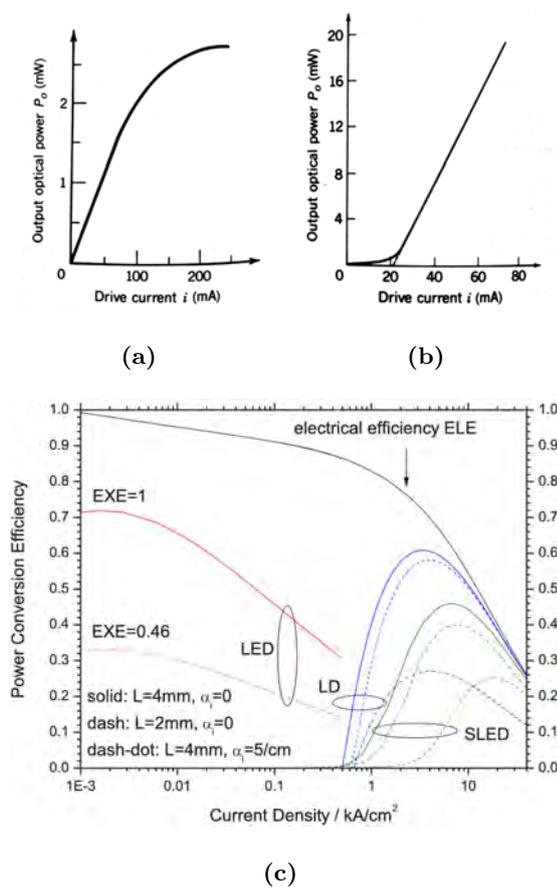


Figura 2.6: Gráficas de potencia óptica contra corriente aplicada para, a) un LED y b) un LD. Imágenes obtenidas de [20]. c) Comparativa del estado del arte actual para las eficiencias de conversión para LED y LD azules a diferentes longitudes de cavidad (L) y absorciones internas (α_i), imagen obtenida de [21].

Por lo tanto se puede concluir que, la tecnología del LED es incapaz de mantener su eficiencia en altas potencias. A pesar de esto se continúan proponiendo soluciones, una de ellas que es relativamente simple y es utilizar matrices de LED; en donde cada una de las potencias de los LEDs individuales se suman, para alcanzar la potencia requerida por la aplicación. Sin embargo, esta solución no es muy práctica; debido a que, si los LEDs se conectan en serie y alguno de ellos falla el dispositivo completo deja de funcionar. Además de que, al estar los LEDs tan juntos en la matriz, el calor se acumula e igualmente llega a afectar la eficiencia del conjunto. Debido a los problemas descritos, dicha solución no es la mejor para las aplicaciones de alta potencia.

2.1.3. Los fósforos conversores y los materiales soporte

Como ya se menciona en la sección 2.2.1, los compuestos fotoluminiscentes o como son comúnmente conocidos en el SSL como fósforos conversores, son materiales capaces de absorber fotones de cierta longitud de onda y emitirlos de nuevo pero a diferente longitud de onda. Esto es posible gracias a dos fenómenos conocidos como “down-conversion” y “up-conversion”. Donde, el “up-conversion” implica la absorción por parte de un átomo de dos o más fotones de baja energía (radiación infrarroja), para después producir uno de mayor energía (radiación visible) Figura 2.7(a). En contraste, el “down-conversion” implica que el átomo absorbe fotones de alta energía (radiación UV o azul), y los libera en fotones de menor energía (radiación visible por debajo del azul) Figura 2.7(b). Los fotones que se pueden absorber y emitir dependen de los compuestos y la estructura del que este formado el material, pero siempre respetando la ley de la conservación de la energía. Cabe resaltar que el proceso de “down-conversion” logra eficiencias mucho mayores que las del “up-conversion”, ya que, se ven implicados menos factores de pérdida de energía; donde el más importante es que, para producir fotones de baja energía solo se necesita absorber un fotón de alta energía, a diferencia de que para producir un fotón de alta energía se necesita la coincidencia de absorción de dos o más fotones de baja energía.

Los fósforos conversores para generar luz blanca, se han venido desarrollando desde mucho antes de la creación de los LEDs, ya que se han utilizado desde las lámparas fluorescentes en 1867 por A. E. Becquerel. Sin embargo, desde que se inventó el primer LED azul por Shuji Nakamura en 1994, igualmente el LED azul ultra brillante en 2014 también por Nakamura; se ha impulsado una carrera por la invención de fósforos con mayores eficiencias cuánticas y emisiones más controladas; buscando mejorar eficiencias cuánticas QE, el índice de reproducción cromática CRI y la temperatura de color CCT.

En la actualidad existen una gran variedad de fósforos conversores utilizados en SSL, capaces de generar una gran gama de longitudes de onda [22, 23]. Pero, uno de los más utilizados para la producción de luz blanca es el YAG:Ce³⁺, gracias a que posee una QE de hasta 85, que es de las más altas y un CRI de hasta 71 [22]. La estructura del YAG:Ce³⁺ es capaz de interactuar con los fotones con longitud de onda alrededor de 450 nm por medio del fenómeno de “down-conversion”, absorbiendo la energía y excitando los electrones de los átomos Ce³⁺, que saltan de nivel 4*f* al 5*d*₁, ver Figura 2.8; una vez que el electrón excitado desciende del nivel energético 5*d*₁ se

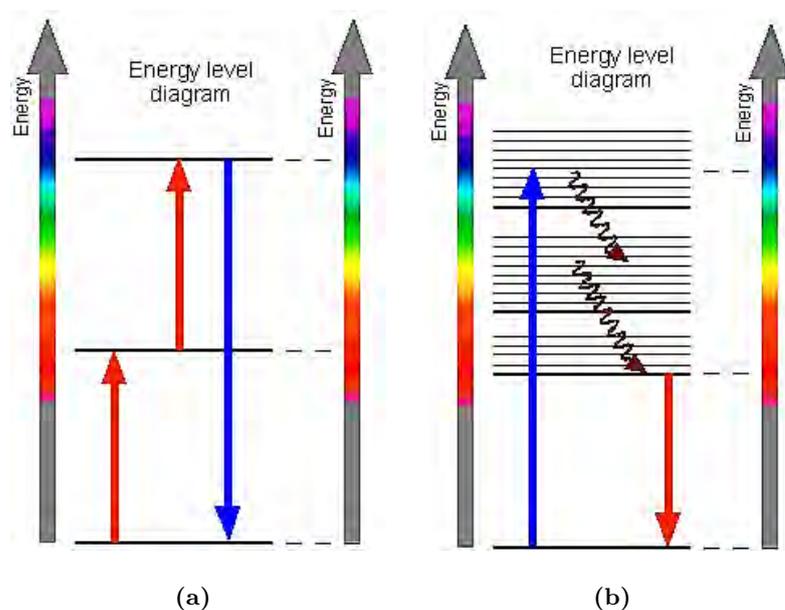


Figura 2.7: Diagramas representativos de mecanismo básico de funcionamiento, para a) upconversion y b) downconversion. Imágenes recuperadas y adaptadas de <https://guedel.dcb.unibe.ch/research>.

produce un espectro de emisión centrado en 565 nm .

De la mano del desarrollo de los fósforos, se han desarrollado los materiales que se utilizan de soporte. Si bien, en los inicios del SSL se utilizaban resinas o siliconas orgánicas como soporte para las nano partículas de fósforo; conforme las aplicaciones y los propios LEDs fueron aumentando su potencia, se comenzó la sustitución de dichos materiales orgánicos por materiales inorgánicos. Ya que, las resinas se degradan y opacan en presencia de altas temperaturas como se observa en la Figura 2.9, a diferencia de los materiales inorgánicos que tienen una mayor resistencia a las altas temperaturas.

Un ejemplo de dicha estrategia son los llamados PiGs, los cuales, son vidrios totalmente amorfos mezclados con fósforo; las aproximaciones ya implementadas en esta área son variadas, utilizando diferentes tipos de compuestos y técnicas de fabricación [25–29]. Sin embargo, uno de los problemas principales que se tiene con los PiGs, es que pueden llegar a degradar al fósforo disminuyendo su rendimiento cuántico [3, 29], a este fenómeno se le conoce como interdifusión, un ejemplo de él lo podemos apreciar en la Figura 2.10. Es por esto que, se continúa la búsqueda de un material, que pueda soportar las nano partículas de fósforo sin alterar sus características originales y que además sea capaz de soportar mayores temperaturas por periodos largos de tiempo.

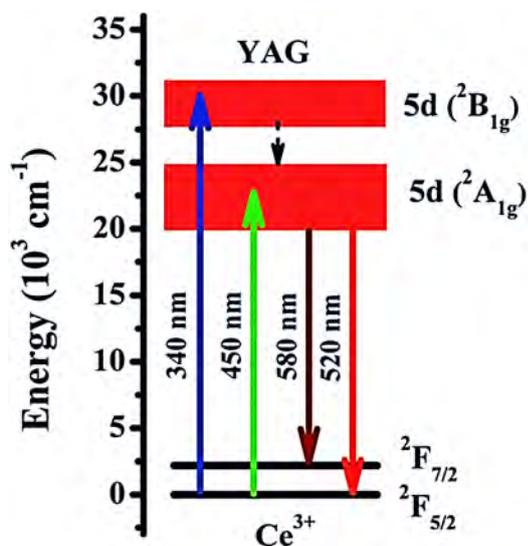


Figura 2.8: Gráfico que representa los niveles energéticos de excitación y emisión del YAG:Ce³⁺. Imagen adaptada de [24]

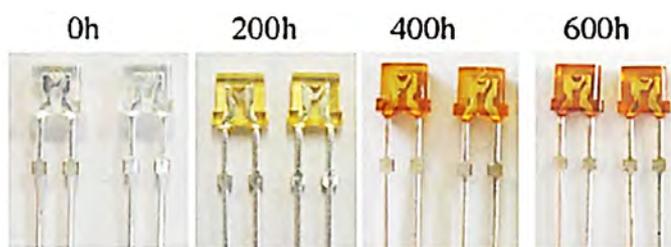


Figura 2.9: Ejemplo de la degradación de la resina orgánica empleada en los LEDs comunes, a una temperatura de trabajo de 150 °C. Imagen obtenida de [30].

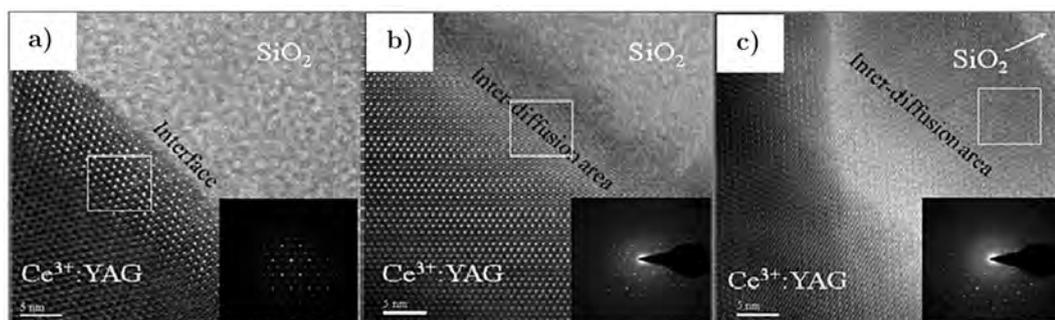


Figura 2.10: Ejemplo del fenómeno de la interdifusión para un mismo tiempo de sinterizado pero a diferentes temperaturas de un PiG. Donde se aplicó a) 700 °C, b) 800 °C y c) 900 °C. Imagen adaptada de [30].

Otra aproximación son los vidrios cerámicos PiGCs [30–32] o los materiales completamente cerámicos PiCs [33–36], los cuales sin duda alguna mejoran la resistencia mecánica y térmica de los PiGs; pero pueden llegar a ser más difíciles de fabricar porque necesitan de mayores temperaturas y tiempos para formarse.

Uno de los soportes cerámicos con mejores propiedades es el Al_2O_3 , ya que pueden alcanzar una conductividad térmica de hasta $35 W/mK$ [37] y conservan bien las propiedades originales del fósforo, alcanzando EL de hasta $181 lm/W$ [38] a una densidad de potencia de $3 W/mm^2$. Hay bastante información acerca de este tipo de soporte [37–39], e inclusive una patente [40]. Sin embargo, el proceso de fabricación es medianamente complicado al requerir equipamiento especial, como lo son los hornos de “spark plasma sintering”.

2.2. Iluminación de estado sólido basada en láser, SSL

2.2.1. El láser de estado sólido azul

Paralelamente a la tecnología LED, el LASER (light amplification by stimulated emission of radiation) a través de los años ha ido mejorando sus métodos de fabricación, eficiencias cuánticas, entre otras características. Pero, es hasta que Shuji Nakamura en 1997 [41] propone un método de fabricación para láseres de estado sólido compuestos de nitruro III-V, se comienza a considerar la posibilidad de sustituir un diodo láser LD por el LED, en el SSL. Ya que, hasta entonces no se tenía un láser azul de estado sólido compacto, que funcionase a onda continua y por inyección de corriente. Sin embargo, para las fechas de la publicación de este tipo de láseres, el SSL por medio de LED recién estaba tomando fuerza y por el momento no se prestó mucho interés en dicha posibilidad.

El LD a diferencia del LED, utiliza un fenómeno llamado “emisión estimulada”; dicho fenómeno sucede cuando un fotón de específica longitud de onda, interactúa con un átomo que posee un electrón en un nivel energético excitado. La longitud de onda del fotón debe coincidir con el nivel energético del electrón excitado del átomo. Cuando esto sucede, el electrón excitado salta a su estado base y su energía es liberada por medio de un fotón adicional; el cual, tendrá la misma longitud de onda, fase y dirección del fotón que interactuó con el átomo. Para poder generar un haz de luz intenso y coherente, se debe construir una estructura que favorezca dicho fenómeno.

De manera simple, la estructura debe constar de; un medio activo en forma de prisma o cilindro hecho de un material que facilite la llamada inversión de población, dos espejos uno con máxima reflectividad y otro con reflectividad parcial (por donde saldrá el haz láser), colocados en extremos opuestos del medio activo y finalmente un sistema capaz de bombear energía hacia el medio activo para excitar sus átomos, ver Figura 2.11. Este tipo de estructura promueve la confinación de los fotones, provocando un efecto de amplificación de la intensidad de la longitud de onda de los fotones que producen los átomos del medio activo. Cabe mencionar que el fenómeno de “emisión

estimulada” no se ve afectado por la temperatura del medio activo.

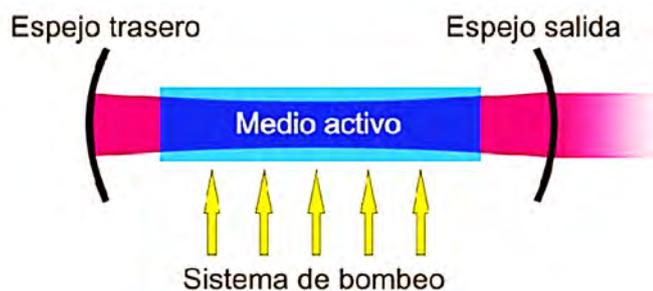


Figura 2.11: Diagrama básico de la estructura de un LD, imagen adaptada de [42].

Al igual que los LED, los láseres de estado sólido de materiales semiconductores, funciona igual que un LED en su arranque; esto es previo a alcanzar la corriente de umbral la cual coincide con el punto de inversión de población. Pero, una vez llegando a la inversión de población el LD no sufre una disminución considerable de su eficiencia, gracias a que depende más de la “emisión estimulada” que de la “emisión espontánea”; por lo que la eficiencia recae más en otros factores como, pérdida óptica, resistencia en serie, entre otras [2, 18, 43]. Por lo tanto, si se gráfica la potencia óptica contra la corriente aplicada siempre se obtendrá algo semejante a la Figura 2.6(b). Dicho esto, podemos concluir que los LDs pueden manejar potencias mayores que los LEDs, sin perder en gran medida su eficiencia.

2.2.2. Los primeros pasos de la tecnología SSLL

El SSL ha demostrado que, la estrategia de producción de luz blanca por medio de la combinación de una emisión de un chip LED y la emisión de un fósforo, es eficiente y duradera a bajas potencias. Sin duda, la sustitución del LED por un LD es el siguiente paso en el desarrollo del SSL, creando así el SSLL. Además del gran beneficio en la eficiencia de los LD en altas potencias y estabilidad térmica, Figura 2.12; la potencia óptica puede ser mejor aprovechada por el fósforo conversor, ya que si bien el fósforo puede absorber fotones en un cierto ancho de banda, siempre se tendrá una longitud de onda específica donde ocurre la mayor absorción de fotones. Por lo que, controlando correctamente la emisión del láser, se puede hacer coincidir el pequeño ancho de banda del LD (hasta 2 nm para algunos láseres de estado sólido) que concentra toda la potencia, con la longitud de onda de máxima absorción del fósforo; lo que garantiza que la mayoría de los fotones emitidos por el LD puedan ser aprovechados por el fósforo.

2.2.3. Los materiales soporte para aplicaciones de SSLL

Sin embargo, para lograr aplicar SSL por medio de un LD, es necesario reinventar la forma en la que los fósforos conversores se integran a los dispositivos. Ya que,

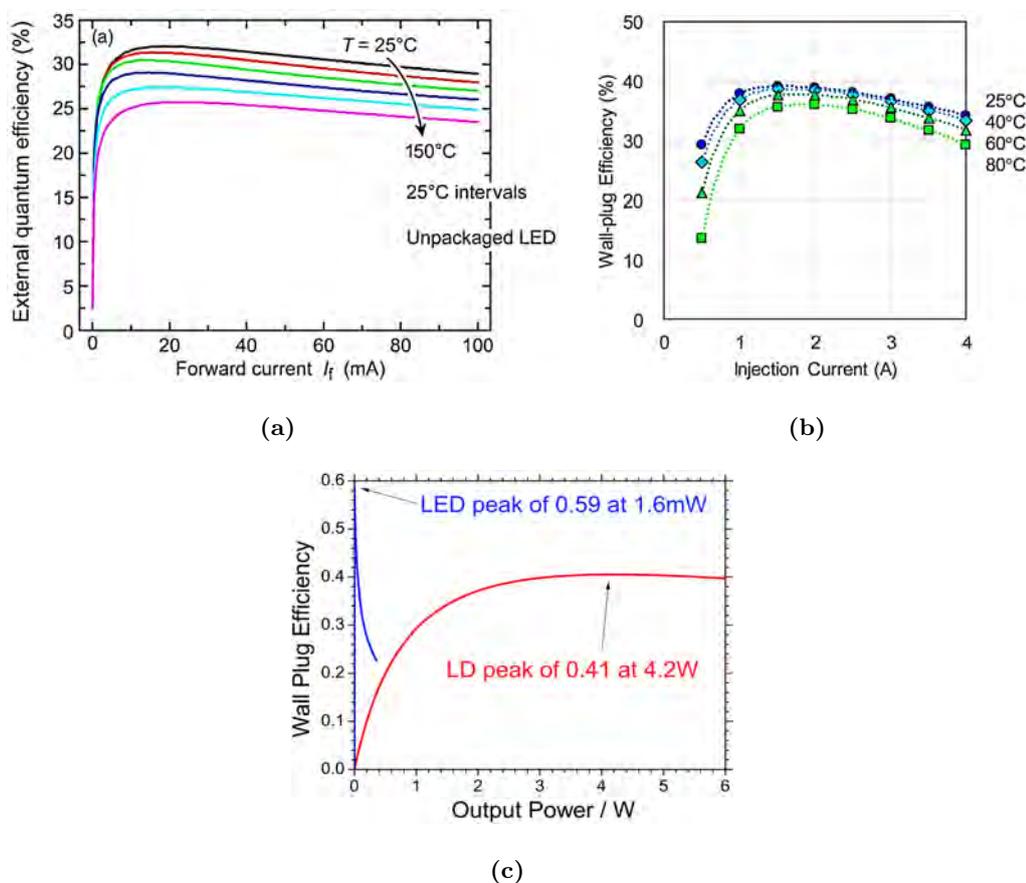


Figura 2.12: Gráficas que demuestran el comportamiento de la eficiencia de cualquier tipo para a) LED azul (EQE) adaptada de [44], b) LD azul (WPE) obtenida de [45] y c) la comparativa entre las WPE contra la potencia de salida que pueden alcanzar un LED y un LD obtenida de [46].

como en los LEDs se manejan bajas densidades de potencia (menos de un W/mm^2), los soportes utilizados para los fósforos no tienen una gran conductividad térmica, alrededor de 0.1 a 0.4 W/mK [33]. Pero para una aplicación con LDs, el arreglo del fósforo deberá de soportar una densidad de potencia muy elevada (decenas de W/mm^2); todas las investigaciones en el tema buscan que el arreglo del fósforo soporte altas temperaturas durante largos periodos de tiempo, sin degradarse o perder sus propiedades de emisión; ya sea por el fenómeno del “quenching” térmico o por la descomposición química. Por lo tanto, se debe mejorar la estabilidad química, resistencia mecánica y la conductividad térmica de los materiales. Al final, todo se traduce en la eficiencia luminosa (EL, lm/W) que el arreglo de fósforo es capaz de generar, a la par de la potencia y temperatura a la que se pueden mantener dicha EL.

Ya se han desarrollado arreglos de fósforo para su aplicación en SSL. Por ejemplo,

hay publicaciones en donde se revisa la utilización de monocristales de YAG:Ce^{3+} [39,47–51]. Donde se puede concluir que, la resistencia a la temperatura y conductividad térmica de un monocristal de YAG:Ce^{3+} es mejor que la de una resina orgánica o un vidrio combinado con nanocristales, principalmente gracias su conductividad térmica que va de 9 a 14 W/mK ; además de que, el fósforo conserva sus propiedades de emisión originales alcanzando hasta 150 lm/W [49]. Sin embargo, el proceso para crear dichos cristales suele ser muy tardado y complicado; múltiples pasos, tiempos de sintetizado largos y temperaturas altas llegando hasta más de 1700 °C [47, 48, 51], se traducen en un proceso costoso y poco práctico para su industrialización.

En otros trabajos, se crea un material soporte para nano cristales de YAG:Ce^{3+} . Esta es una de las formas más comúnmente utilizadas por la practicidad en su fabricación, como lo es el método de reacción de estado sólido. Es semejante a la técnica utilizada en las aplicaciones de LED mencionadas en la sección 2.2; pero en este caso se intentan crear materiales más resistentes, como vidrios cerámicos y cerámicos [6, 35, 37, 38, 52–54]; debido a que, los materiales parcial o completamente cerámicos pueden alcanzar una conductividad térmica de 5 a 15 W/mK [33]. Con esta técnica se busca poder compactar el fósforo de una manera menos costosa que en un monocristal, equiparando o aumentando la conductividad y estabilidad térmica; todo esto sin comprometer las propiedades de emisión del fósforo.

En algunos trabajos más, se propone realizar el deposito del nano cristales de YAG:Ce^{3+} sobre un sustrato de zafiro [5, 55–58], con la idea de que el sustrato de zafiro extraiga rápidamente el calor residual, gracias a su conductividad térmica de 50 W/mK . Los resultados en este caso logran un EL de hasta 200 lm/W a una potencia óptica del láser elevada [5, 57], gracias a la gran conductividad térmica que posee el zafiro se evita el “quenching” térmico en el fósforo. Dichos resultados son bastante buenos; sin embargo, igualmente el método de fabricación es medianamente complicado y también depende del soporte que se utilice para adherir las nano partículas de fósforo al sustrato de zafiro.

Un detalle que cabe mencionar es que, al ser la emisión de un LD de fácil confinamiento y concentración por su coherencia, se puede implementar de manera sencilla el uso de fósforos remotos. Esto se refiere a que, el chip LD y el fósforo no están en contacto, por lo que la temperatura generada en el chip láser no se transfiere al fósforo y que además se le puede colocar al fósforo un sistema de disipación de calor independiente, mejorando así el rendimiento del mismo. Igualmente, un fósforo remoto facilita la implementación de la técnica de reflexión, para la combinación de las emisiones; donde, se ha encontrado que la técnica de reflexión es la que menos pérdidas presenta [59, 60], en comparación a la clásica técnica de transmisión para la producción de luz blanca, ampliamente utilizada en los LEDs.

2.2.4. Aplicaciones industriales del SSLL

Ya hay en el mercado aplicaciones de SSLL [61]. Por ejemplo en la industria médica, en equipos de endoscopía, logrando miniaturización del dispositivo y proporcionando mejor iluminación e imágenes nítidas. En pico-proyectores y proyectores,

proporcionando equipos con mayor nitidez, eficiencia y más duraderos; desarrollados por empresas como Sony, Epson, LG, Optoma, Xiaomi, entre otras. O en la industria automotriz, especialmente enfocados a faros de automóvil, gracias al intenso brillo y las largas distancias que pueden alcanzar con este tipo de dispositivos de iluminación. Igualmente se continúan desarrollando formas de aplicar la tecnología del SSL como lo podemos leer en [40, 62–69].

2.2.5. El SSL en la industria automotriz

El mercado de la iluminación automotriz; al necesitar tecnologías compactas, ligeras, con altas potencias y eficiencias; se ha interesado especialmente por las capacidades del SSL. Por ejemplo, empresas como OSRAM, BMW y Audi; ya han estado desarrollando modelos de faros basados en la tecnología láser desde el año 2011. Sin embargo, los faros de SSL no ha tenido mucha popularidad; ésto tal vez se deba a que la tecnología sigue teniendo un precio elevado, sumando a que anteriormente no existían regulaciones para este tipo de dispositivos.

Por ejemplo, EUA había vetado la tecnología del SSL de las calles; debido a su incertidumbre en su seguridad, ya que implica la utilización de láseres peligrosos de muy alta potencia. Sin embargo, recientemente a finales del año 2018, la asociación de “The National Highway Traffic Safety Administration” (NHTSA) ha llegado a una reforma para poder permitir los dispositivos de SSL en los faros de los vehículos [70]. Por lo tanto, podemos vislumbrar un futuro crecimiento de este tipo de dispositivos en el continente americano en los años venideros, y lo podemos comprobar con la aparición de investigaciones y patentes que se han venido publicando [54, 66–69, 71, 72].

2.3. Conclusión del capítulo

En éste capítulo se realizó un resumen del estado del arte en materia de SSL, revisando el porqué de su gran desarrollo y éxito en el mercado de la iluminación. Además, se introdujo el funcionamiento de dicha tecnología y como es que se puede extrapolar para las aplicaciones de SSL. Igualmente, se recopiló algunos de los avances en investigación y desarrollo de los materiales fotoluminocentes, comúnmente conocidos como fósforos; los cuales, son una parte vital de los dispositivos SSL. Se revisó también, las ventajas y desventajas del SSL contra SSL, y como es que más que una sustitución para el SSL, el SSL es un complemento para las aplicaciones de alta potencia. Finalmente, se hizo especial referencia a una de las industrias donde ya se ha comenzado a implementar la tecnología del SSL, dicha industria es la automotriz que es una de las más presentes en el estado de Guanajuato.

Fabricación del material soporte y las pastillas de fósforo

Los diseños de dispositivos de SSL optan por utilizar nano partículas que son mas fáciles de fabricar y manipular. Dichas partículas se combinan con un material soporte, como lo son las resinas orgánicas o silicones, para formar pastillas o recubrimientos que se adapten fácilmente a los chips LED. Por lo tanto, el objetivo del compuesto soporte es contener al fósforo comercial, para así poder manipularlo y adaptarlo a la aplicación deseada. Evidentemente el material soporte debe ser más sencillo de fabricar y manipular que el fósforo a contener, con esto se refiere a que la forma y parámetros de fabricación deben ser relativamente “más fáciles” de alcanzar.

En el caso de este trabajo, el fósforo comercial a utilizar es el YAG:Ce³⁺ producido por la empresa PhosphorTech Corporation. Se eligió esta clase de fósforo, ya que, es él más utilizado para aplicaciones de producción de luz blanca por medio de la combinación con luz azul; gracias a que su longitud de onda de excitación se encuentra en el rango de la emisión de los láseres azules (450 nm). Adicionalmente, la eficiencia cuántica del YAG:Ce³⁺ es de las mejores entre los fósforos amarillos, llegando a ser de 85 % [22].

3.1. Características de un material soporte para SSL

Como ya se expresó en el capítulo 2, el material soporte que se utilice en aplicaciones de SSL, debe soportar el embate de una densidad de potencia de varios W/mm^2 . Por lo que necesita cumplir con las siguientes características:

- Ser químicamente estable y soportar “altas temperaturas” por periodos prolongados sin destruirse o degradarse.
- Tener una conductividad térmica suficiente para disminuir el efecto del “quenching” térmico en el fósforo.

- Conservar lo mayor posible las características originales del fósforo al interactuar con él.

Por lo anterior mencionado, se pretendió generar un material cerámico; debido a que, los cerámicos tienen mejor conductividad térmica que los vidrios amorfos. Además, se buscó que el compuesto tienda a asemejar en estructura al fósforo comercial, con el objetivo de que el material no interfiera o destruya en gran medida la estructura original del fósforo. El fósforo YAG:Ce³⁺ tiene una estructura de granate, justo como se observa en la Figura 3.1. Por lo tanto, el material soporte se debe asemejar a dicha estructura.

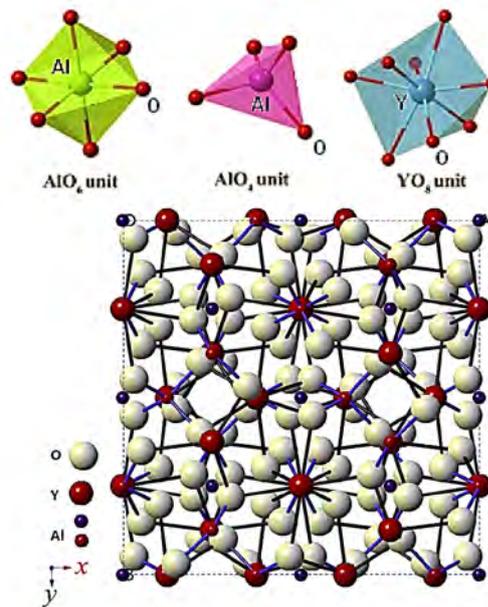


Figura 3.1: Celda unitaria del granate itrio-aluminio (YAG), donde podemos observar los poliedros de itrio (azúl), tetraedros de aluminio (rosa) y octaedros de aluminio (verde). Imágen obtenida de [73].

3.2. Metodología de fabricación del material soporte

En el trabajo de H. Ji et al. [31], discuten la creación de un nuevo fósforo capaz de competir con el comercial YAG:Ce³⁺, la composición es la siguiente:

$$Y_{2-y}Ce_yMAl_4SiO_{12} \quad (3.1)$$

Esta composición se fabrica por el proceso de sinterizado, donde $y = (0.04, 0.06, 0.08)$ y $M = Ba, Ca, Mg, Sr$, estos índices y elementos realizan sustituciones de poliedros YO₈ por MO₈ y tetraedros de AlO₄ por SiO₄. Podemos identificar las

partes de la estructura que sustituyen observando la Figura 3.1. El trabajo [31] llega a la conclusión de que el compuesto $Y_{2-y}Ce_yBaAl_4SiO_{12}$ tiene una alta naturaleza cristalina y por lo tanto, un buen desempeño térmico. Cabe mencionar que ésta composición esta libre de restricción de patentes.

Se hace notar que, la composición mantiene la estructura de granate, la cual se busca en este trabajo. Claro esta que el objetivo del trabajo de H. Ji et al. era crear un nuevo tipo de fósforo y no un material soporte, pero gracias a la naturaleza de su fabricación, el compuesto puede llegar a ser utilizado como tal.

Anteriormente, en uno de los trabajos del laboratorio de NAFOMA [4], se había replicado y revisado una de las composiciones mencionadas en [31]. En el trabajo de [4], se utilizó $M = Sr$ y se agregó Boro para sustituir parte del Aluminio, por lo que la fórmula química del compuesto manejado fue:



Este compuesto dió como resultado, la creación de pastillas de fósforo capaces de resistir el embate de un láser cercano a 1.5 W de potencia óptica. Ya que, el trabajo [4] tenía como objetivo la implementación de las pastillas de fósforo para aplicaciones LED de alta potencia, no se realizaron pruebas más detalladas en aplicaciones con láser, pero abrió dicha posibilidad. Sin embargo, el material necesitaba de optimización, debido a que presentaba alta porosidad y poca translucidez, lo cual se traducía en un baja eficacia luminosa. Por lo anterior mencionado, se optó por tomar como punto de inicio la fórmula 3.2 para el presente trabajo; pero en este caso, utilizarlo como material soporte en vez de un fósforo.

El diseño del material soporte y fabricación de las pastillas se realizaron en conjunto. El camino tomado para modificar y comprobar el material se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 3.2.

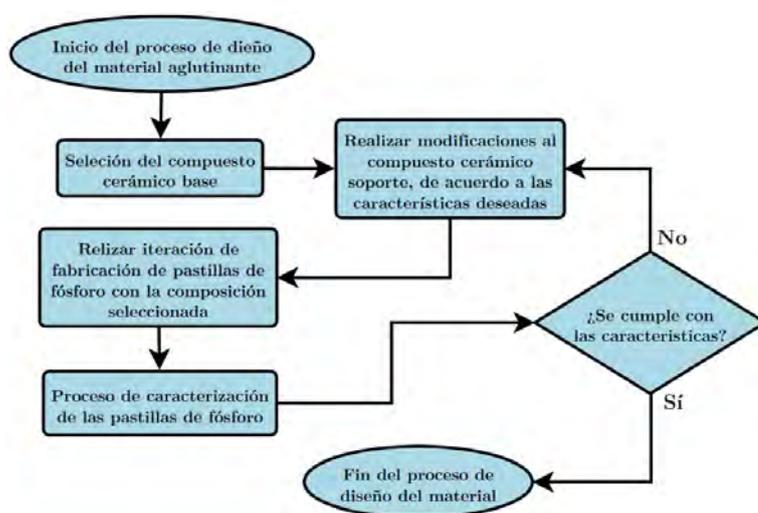


Figura 3.2: Diagrama de flujo de la metodología para el diseño del material soporte.

Sé probaron varias modificaciones adicionales a la fórmula 3.2, realizando la sustitución de algunos de sus elementos, con el objetivo de mitigar los defectos que se tenían en ese material, así como alcanzar las características deseadas. Los elementos que se buscaron sustituir en la fórmula se muestran en la Tabla 3.1. También, se buscó identificar si el cerio es benéfico para el material y en que cantidad.

Tabla 3.1: Elementos que se sustituyeron en la fórmula 3.2 y las características esperadas como resultado.

| Elemento modificable | Elementos de sustitución | Propósito de la sustitución |
|----------------------|--------------------------|--|
| Itrio | Estroncio o Bario | Menor “quenching” térmico y mejor conservación del fósforo comercial |
| Aluminio | Boro | Disminución del punto de fusión |

3.3. Metodología de las pastillas de fósforo

Para poder fabricar las pastillas de fósforo en un solo paso, se utilizó el método de sinterizado. En ésta técnica se pulverizan los compuestos precursores, se mezclan y se aplica presión para compactar lo mayor posible, finalmente se realiza un tratamiento térmico llegando a temperaturas cercanas al punto de fusión del compuesto a formar [74]. Los precursores a utilizar en el proceso de sinterizado se enlistan en la Tabla 3.2. La metodología seguida la fabricación de las pastillas se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 3.3.

Tabla 3.2: Compuestos precursores que se utilizaron para la fabricación del material soporte, donde todos fueron adquiridos de la empresa Alfa Aesar, y poseen una pureza de 99.99%.

| Compuesto | Fórmula Química |
|--------------------------|-----------------|
| Óxido de Itrio (III) | Y_2O_3 |
| Carbonato de Bario | $BaCO_3$ |
| Carbonato de Estroncio | $SrCO_3$ |
| Óxido de Cerio (IV) | CeO_2 |
| Óxido de Aluminio (III) | Al_2O_3 |
| Óxido de Silicio (IV) | SiO_2 |
| Ácido Trioxobórico (III) | H_3BO_3 |

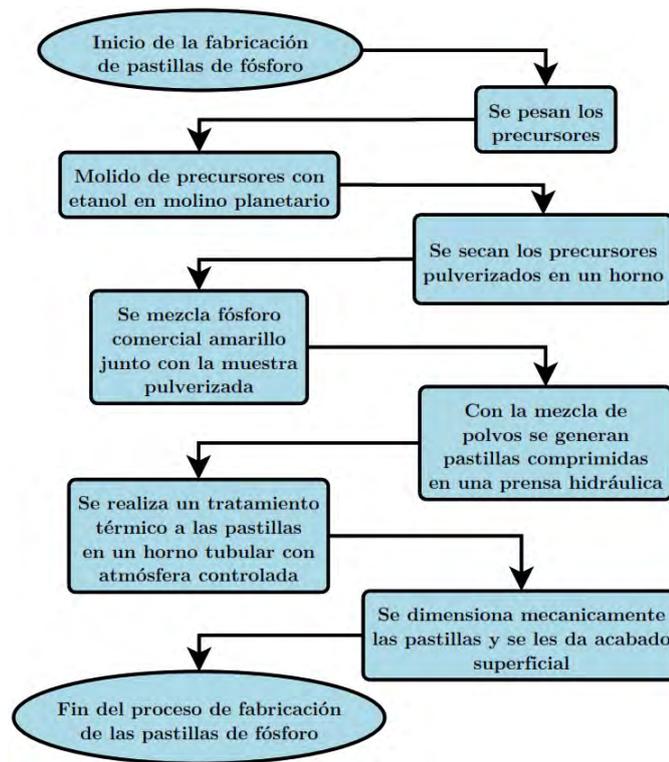


Figura 3.3: Diagrama de flujo de la metodología seguida para la fabricación de las pastillas de fósforo.

El proceso de sinterizado, se basa en la reducción termodinámica de la energía acumulada en la superficie de las partículas; por lo que, existen varios parámetros que favorecen dicho proceso y son los siguientes:

- Los compuestos precursores deben de tener el menor tamaño de partícula posible, para así acumular energía en los límites de los granos.
- Los polvos deben de ser compactados lo mayor posible, para que se reduzcan los espacios vacíos y las partículas entren en contacto.
- La temperatura del tratamiento térmico no debe sobrepasar el punto de fusión del compuesto que se desea formar.

Los pasos a seguir para la fabricación de las pastillas son los siguientes:

- **Pesado de precursores:** se pesan los compuestos según la relación en masa, por medio de los cálculos estequiométricos, con la ayuda de una balanza científica modelo CPA225D marca Sartorius, la cual tiene una resolución de hasta 0.01 *mg*.
- **Molido de los precursores:** los compuestos ya pesados se mezclan con etanol, se agregan esferas de alúmina y se muelen en un molino planetario a una cierta cantidad de revoluciones por minuto y tiempo.

- **Secado de mezcla pulverizada:** la mezcla pulverizada se introduce en un horno a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 8 h para extraer todo el etanol de la mezcla.
- **Adicionado de YAG:Ce³⁺:** a la cantidad de material que se utilizará para fabricar la pastilla, se le adiciona cierto porcentaje en peso (wt %) de YAG:Ce³⁺ y se mezcla manualmente hasta conseguir un color homogéneo.
- **Compresión de pastillas:** la mezcla de material soporte y YAG:Ce³⁺ se introduce en un troquel cilíndrico, que se comprime verticalmente con una prensa hidráulica de 7.75 MPa , para formar pastillas de 8.1 mm de diámetro.
- **Tratamiento térmico:** las pastillas se acomodan a lo largo de un crisol cuadrado el cual se introduce en un horno tubular con una capacidad de calentamiento de 2 hasta $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. El horno se configura para llegar a una cierta temperatura, por un cierto periodo de tiempo. Además, se prepara una atmósfera controlada con la ayuda de las válvulas de entrada y salida del horno tubular.
- **Dimensionamiento y acabado superficial:** finalmente, las pastillas se cortan por medio de un disco de diamante para alcanzar el espesor deseado y se someten a un proceso de “Sandblast” para obtener una superficie difusa.

Cabe mencionar que, obtener una superficie completamente difusa en la cara de la pastilla en donde incidirá el láser es importante; ya que, ayuda a mezclar de manera homogénea la luz altamente coherente del láser, con la luz emitida por el fósforo [75]. Además, se disminuye en gran medida la formación del “speckle” Figura 3.4, el cual es un fenómeno inherente de los sistemas que utilizan una fuente de luz coherente [76]. El fenómeno del “speckle”, se debe a la interferencia constructiva que se da entre los frentes de onda provenientes una fuente de luz que posee coherencia espacial y temporal. El patrón formado no es deseable; y la forma más simple de eliminarlo es cambiar de manera aleatoria el frente de onda de la luz utilizada; disminuyendo así la coherencia espacial de la luz, una superficie difusa es un excelente modificador de fase y ayuda mitigar en gran medida el fenómeno del “speckle”.

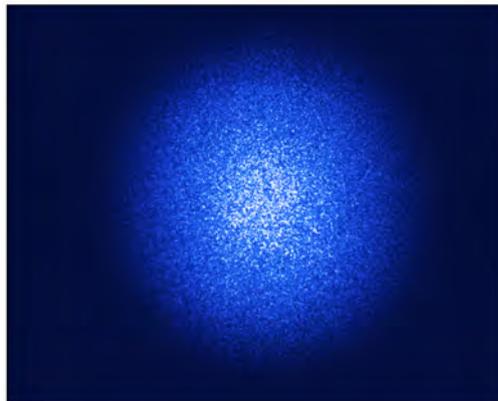


Figura 3.4: Ejemplo del patrón que se puede generar debido al fenómeno del speckle. Imagen adaptada de la hoja de datos LSR-3000 & LSR-OEM Series Optotune.

En la Tabla 3.3, se recopilan los parámetros configurables del proceso de fabricación. Estos parámetros tienen un impacto directo en las pastillas resultantes, por lo que son puntos clave en el proceso de sinterizado.

Tabla 3.3: Parámetros del proceso de fabricación, que pueden manipularse para optimizar las pastillas de fósforo resultantes.

| Etapa de fabricación | Variables |
|-----------------------|--|
| Molido de precursores | Tiempo (<i>h</i>) Diámetro de esferas (<i>mm</i>) Cantidad de esferas (<i>gr</i>) Velocidad del molino (<i>rev/min</i>) |
| Tratamiento térmico | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) Tiempo (<i>h</i>) Atmosfera |
| Dimensionamiento | Espesor de la pastilla (<i>mm</i>) |

3.4. Metodología de caracterización de las pastillas de fósforo

Se realizaron pruebas para evaluar la eficacia luminosa, coordenadas de color y espectros de emisión. Dichas pruebas, se realizaron tanto para las partículas de fósforo comercial, como para las pastillas de fósforo. Además se evaluó el calentamiento que presentan las pastillas con la incidencia del láser y como es que las características fotolumincentes se ven afectadas.

La caracterización de las pastillas de fósforo fabricadas en cada iteración, es un paso esencial para poder discernir la trayectoria para la modificación de la composición del material y la optimización de las variables de fabricación. Es por esto que, se debe tener especial cuidado para controlar dichos parámetros, y así evitar conclusiones erróneas. El diagrama de flujo de la Figura 3.5, muestra el procedimiento tomado para la caracterización de cada pastilla.

Como se observa en la Figura 3.5, se revisó de manera cualitativa, por medio de una lente sencilla con distancia focal de 7 cm , si la pastilla resultante tiene poros visibles. Ya que, una pastilla visiblemente porosa indica que la temperatura del tratamiento térmico no fue la adecuada, sobrepasando el límite exigido por el método de sinterizado. Igualmente, se revisa si la pastilla soporta la incidencia del láser sin dañarse, considerando 1 h de exposición a una densidad de potencia de hasta 2.2 W/mm^2 con un LD modelo PL TB450B de la marca OSRAM. Estas dos pruebas rápidas se realizan únicamente para aceptar o descartar las pastillas para las etapas posteriores de caracterización.

Claro está que, una prueba más adecuada para revisar la resistencia de la pastilla al desgaste de la exposición al láser, sería de por lo menos de varias centenas de horas; sin embargo, las limitaciones de tiempo no dejaron posibilidad de realizar esta clase de prueba.

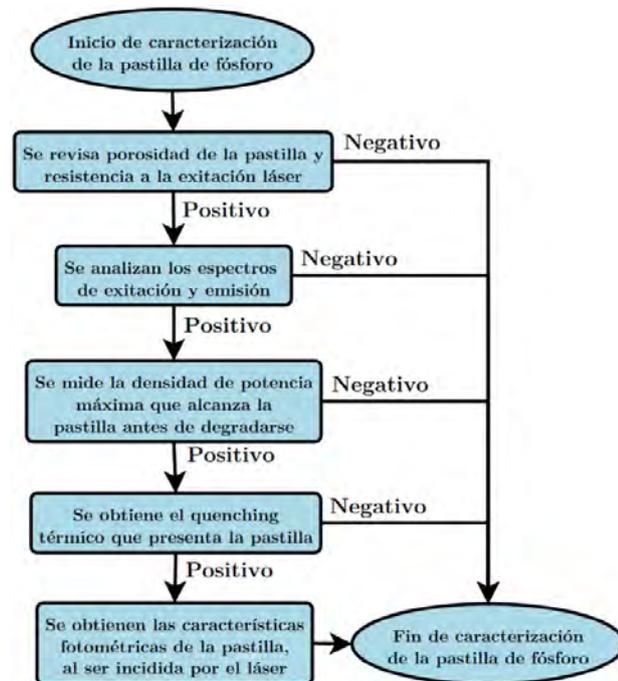


Figura 3.5: Diagrama de flujo para la metodología de caracterización para las pastillas de fósforo.

Igualmente se observa en la Figura 3.5 que, se realizaron caracterizaciones cuantitativas, donde se utilizaron los siguientes equipos y experimentos:

- **Fluorómetro:** utilizado para la medición de espectros de emisión Figura 3.6 y el “quenching” térmico Figura 3.7. El modelo utilizado fue el SpectraPro 2300i del fabricante ACTON Research Corporation.
- **Cámara térmica:** utilizada para evaluar el calentamiento de las pastillas de fósforo, al ser excitadas con un láser a diferentes densidades de potencia Figura 3.8. El modelo utilizado fue el U5855A del fabricante Keysight.
- **Esfera integradora:** utilizada para la medición del flujo luminoso y la eficacia luminosa Figura 3.9. El sistema espectrofotométrico utilizado fue el Labsphere Illumia Plus 2100 con un diámetro de 100 cm.

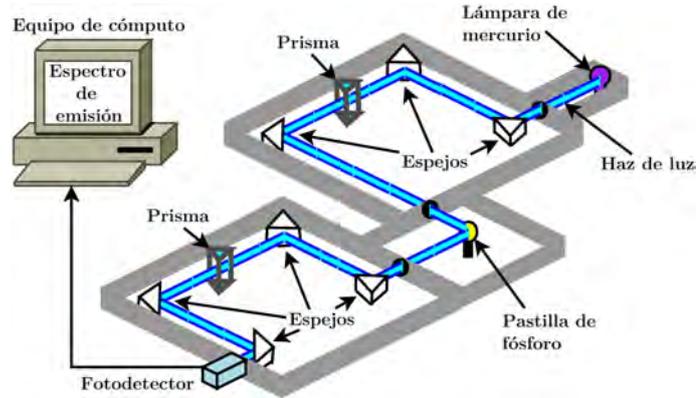


Figura 3.6: Diagrama del experimento, para la medición de espectros de emisión en el fluorómetro.

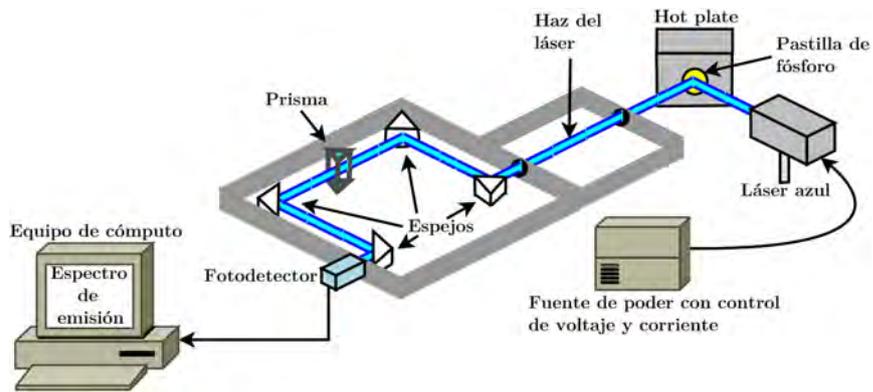


Figura 3.7: Diagrama del experimento, para la evaluación del "quenching" térmico, con el fluorómetro y un "hot plate".

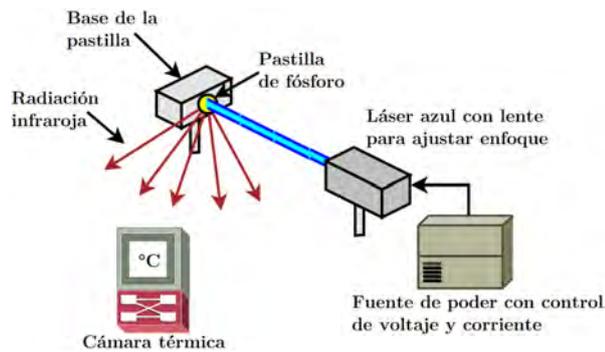


Figura 3.8: Diagrama del experimento, para la medición del calentamiento en las pastillas, con la cámara térmica.

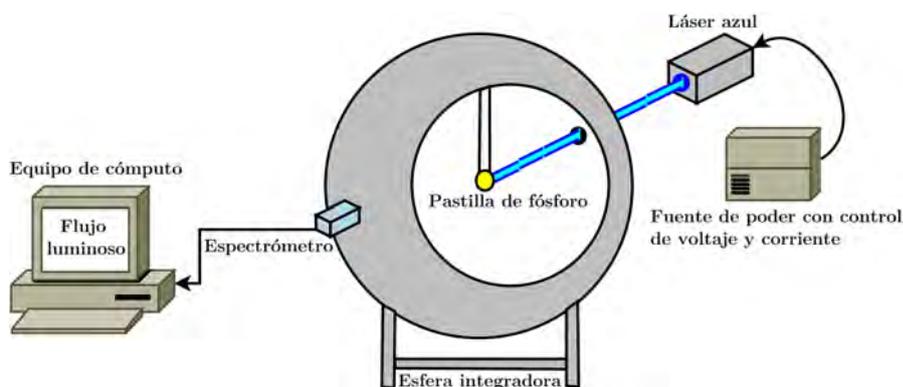


Figura 3.9: Diagrama del experimento para la medición de las características fotoluminiscentes.

3.5. Conclusión del capítulo

Con el propósito de formular un compuesto, capaz de formar pastillas de fósforo que resistan altas densidades de potencia, utilizando un proceso de fabricación relativamente sencillo, como lo es el sinterizado; se optó por partir de un compuesto cerámico, capaz de generar una estructura cristalina semejante a la del fósforo comercial más utilizado, el YAG:Ce^{3+} . Además, se propuso una metodología de caracterización evaluando cualitativa y cuantitativamente las pastillas de fósforo; buscando el mantener las propiedades fotoluminiscentes del fósforo comercial y además tener una buena conductividad térmica.

Diseño del prototipo

4.1. Características fotométricas requeridas en un faro de automóvil

Un faro de automóvil en su expresión más básica, es un dispositivo que se monta frente a un vehículo automotor y consta de una fuente de luz y un reflector; con el propósito de iluminar el camino al frente y adicionalmente proporcionar visibilidad del vehículo. En sus inicios, la fuente de luz provenía de velas o lámparas de acetileno, siguiendo con las lámparas incandescentes, halógenas, xenon y finalmente con lo que conocemos hoy como SSL y SSLL. De la misma manera, los reflectores han ido evolucionando incluyendo superficies reflectoras más avanzadas, tanto en el recubrimiento reflejante, como en la morfología de su superficie.

En la actualidad, existen modelos que incluyen inteligencia para adaptarse a las condiciones del camino, aumentando o disminuyendo la intensidad de su fuente de luz o modificando la posición de los reflectores, todo esto sin interferencia del usuario; este tipo de faros se les denomina “Adaptive Front Lighting Systems”(AFS) [77]. Pero, sin importar las características de cada modelo de faro, todos se ven gobernados por reglamentos y normativas que indican los requerimientos mínimos y máximos necesarios.

En México, no existen regulaciones específicas para los faros de vehículos, pero los estándares que oficialmente competen a América del Norte por medio del TLCAN (Tratado de Libre Comercio de América del Norte) hoy en día T-MEC (Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá), son las publicadas en la “Federal Motor Vehicle Safety Standards; Lamps, Reflective Devices, and Associated Equipment” por la “National Highway Traffic Safety Administration”(NHTSA). Aunque, algunos de los fabricantes instalados en el estado de Guanajuato son europeos; por ejemplo, Valeo Lighting, Hella o ZKW, y utilizan el “1958 Agreement” de “The United Nations Economic Commission for Europe”(UNECE) [78].

Pero de manera general, la NHTSA y la UNECE buscan proponer requerimientos mínimos para garantizar una visibilidad suficiente y límites máximos de iluminación

4.1 Características fotométricas requeridas en un faro de automóvil

para evitar el deslumbramiento, con el objetivo de garantizar la seguridad al utilizar algún modelo de faro en una situación real de conducción. En este trabajo se consideró la regulación proporcionada por la "NHTSA", por medio de los estándares de la "Society of Automotive Engineers (SAE)" que se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Estándares que indican las características de iluminación que debe de cumplir un faro de automóvil por parte de SAE.

| Estandar | Título |
|----------------|---|
| 49 CFR 571.108 | SAE J1383: Performance Requirements for Motor Vehicle Headlamps |
| 49 CFR 571.403 | SAE J578: Color Specifications for Electric Signal Lighting Devices |

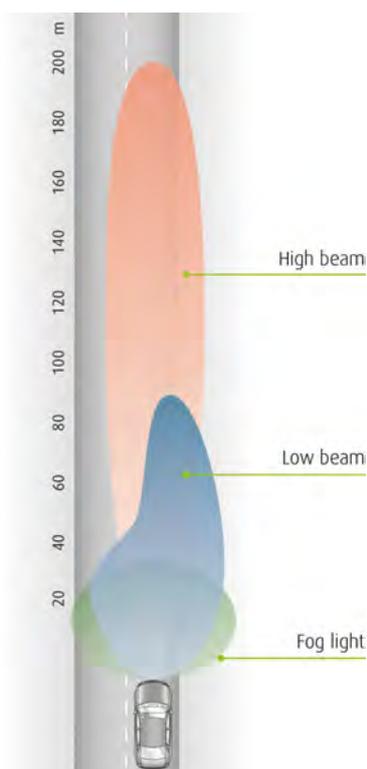


Figura 4.1: Patrones de iluminación, presentes en los faros de automóvil, imagen obtenida de [77].

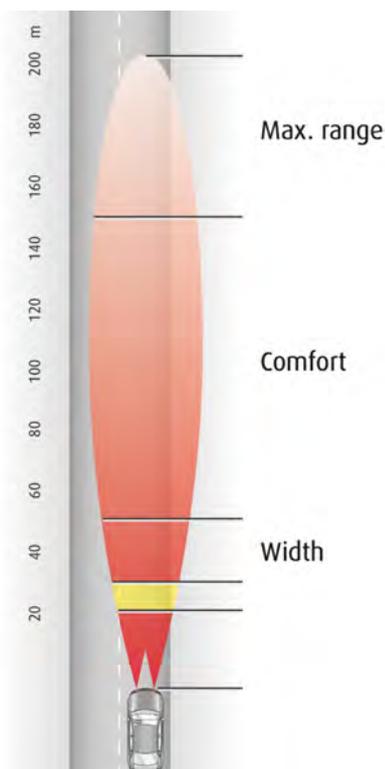


Figura 4.2: Patrón de iluminación, para la luz alta y la representación de los niveles de alcance, imagen obtenida de [77].

Las modalidades de iluminación requeridas en un automóvil son: luz de paso o baja, luz alta y luz de niebla. Las luces de paso y las altas suelen estar integradas en

un solo módulo y las luces de niebla en módulos separados; debido a que se colocan lo más cerca al piso posible para evitar deslumbramiento. Sin embargo, el módulo de luces bajas y altas, se colocan a una distancia medida desde el piso que va de entre 22 *in* hasta máximo 54 *in* [79]. Una representación de los patrones de iluminación de las tres modalidades, se observa en la Figura 4.1.

Las luces de paso o bajas, son el elemento que tiene una regulación con puntos asimétricos a cumplir en lo que al patrón de iluminación se refiere, como lo podemos comprobar en la Figura 4.3 y 4.4(a). Esto se debe a que, es la iluminación que siempre esta presente exista o no tráfico en contra y debe garantizar que el patrón de iluminación no provoque deslumbramientos en otros vehículos y en los peatones; pero al mismo tiempo debe proporcionar la mayor visibilidad y comodidad al usuario. Los elementos anteriormente mencionados, se deben optimizar; dando como resultado una distribución de luz asimétrica; es por esto que, los reflectores bajos suelen ser más complejos, utilizando superficies reflectoras multisección o sistemas de proyección.

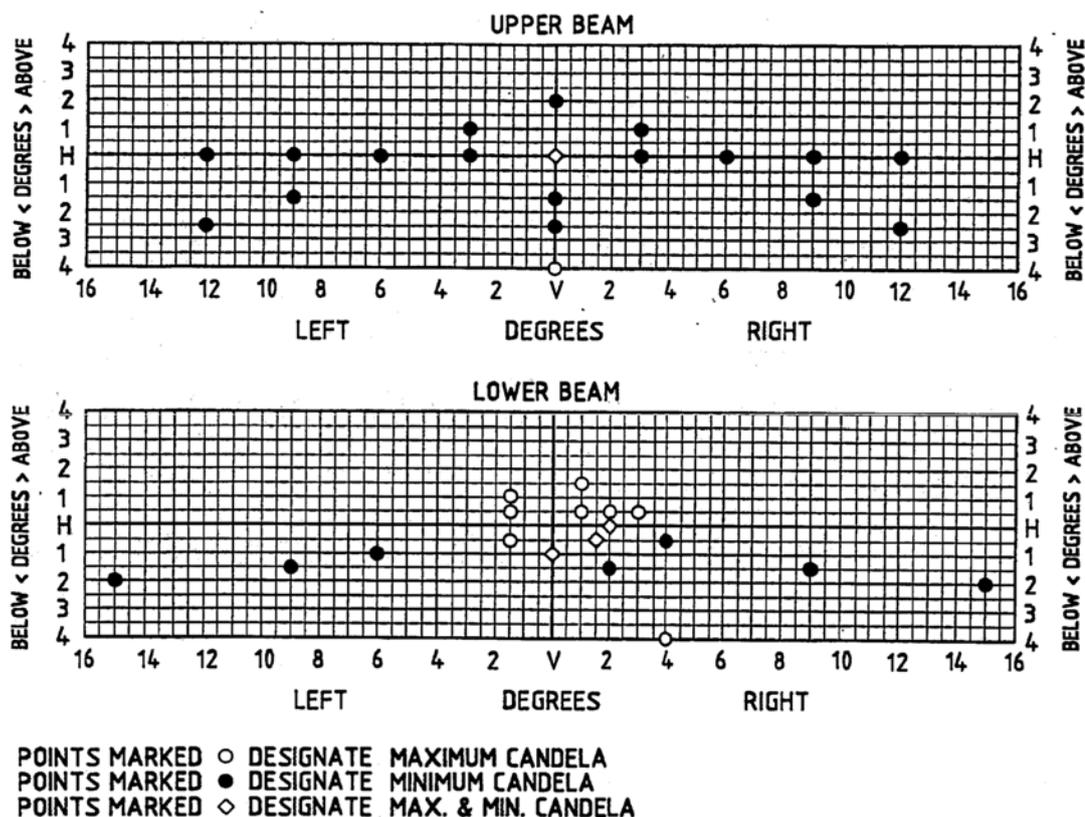


Figura 4.3: Distribución puntual de candelas, representada en una pantalla perpendicular al suelo a una distancia mínima de 18.3 *m* del faro de luz baja y alta; se hace notar que para la luz baja, la distribución de candelas es irregular y además contiene un mayor numero de puntos con candelas máximas, lo cual no sucede en las luces altas. Imágen obtenida de [80].

Las luces altas por otro lado, no son gobernadas por una regulación que exija características muy puntuales en su patrón de iluminación, como podemos comprobar en las Figuras 4.3 y 4.4(b). Ya que, su utilización queda únicamente reservada en caminos fuera del área urbana y en momentos donde no existe tráfico. El objetivo de las luces altas es proporcionar la máxima visibilidad a lo ancho y largo del camino, por lo que su distribución de luz es centrada y simétrica.

| LOWER BEAM | | | UPPER BEAM | | |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
| Test Points (degrees) | Candela maximum | Candela minimum | Test Points (degrees) | Candela maximum | Candela minimum |
| 10U-90U | 125 | -- | 2U-V | -- | 1,500 |
| 4U-8L and 8R | -- | 64 | 1U-3L and 3R | -- | 5,000 |
| 2U-4L | -- | 135 | H-V | 75,000 | 40,000 |
| 1.5U-1R to 3R | -- | 200 | H-3L and 3R | -- | 15,000 |
| 1.5U-1R to R | 1,400 | -- | H-6L and 6R | -- | 5,000 |
| 1U-1.5L to L | 700 | -- | H-9L and 9R | -- | 3,000 |
| 0.5U-1.5L to L | 1,000 | -- | H-12L and 12R | -- | 1,500 |
| 0.5U-1R to 3R | 2,700 | 500 | 1.5D-V | -- | 5,000 |
| H-4L | -- | 135 | 1.5D-9L and 9R | -- | 2,000 |
| H-8L | -- | 64 | 2.5D-V | -- | 2,500 |
| 0.5D-10.5L to L | 3,000 | -- | 2.5D-12L and 12R | -- | 1,000 |
| 0.5D-1.5R | 20,000 | 10,000 | 4D-V | 12,000 | -- |
| 1D-6L | -- | 1,000 | | | |
| 1.5D-2R | -- | 15,000 | | | |
| 1.5D-9L and 9R | -- | 1,000 | | | |
| 2D-15L and 15R | -- | 850 | | | |
| 4D-4R | 12,500 | -- | | | |

Figura 4.4: Tabla de los valores puntuales de candelas del estándar SAE J1383 para: a) Luz baja, b) Luz alta. Tablas extraídas de [80].

Finalmente, un punto que también se debe considerar son las coordenadas de color donde el SAE J578 indica que las luces de paso y altas deben estar dentro del área en el mapa de color considerada como luz blanca, dicha área queda representada en la Figura 4.5.

4.2. Consideraciones y limitaciones para el prototipo

Como ya se mencionó en la sección 2.2.3, una de las mejores formas para utilizar pastillas de fósforo conversor con LDs, es utilizando la estrategia de reflexión. En dicha técnica, el láser es incidido en la pastilla de fósforo a cierto ángulo ($0 < \theta < 90$), reflejando parte del haz del láser que a su vez se mezcla con la luz amarilla emitida por el fósforo. Gracias a esta configuración, se tienen la menor cantidad de perdidas, por lo tanto, el diseño del prototipo está basado en tal estrategia.

Debido a limitaciones de tiempo y de que este trabajo es iniciador en el desarrollo de este tipo de dispositivos en el laboratorio de NAFOMA, únicamente se propone el diseño de un prototipo de luz alta, el cual consta de la fuente de luz y el reflector. Esto debido a que, una luz de paso o baja necesita cumplir una serie de características

según el SAE J1383, que conlleva a un diseño complejo de reflector.

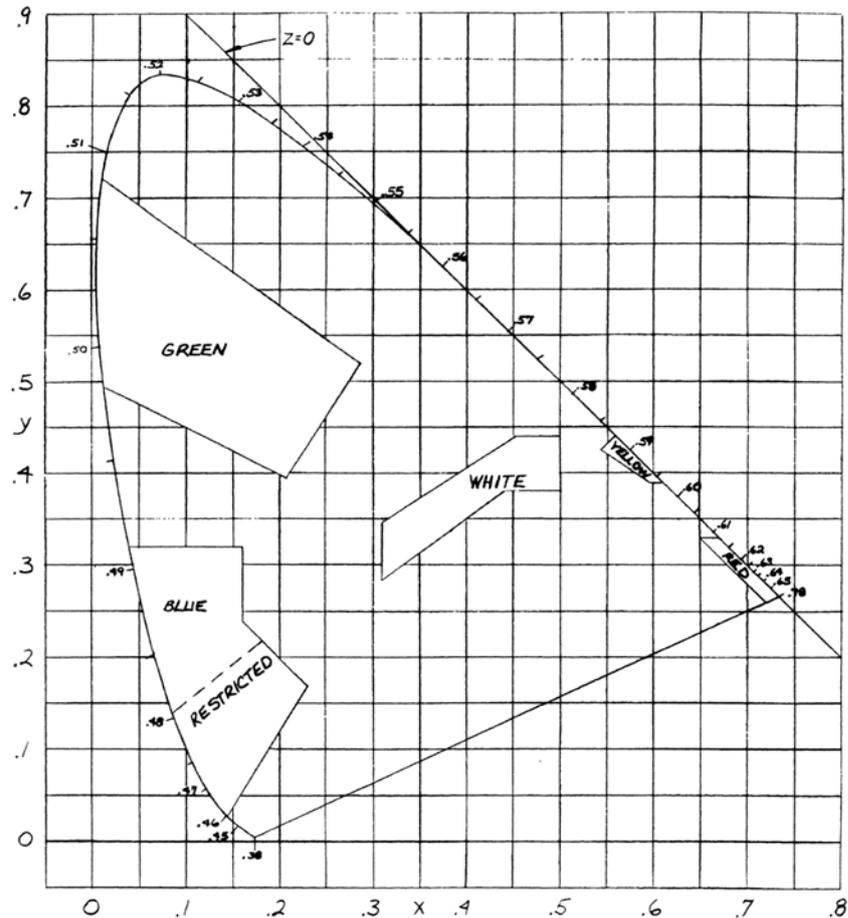


Figura 4.5: Mapa de color considerado en el estándar SAE J578, imagen obtenida de [81].

Por otro lado, un reflector de luz alta solo debe proporcionar una distribución de luz centrada, con un mínimo de alcance de 150 m, sin ser necesario un control de deslumbramiento [77]. El patrón de un reflector de luz alta, lo podemos observar con más detalle en la Figura 4.2.

Existe una gran variedad de morfologías y técnicas para el diseño de los reflectores, yendo desde la utilización de superficies parabólicas o elípticas, hasta el uso de técnicas como superficie libre o por superficies segmentadas [82]. Inclusive, ya son ampliamente utilizados los arreglos de lentes para crear proyectores que generen el patrón de iluminación deseado.

Como ya se mencionó, el prototipo únicamente constará del tipo de luz alta, por lo que lo más conveniente es que el diseño del reflector se basa únicamente en una superficie parabólica. Igualmente, con esto se busca simplificar la fabricación del reflector, pensando en su manufactura futura dentro del CIO.

Algunas de las condiciones principales, que deben soportar este tipo de dispositivos son: temperatura, humedad y vibraciones. Sin embargo, al ser éste un primer prototipo, y de igual manera por falta de tiempo y equipo para las pruebas especializadas que se requerirían, únicamente se toma en consideración el rango de temperaturas de trabajo. Si bien, los faros de un vehículo están pensados para funcionar por la noche, donde las temperaturas son relativamente más bajas que en el día. Se tiene que considerar que los faros no lleguen a fallar aunque sean utilizados en el día, como en una situación de túnel subterráneo o descuido del usuario.

La “World Meteorological Organization”, tiene registrado un récord mundial de temperatura máxima de $56.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ para Furnace Creek Ranch, USA. Al ser esta temperatura un caso extremo, se propone que el sistema sea capaz de funcionar hasta los $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero no al 100 % de la eficiencia. Para el caso del funcionamiento a máxima eficiencia, se considerará una temperatura límite de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$; ya que, según los datos de la CONAGUA [83], se han llegado a registrar en algunos estados de México temperaturas de hasta $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura mínima quedará limitada a las características ofrecidas por los modelos disponibles de diodos láser.

El LD a utilizar es uno de los más potentes y económicos, que tienen un rango considerable de temperatura de trabajo; además de estar en venta para público en general. El modelo NUBM08 de NICHIA Corporation, puede alcanzar una potencia óptica de hasta 4.35 W en 455 nm , con divergencia paralela y perpendicular de $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente; el cual necesita una alimentación de 4.5 V a 3.5 A y un rango de temperaturas de funcionamiento de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las características de este LD lo hacen un buen candidato para aplicaciones de SSL.

Es bien sabido que, los LDs suelen estar diseñados para tener su mejor desempeño al trabajar a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; para lograr esta condición, se debe de tener una suficiente disipación de calor. Debido a las “altas potencias” manejadas en este tipo de aplicaciones, una disipación de calor por medio de elementos pasivos e inducción natural no es suficiente; por lo que es necesario utilizar elementos activos como lo son los abanicos para aplicar la inducción forzada o utilizar celdas termoeléctricas (Peltier), para así poder extraer todo el calor residual. Además, los LDs son sensibles a los cambios de corriente en su alimentación; por lo que, una fuente de poder de mala calidad puede llegar a comprometer severamente la vida útil del dispositivo, por lo tanto, es necesario un regulador de corriente que proteja al LD de posibles cambios en el voltaje de la fuente.

Es de conocimiento general que, los automóviles usan de manera estandarizada una batería de 12 V de ácido plomo. Dicha batería tiene el propósito de auxiliar en el arranque del motor y proporcionar la energía a todos los instrumentos electrónicos montados en el vehículo. Por lo tanto, el prototipo debe de apegarse a la alimentación de 12 V proporcionada por dicha batería.

Gracias a las consideraciones discutidas en esta sección, se concluye que los componentes necesarios para el prototipo de iluminación son los siguientes:

- **Configuración para la generación de luz blanca:** será un fósforo remoto montado en un disipador; el cual, será incidido por el láser produciendo como resultado luz amarilla. La luz blanca se obtendrá de la azul no absorbida y reflejada, que a su vez se mezclará con la luz amarilla producida por el fósforo, la mezcla de las dos emisiones se concentrará con un único reflector de superficie, justo como se ejemplifica en la Figura 4.6.
- **Módulo del LD:** estará compuesto del montaje del LD, su óptica de enfoque y su sistema de refrigeración, que constará de una celda peltier, un disipador de aluminio y un abanico.
- **Sistema electrónico de alimentación y control:** será el grupo de circuitos encargados de regular las variables de alimentación para todos los componentes del dispositivo. Y a su vez, por medio del censado de temperatura, controlará el LD y el sistema de refrigeración.

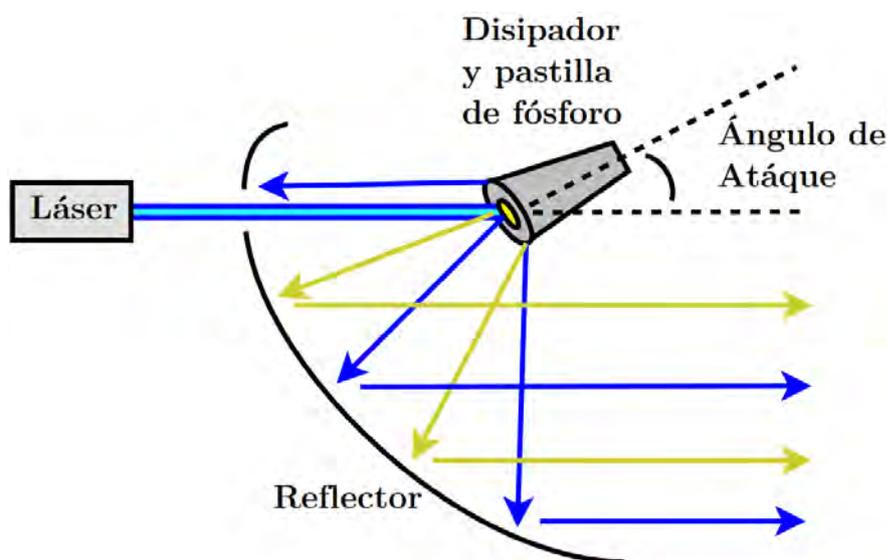


Figura 4.6: Diagrama simplificado para el arreglo de producción de la luz blanca en el prototipo.

4.3. Metodología para el diseño del prototipo

Para obtener los puntos descritos en la sección 4.2, se propuso el diagrama de flujo de la Figura 4.7, el cual hace énfasis en los 3 puntos mencionados, cómo es que se llevó acabo su diseño y prueba simulada. Cabe mencionar que, el encapsulado no sigue ninguna pauta o regla de diseño, ya que lo único que se busca es que, pueda contener el arreglo del reflector y sus componentes electrónicos para hacerlo portable.

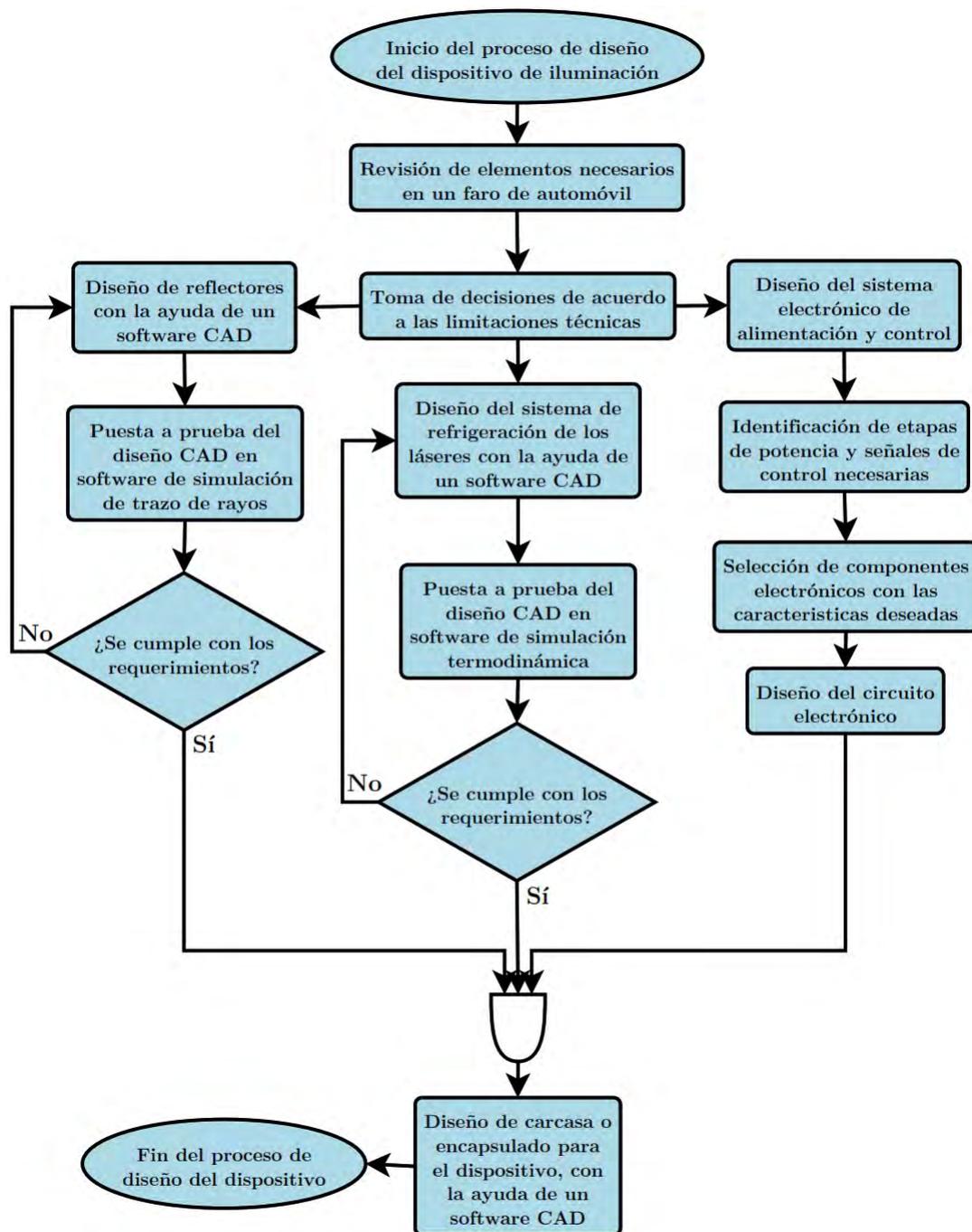


Figura 4.7: Diagrama de flujo, de la metodología seguida para el diseño del prototipo.

4.3.1. Diseño de los reflectores

En la sección 4.2 se hace mención de que se utilizará únicamente superficies parabólicas para lograr colimar en cierto grado y dirigir la luz para aumentar su alcance. Gracias a que la fuente de luz se puede considerar como puntual; debido a que, el láser

esta enfocado en un pequeño “spot” (0.5 a 2 mm) dentro de la pastilla de fósforo; se hace viable la utilización de configuraciones para espejos parabólicos. Para el caso de este trabajo la configuración llamada “offset feed” es muy conveniente; debido a que, tiene mínima o nula obstrucción de rayos a diferencia de la configuración “front feed”. En la Figura 4.8, podemos identificar las dos configuraciones para antenas antes mencionadas y cómo es que se realiza el trazo de rayos.

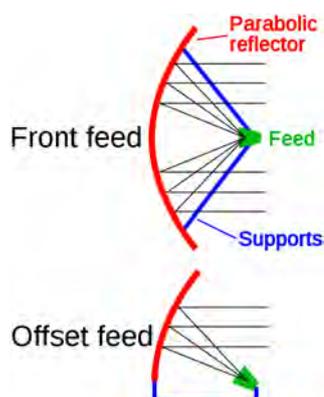


Figura 4.8: Algunas de las configuraciones para espejos parabólicos y el trazo de rayos (en negro), imagen recuperada de [84].

Para llevar a cabo el diseño del reflector se utilizó la plataforma CAD SolidWorks, utilizando una función específica del software para generar sólidos por medio de un perfil y una trayectoria de barrido, Figura 4.9(a). Para generar el perfil parabólico se utilizó la herramienta de trazo de línea por ecuación. La ecuación utilizada se basó en la forma general de una parábola para un sistema de referencia rectangular:

$$(x - h)^2 = 4 * p(y - k) \quad (4.1)$$

Donde:

$(h, k + p)$ son las coordenadas del punto focal de la parábola.

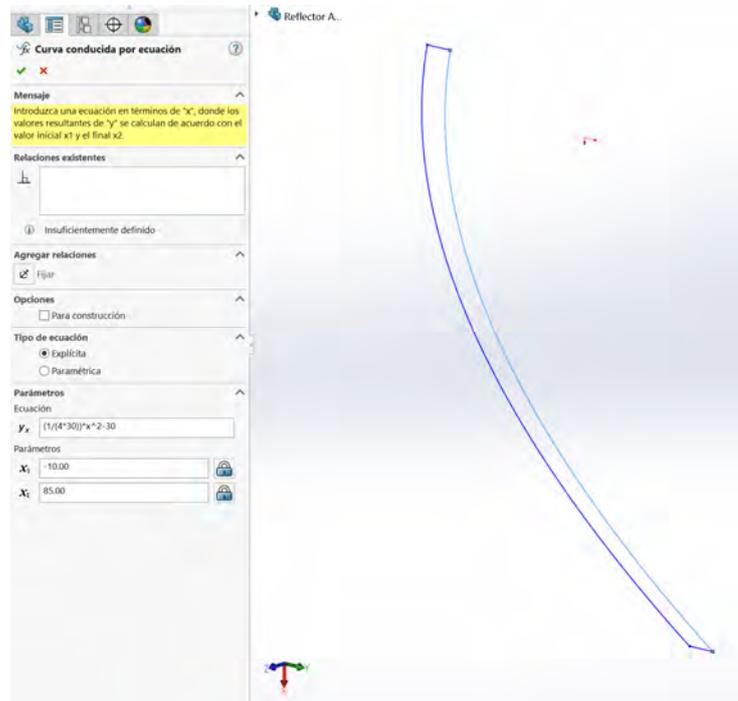
(h, k) son las coordenadas del vértice de la parábola.

Para simplificar la creación del perfil, se decidió que el foco se posicionó en la coordenada $(0,0)$. Lo que se traduce en, $h = 0$. Despejando se obtiene que $p = -k$ para una parábola con el foco en el origen coordenado; como p representa la distancia focal, desde ahora se denominará como f y k es la distancia del vértice de la parábola al origen. Finalmente, la ecuación que se utilizó como entrada en la herramienta de creación de SolidWorks fue:

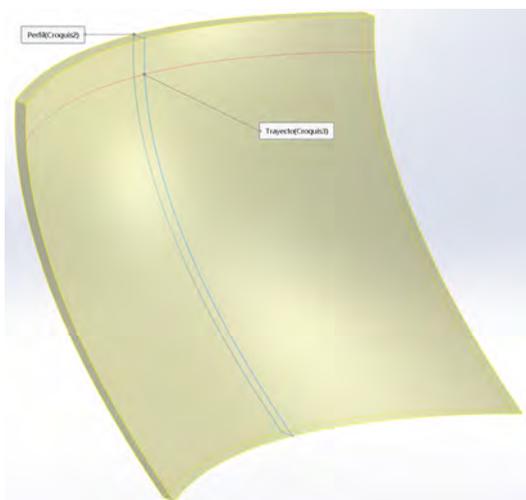
$$y = \frac{x^2}{4 * f} - k \quad (4.2)$$

Para la selección de f , se comenzó con un valor arbitrario, procurando una distancia focal realista dentro de un faro de automóvil, de la misma manera se hizo para k ; por ejemplo, no más de 50 mm. La afinación del valor del foco, será por medio de la

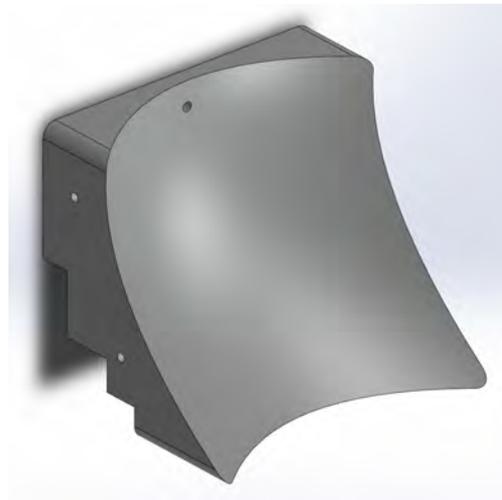
retroalimentación de los resultados obtenidos por medio de las simulaciones de trazo de rayos descritas más adelante.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9: Herramientas utilizadas de SolidWorks, para el diseño del reflector. a) Herramienta de trazo de líneas por ecuación. b) Herramienta de generación de sólido por barrido. c) Sólido resultante por el barrido del perfil parabólico.

De la misma manera, se generó una trayectoria de barrido, utilizando la misma herramienta de trazo de línea por ecuación. Una vez definido el perfil y la trayectoria de barrido, se utilizó la herramienta para la creación de sólido por barrido, Figura 4.9(b).

Con el objetivo de obtener el comportamiento del reflector, se optó por utilizar el entorno de simulación de APEX; el cual, es un programa de expansión para SolidWorks, capaz de realizar el trazo de rayos. Para ello, es necesario construir un escenario virtual que constará de un sólido que represente una pantalla, para así obtener la distribución de la luz a diferentes distancias, Figuras 4.10(a).

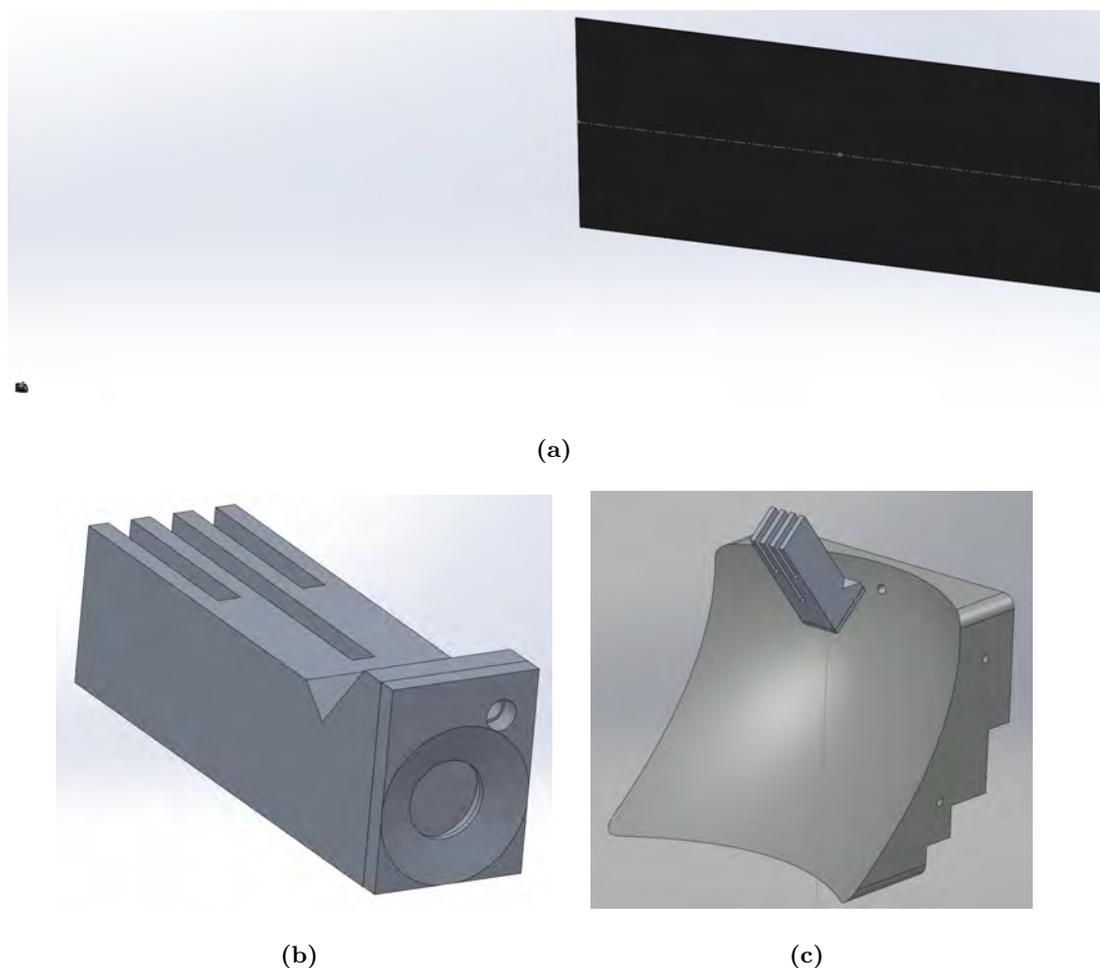
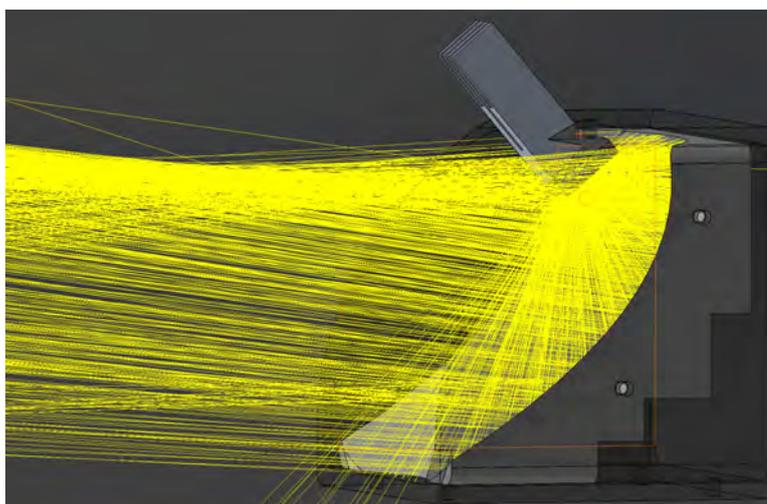


Figura 4.10: Sólidos y configuración del escenario para la simulación de trazo de rayos.

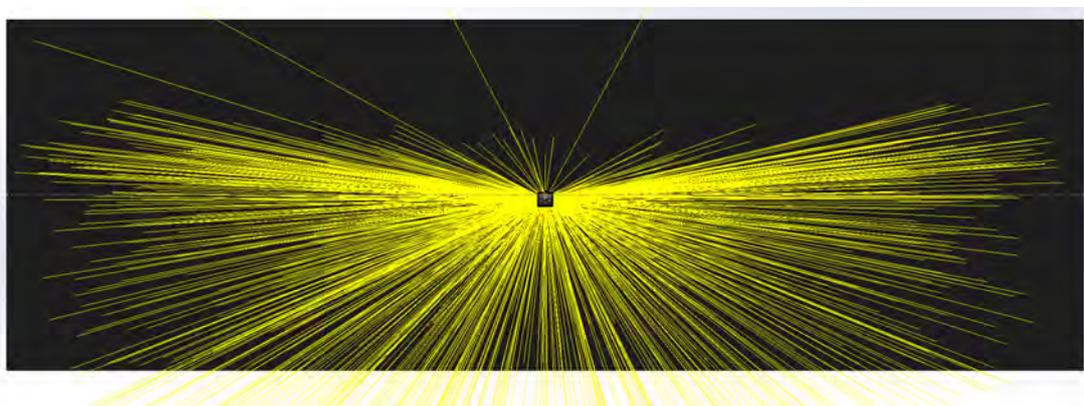
a) Representación del reflector y la pantalla para la simulación. b) Base disipadora del fósforo. c) Posicionamiento del reflector y la base de la pastilla de fósforo.

La base del fósforo, considera una dimensión de pastilla de 8.1 mm de diámetro y 1 mm de espesor (dichas dimensiones fueron obtenidas de las pastillas con mejores

resultados). La base de la pastilla fungirá igualmente como disipador de la misma, Figura 4.10(b). El centro de la pastilla está alineado con el foco de la superficie parabólica, igualmente se debe dar un ángulo de ataque contra de la incidencia del láser, Figura 4.10(c). Igual que con el foco, el ángulo de ataque será afinado por medio de la retroalimentación que brinden los resultados de las simulaciones.



(a)



(b)

Figura 4.11: Simulación del trazo de rayos, por medio de la expansión APEX para Solid-Works. a) Trazo de rayos en la zona del reflector. b) Trazo de rayos del reflector hacia la pantalla.

Una vez creado el escenario de simulación del reflector, se deben de configurar las propiedades de superficie correspondientes. A la superficie principal del reflector, se configuró un recubrimiento de metalizado de aluminio al vacío, que corresponde a una reflectancia de 88 %. Todas las demás superficies se configuran como perfectos

absorbentes. La fuente de luz se simuló como una fuente semi puntual; utilizando una superficie emisora de una media esfera de 3 mm de diámetro, donde los rayos salen con una distribución lambertiana; se realizó de esta manera ya que la mayor fuente de luz proviene de la incidencia del “spot” del láser en la pastilla, el cual era de 3 mm y se consideró una superficie esférica por que el software de simulación no adaptaba bien la emisión lambertiana a superficies planas.

Luego de configurar todas las superficies del escenario, se corren las simulaciones del trazo de rayos, podemos ver un ejemplo en la Figura 4.11. Las simulaciones se llevaron a cabo para obtener los mapas de distribución de la intensidad de flujo de luz que llega a la superficie de la pantalla.

Una vez que se realizó la primera simulación con el APEX, se pudo identificar el comportamiento de la primera iteración del reflector, lo que permitió reajustar sucesivamente la superficie y el ángulo de ataque de la pastilla (iniciando en 1 °C); siempre teniendo en cuenta cumplir con lo descrito en los estándares de la SAE.

4.3.2. Diseño del sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración debe de ser capaz de, extraer el calor residual generado tanto en el láser y en la pastilla de fósforo; asegurando que las temperaturas no superen los límites de funcionamiento bajo las circunstancias más adversas. Por lo tanto, se considera la temperatura ambiente mencionada en la sección 4.2 de 60 °C, considerandose el límite de funcionamiento del dispositivo. Por otro lado, la temperatura considerada como funcionamiento regular es de 38 °C. Estos dos parámetros son importantes, ya que definen la tasa de transferencia de calor que se puede llegar a alcanzar por convección ya sea natural o forzada.

- **Disipador de láser:** según la hoja de datos del LD NUBM08 de NICHIA, se necesita extraer en el peor de los casos, un total de 12.45 W de calor. Al ser una potencia considerable, se debe de optar por un sistema de refrigeración con elementos activos (celda Peltier y un abanico) y pasivos (disipador de aluminio con aletas). Si bien la hoja de datos nos indica que el LD puede soportar temperaturas de hasta 70 °C, no es deseable tener el LD trabajando muy alejado de la temperatura de diseño que es 25 °C, ya que el tiempo de vida del LD se ve comprometido; por lo tanto, se definió una temperatura segura máxima de trabajo de 35 °C. Un sistema combinado de refrigeración nos da una mejor posibilidad de no sobrepasar dicha temperatura.
- **Disipador para pastilla:** según las pruebas de temperatura tomadas a las pastillas fabricadas, además del valor del calor específico del YAG:Ce³⁺ obtenido de [85], se obtuvo que, el calor que se debe extraer de la pastilla es de 1.2 W. Para tal trabajo, se consideró un disipador pasivo de aluminio, que también fungirá como base para sostener la pastilla frente al reflector. Dicho disipador,

debe ser capaz de mantener a la pastilla de fósforo en una temperatura menor a $130\text{ }^{\circ}\text{C}$; ya que, después de esta temperatura las pastillas de fósforo comienzan a perder eficiencia de manera considerable.

El modelo de celda peltier seleccionada para la aplicación fue el TEC1-07103T125, el cual, necesita una alimentación de 8.5 V y 3 A . Este peltier es uno de los modelos disponibles en el inventario del laboratorio de NAFOMA. Con la ventaja de que, este modelo de peltier dispone de una perforación central que facilita su implementación en aplicaciones con LDs.

El diseño de los dos disipadores pasivos, se basó en bloques rectangulares de aluminio y se buscó el acomodo de el mayor número de placas paralelas. El diseño se realizó con ayuda del software CAD SolidWorks. Haciendo uso de la herramienta “Solidworks Simulation”, se corrieron simulaciones para verificar que los disipadores fueran capaces de mantener las temperaturas deseadas. Para ello, fue necesario definir los siguientes parámetros:

- **Materiales:** para los disipadores se seleccionó la aleación de aluminio 1100 H-16; el cual, es una de las aleaciones más comunes con una dureza intermedia, las características del material son las predefinidas en el programa de simulación de SolidWorks para este tipo de material.
- **Superficies expuestas a convección:** son las partes de la geometría del diseño que están expuestas a un coeficiente de convección, ya sea para el caso de convección natural o forzada respectivamente.
- **Potencia a disipar:** es la cantidad de potencia en calor, que esta presente alguna de las superficies de la geometría y que representa el calor que se debe disipar.
- **Coefficientes de convección:** es un parámetro basado en la ley de enfriamiento de Newton, indica la tasa de transferencia de calor de una superficie sólida hacia un medio fluido que esté en contacto.

El cálculo exacto del coeficiente de convección natural y forzada implica un nivel de complejidad elevado. En el alcance de este trabajo no se consideró un análisis extensivo y preciso de este apartado. Por lo que, los valores utilizados para el caso de convección natural se calculan con el modelo simple de una placa vertical, el cual funciona para la mayoría de los casos, Apéndice D. En cuanto a la obtención del valor de la convección forzada, se utilizaron los datos experimentales obtenidos en el trabajo de Andrea Diani et. al. [86], específicamente en su Figura 7; donde, se obtuvieron los coeficientes de convección forzada para configuraciones de disipadores de aluminio de placas paralelas, semejantes al utilizado en este trabajo, a diferentes velocidades de aire. La velocidad de aire considerada en nuestra aplicación es de 3.7 m/s ; la cual, es la velocidad que proporcionan los abanicos con diámetro de 90 mm y 1800 rpm , que son los que serán utilizados en el dispositivo. Las convecciones resultantes para ambos casos se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Coeficientes de convección utilizados en la herramienta “Solidworks Simulation” para la simulación de los disipadores del dispositivo.

| Coeficiente de Convección | W/m^2K |
|---------------------------|----------|
| Natural | 10.938 |
| Forzada | 53.026 |

4.3.3. Diseño del sistema electrónico de alimentación y control

Los componentes ya definidos son LD NUBM08 y la celda peltier “TEC1-07103T125”; por lo tanto el circuito de potencia y de control deberá cumplir las necesidades de funcionamiento de estos dos dispositivos. Como los dos elementos demandan una potencia relativamente elevada, deben de alimentarse por medio de fuentes diferentes, especialmente para evitar que el LD no sufra cambios repentinos de corriente.

Para la distribución de potencia, se optó por la utilización de reguladores de voltaje conmutados “Step Down”; ya que, son los reguladores más eficientes gracias a su principio de funcionamiento no lineal. Dichos reguladores pueden alcanzar eficiencias superiores al 90 %. Debido a la cantidad de corriente que demanda el LD y la celda peltier, un regulador lineal disiparía demasiado calor, desperdiciando mucha energía; esto no es viable en una aplicación en donde la energía de la que se dispone es limitada.

Para la protección a cambios de corriente en el LD, se suele utilizar el control de corriente por voltaje, basado en un MOSFET de potencia y un amplificador operacional Figura 4.12; en donde, el amplificador controla el GATE del MOSFET por medio de la retroalimentación del voltaje que aparece en la denominada resistencia “shunt”. Gracias a esto, si existe algún cambio de voltaje en la fuente, o algún cambio en el funcionamiento del LD debido a la temperatura, este circuito se autorregula y garantiza la corriente que se configure por medio del voltaje en el comparador.

El dispositivo debe ser capaz de controlar el LD dependiendo de su la temperatura, por consiguiente será necesario el utilizar sensores de temperatura y algún sistema de control que sea capaz de encender y apagar el LD, así como las celdas peltier. Es importante visualizar que, en un futuro es posible la necesidad de expansiones al sistema de control, como lo es el caso de los AFS, donde generalmente se utiliza visión por computadora para identificar las características del camino. Debido a dichas proyecciones, lo mas razonable es basar el sistema de control en un microcontrolador, donde el código sea fácilmente exportable y que disponga de protocolos de comunicación para la conexión de periféricos futuros.

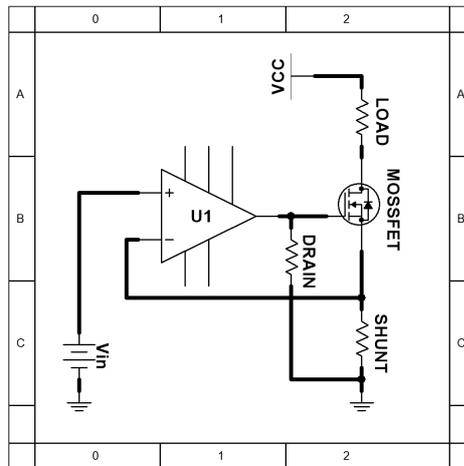


Figura 4.12: Diagrama de los componentes básicos de una fuente de corriente controlada por voltaje.

4.4. Conclusión del capítulo

En este capítulo, se revisan las necesidades y requerimientos fotométricos, impuestos por las normas aplicables en nuestro país, que deben cumplir un diseño de faro de automóvil para una luz alta. Igualmente, se mencionan las limitaciones de equipamiento y tiempo presentes en el desarrollo de este trabajo; las cuáles, fueron parte fundamental de la toma de decisiones modificando el dispositivo final. Se describieron todos los procesos llevados a cabo para la construcción del prototipo de SSLL, explicando el porqué de sus elementos. Finalmente, se describe el desarrollo del diseño de cada una de las partes y el tipo de circuitos electrónicos a utilizar.

Resultados y análisis

Es necesario mencionar que debido a la contingencia sanitaria del presente año 2020, no se pudieron completar todas las iteraciones de fabricación, así como las pruebas que se tenían pensadas para la caracterización completa de las pastillas. Por lo que los resultados presentan un panorama general pero no completo de las características de las pastillas de fósforo.

5.1. Metodo de fabricación de las pastillas de fósforo

A través de las iteraciones de fabricación realizadas utilizando la fórmula 3.2, se llegó a la conclusión de que el adicionar cerio a la fórmula no hacia ninguna diferencia en la emisión de las pastillas, inclusive llegaba a afectar el desempeño. Igualmente, se concluyo fijar la cantidad de boro en 0.6 mol ; ya que, si bien el boro ayuda a disminuir el punto de fusión del material, una cantidad muy elevada de un formador de red puede llegar a afectar la estructura posiblemente cristalina del granate. Por consiguiente, la fórmula química 5.1 representa el modelo base utilizado para el material soporte.



Los resultados se concentraron en dos grupos de muestras para el material soporte, un grupo donde $\text{M} = \text{Sr}$ de la fórmula 5.1 quedando de la fórmula 5.2 y otro grupo donde $\text{M} = \text{Ba}$ quedando de la fórmula 5.3.



A lo largo de las iteraciones de fabricación, se definieron las variables del proceso para los grupos de muestras que presentaban mejores resultados; las pastillas con Sr Tabla 5.1 y las pastillas con Ba Tabla 5.2; si bien los procesos de fabricación son similares, difieren en la temperatura y tiempo de fabricación. Cabe mencionar que la recámara del horno donde se realiza el tratamiento térmico, se purgaba con

una mezcla de gases 95 % nitrógeno - 5 % hidrogeno, con el propósito de eliminar la mayor cantidad de oxígeno y evitar lo mayor posible la pérdida de la valencia 3+ del cerio en el fósforo comercial. También, el espesor de la pastilla elegido fue de 1 *mm*, debido a que, este espesor presentaba emisiones más intensas. En la Figura 5.1, podemos observar el proceso de fabricación de manera gráfica, junto con las variables de fabricación necesarias para el caso del grupo de pastillas de Ba.

Tabla 5.1: Parámetros del proceso de fabricación, que obtuvieron mejores resultados para las pastillas con Sr.

| Etapa de fabricación | Variables finales |
|------------------------|--|
| Molido de precursores | Tiempo: 5 <i>h</i> Tamaño de las esferas: 3 <i>mm</i> Cantidad de esferas: 74.86 <i>gr</i> Velocidad: 22 <i>rev/min</i> |
| Tratamiento térmico | Temperatura pico: 1400 °C Tiempo de temp. pico: 6 <i>h</i> Atmosfera: Vacío a -0.07 <i>MPa</i> |
| Espesor de la pastilla | 1 <i>mm</i> |

Tabla 5.2: Parámetros del proceso de fabricación, que obtuvieron mejores resultados para las pastillas con Ba.

| Etapa de fabricación | Variables finales |
|------------------------|--|
| Molido de precursores | Tiempo: 5 <i>h</i> Tamaño de las esferas: 3 <i>mm</i> Cantidad de esferas: 74.86 <i>gr</i> Velocidad: 22 <i>rev/min</i> |
| Tratamiento térmico | Temperatura pico: 1420 °C Tiempo de temp. pico: 3 <i>h</i> Atmosfera: Vacío a -0.07 <i>MPa</i> |
| Espesor de la pastilla | 1 <i>mm</i> |

La temperatura pico, se refiere a la temperatura máxima a la que llega el horno,

debido a que el horno tiene las siguientes rampas subida: $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (hasta $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (1200 a $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) y $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (1400 a $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$); las pastillas no solo pasan dentro del horno el tiempo de la temperatura pico, deben de pasar el tiempo necesario para alcanzar dicha temperatura de acuerdo a la rampa de calentamiento.

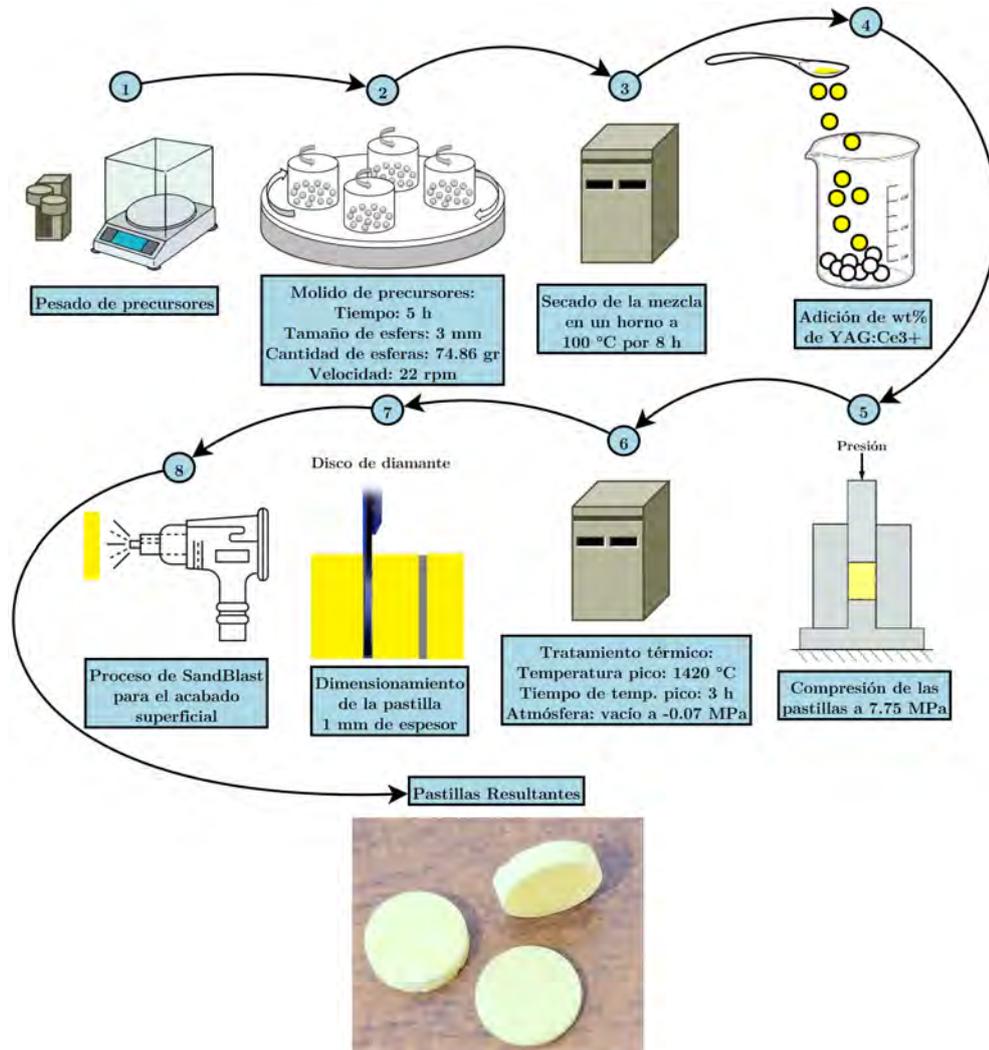


Figura 5.1: Diagrama del proceso de fabricación, con las variables finales para las pastillas de Ba.

5.2. Características fotoluminiscentes de las pastillas de fósforo

Como se mencionó en la sección 3.3, se realizaron los experimentos de las Figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 para la caracterización del dispositivo en cuestión de espectros de emi-

sión, quenching térmico, desempeño térmico y flujo luminoso respectivamente. Dichas pruebas se realizaron, según el diagrama de la Figura 3.5; por lo que, el condensado de resultados solo incluye aquellas pastillas que lograron pasar por todas las pruebas de caracterización. En el apéndice A, se incluyen todas las iteraciones realizadas para el desarrollo del material y hasta que parte de la caracterización llegaron.

Para poder realizar los experimentos se mandó fabricar una base que pudiera sostener las pastillas en las pruebas, Figura 5.2. En la Figura 5.4 se pueden observar algunas pastillas fabricadas.

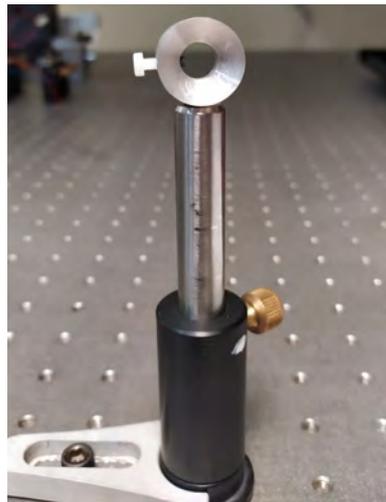
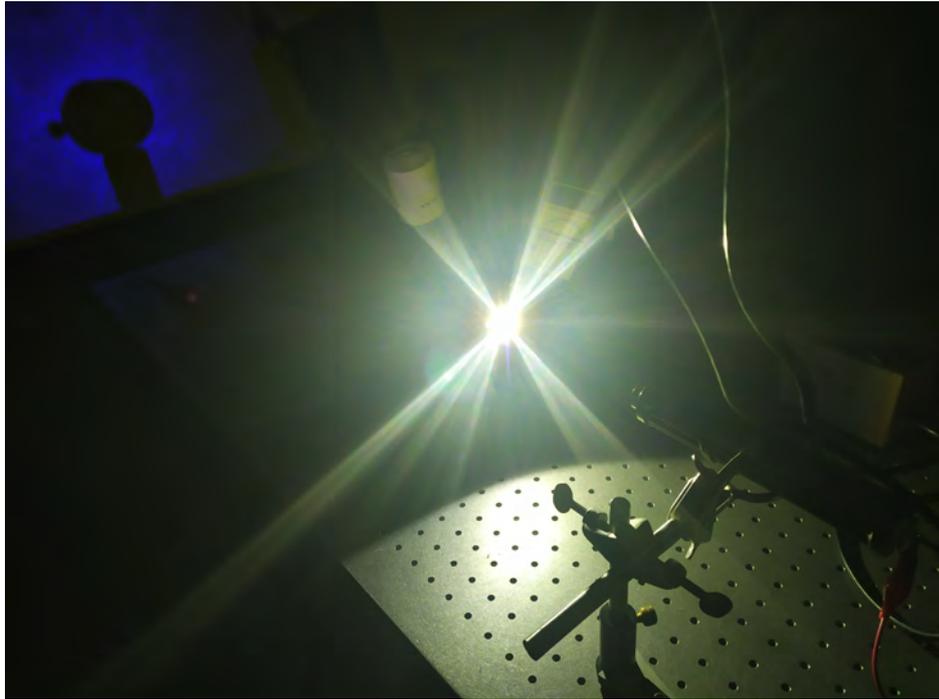


Figura 5.2: Base de aluminio, utilizada para sostener las muestras en los experimentos.

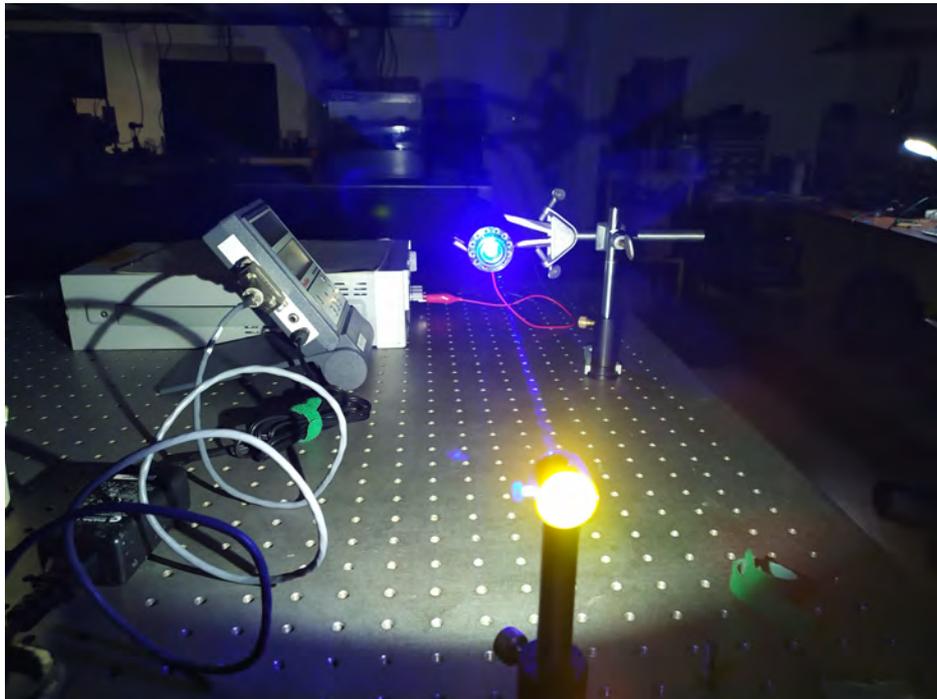
En la Figura ??, se puede notar que a simple vista no existe diferencia entre las pastillas de Sr y Ba, la única forma de saber la diferencia entre una y otra, es por medio de las mediciones realizadas a cada una de ellas, las cuales se muestran a continuación.

5.2.1. Espectros de emisión

Los espectros obtenidos en el fluorómetro, tanto para las pastillas más eficientes con Sr y Br son bastante similares Figura 5.5; es lo que se esperaba del fósforo comercial YAG:Ce³⁺ excitado por una longitud de onda de 448 nm. Sin embargo, el espectro de emisión de las pastillas de bario es ligeramente más intenso que el de las pastillas de estroncio. Esto es un indicio favorable para las pastillas que se fabrican con Ba, ya que nos indica una posible mayor intensidad de emisión para una misma potencia de láser. Además, se observan unas oscilaciones en ambos espectros de emisión; como láser era alimentado por una fuente de laboratorio no especializada en control de corriente, por lo que existía inestabilidad en la corriente que alimentaba al LD, esto causaba que el láser tuviera oscilaciones en su emisión y por lo tanto esto se veía reflejado en los espectros de emisión de las pastillas. En la Figura 5.3 podemos observar un pastilla del grupo Ba irradiada por el láser.



(a)



(b)

Figura 5.3: Ejemplo de una de las muestras de Ba exitada por el láser: a) vista frontal y b) vista posterior.

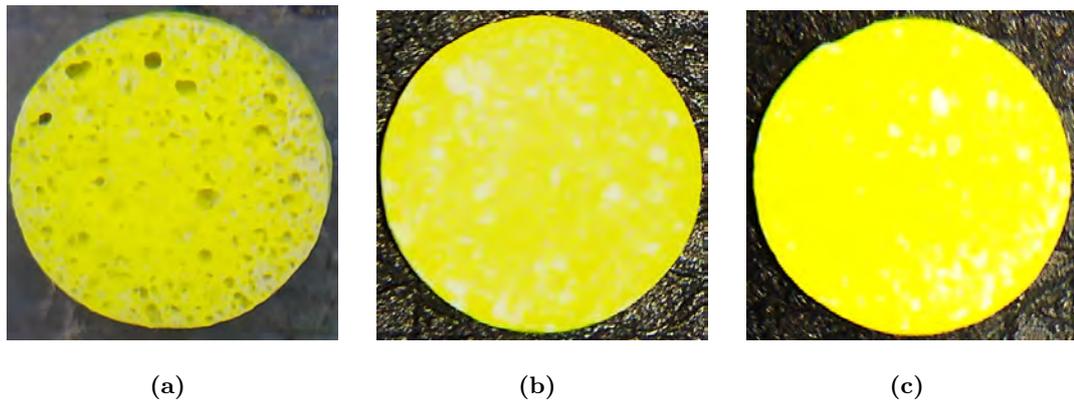


Figura 5.4: Ejemplos de las pastillas fabricadas, a) pastilla con Sr presentó burbujas, b) pastilla de Sr con 20 wt% YAG:Ce³⁺ y c) pastilla de Ba 15 con wt% YAG:Ce³⁺.

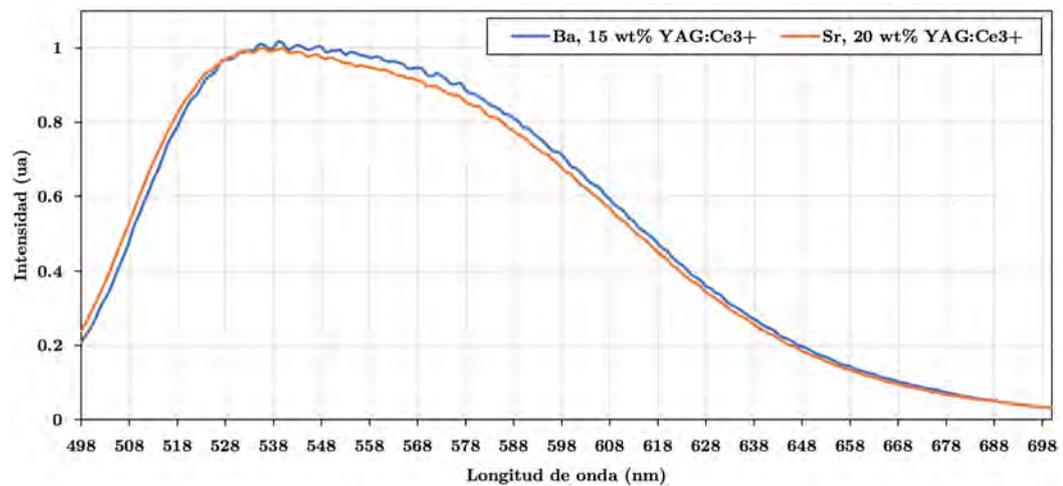


Figura 5.5: Espectros de emisión obtenidos de las pastillas más eficientes, Ba 15 wt% YAG:Ce³⁺ y Sr 20 wt% YAG:Ce³⁺.

5.2.2. Pruebas de temperatura

Se registró el comportamiento de la temperatura en las pastillas más eficientes, por medio del arreglo experimental del diagrama 3.8. En la Figura 5.6, se pueden observar algunas capturas del experimento. Estas pruebas se realizaron con el propósito de comprobar hasta qué temperatura soportaban las pastillas antes de degradarse permanentemente y la (DPO) que resistían. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.3.

Para el caso del “quenching” térmico, se utilizó el arreglo experimental 3.7. Se comenzó el experimento a 50 °C, y a continuación se fue incrementando la temperatura



(a)



(b)

Figura 5.6: Captura de la cámara térmica, experimento a una densidad de potencia de 1.5 W/mm^2 ; para a) una pastilla con Sr, y b) una pastilla con Ba.

del “hot plate”, el cual disponía de un indicador de temperatura el cual fue utilizado para el registro de la misma, con esto se obtuvo la caída de la emisión de las pastillas. Las pastillas eran irradiadas con el láser pero a una DPO muy baja, para evitar que se calentaran por este motivo. En la Figura 5.7 se muestran únicamente los resultados para las muestras más eficientes tanto con Sr y Ba.

Como pudimos observar en las gráficas de la Figura 5.7, las muestras de bario suelen tener más resistencia al “quenching” térmico, esto es muy probable que se deba a una mejor conductividad térmica por parte de las muestras de Bario. Igualmente esto puede explicar que las muestras con Ba puedan soportar mayores densidades de potencia.

Tabla 5.3: Promedio de las temperaturas a la que las pastillas presentaron degradación permanente en su superficie.

| Tipo de muestra | Max. Temp. (°C) | Dimensiones del “Spot” (mm) | PO (W) | DPO (W/mm ²) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|-----------|-----------------------------|
| Sr 20 wt% YAG:Ce ³⁺ | 125.7 | 2.5 ± 0.01 x 0.5 ± 0.01 | 1.63 | 1.3 |
| Ba 15 wt% YAG:Ce ³⁺ | 163.1 | 2.5 ± 0.01 x 0.5 ± 0.01 | 3.50 | 2.8 |

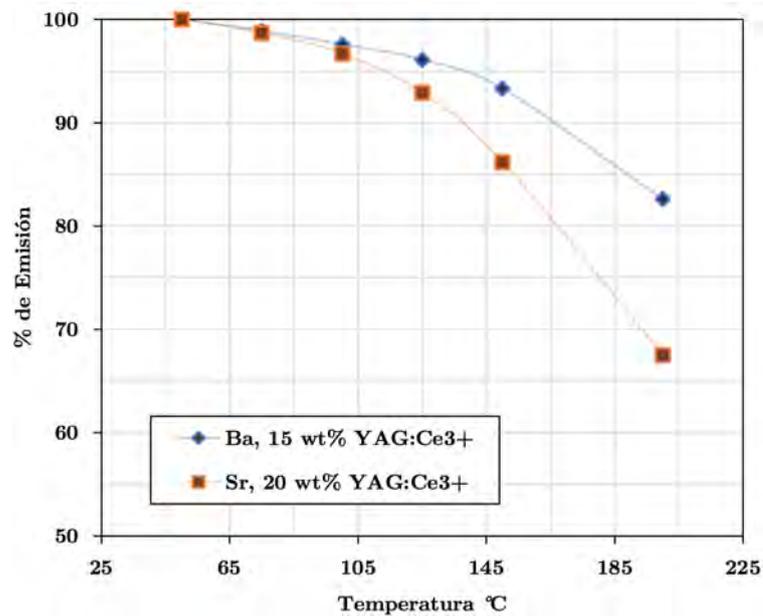


Figura 5.7: Gráficas del % de pérdida de emisión contra temperatura, de 50 °C a 200 °C para la superficie del “Hot plate”; utilizando las pastillas más eficientes.

5.2.3. Características fotométricas de las pastillas

Utilizando el arreglo experimental del diagrama 3.9, se obtuvieron las siguientes mediciones y características fotométricas de las pastillas:

- **Flujo luminoso (lm):** esta medición permite conocer la cantidad de potencia radiante perceptible por el ojo humano que es generada por la fuente; dicha medición es esencial para fuentes de iluminación, ya que siempre será de interés conocer que tanta luz útil se produce.
- **Eficacia luminosa eléctrica (ELE):** este valor se obtiene dividiendo el flujo luminoso entre la potencia eléctrica que consume el sistema; ya que la ELE nos permite saber a grandes rasgos la eficiencia del material en conjunto con su sis-

tema mínimo de excitación, es un parámetro utilizado para la comparación entre materiales fotoluminiscentes con un sistema mínimo con los mismos elementos.

- **Eficacia luminosa óptica (ELO):** este valor se obtiene dividiendo el flujo luminoso entre la potencia óptica que excita al sistema, dejando de lado la eficiencia del sistema mínimo; parecido a la ELE, la ELO también nos permite saber la eficiencia de nuestro material en este caso asilando las eficiencias de los demás componentes del sistema. Igualmente se utiliza para comparar materiales fotoluminiscentes.
- **Temperatura de color (CCT):** este valor da a conocer la temperatura de la luz blanca con respecto a la que tendría la emisión de un cuerpo negro, que produce el fósforo en conjunto con la fuente de excitación; aunque el valor del CCT no es crítico en un faro de automóvil, permite conocer si el blanco que se genera es cálido o frío, para así poder clasificarlo y compararlo con otras fuentes de luz blanca.
- **Índice de reproducción cromática (CRI):** esta medición permite conocer la calidad de reproducción del color que puede lograr la fuente de luz; igual que el CCT este valor no es crítico en un faro de automóvil, pero en el caso de este trabajo permite conocer si el YAG:Ce₃₊ comercial conserva sus capacidades originales después de someterlo a el proceso de sinterizado.
- **Coordenadas de color CIE_{xy} (C_x, C_y):** para poder identificar si la luz producida cumple con el estándar SAE J1383, es necesario obtener las coordenadas de color C_x y C_y, las cuales nos indican la ubicación de la luz que se produce dentro del mapa CIE.

Las mediciones se realizaron con pastillas de 1 mm de espesor, a una potencia eléctrica PE de 4.9 W, una potencia óptica (PO) de 1.44 W y una densidad de potencia óptica DPO de 1.2 W/mm². Hay que recordar que el pico de excitación es de 448 nm. En la Tabla 5.4, se muestran los datos obtenidos para los dos grupos de pastillas fabricadas, y en al Figura 5.8 se observa la tendencia del comportamiento de eficacia luminosa (EL) con respecto a la wt % de YAG:Ce³⁺ que contiene la pastilla.

Para el cálculo del tamaño del “spot” del láser se optó por realizar una medición directa con una pantalla opaca y Vernier. No se utilizó alguna mejor técnica debido a que la forma del “spot” era rectangular y no se acercaba a la forma de un haz Gaussiano; además el tamaño del mismo era lo suficientemente grande como para poder realizar la medición por medio de una regla milimétrica. Debido a las capacidades limitadas de la lente de enfoque y las tolerancias de la estructura del montaje del láser, el mínimo tamaño de “spot” variaba dependiendo de la distancia a la que era enfocado, por lo tanto se consideró la distancia de 0.6 ± 0.05 m que es la circunferencia de la esfera integradora utilizada y la cual fue medida con una cinta métrica. A dicha distancia se lograba formar un “spot” con dimensiones 2.74 ± 0.01 mm x 1.32 ± 0.01 mm que da como resultado un área de 3.62 ± 0.04 mm².

5.2 Características fotoluminiscentes de las pastillas de fósforo

Con los datos de la Tabla 5.4, se construyó la gráfica de la Figura 5.8, para poder observar la evolución de la ELO contra el $wt\%$ de $YAG:Ce^{3+}$.

Tabla 5.4: Características fotométricas obtenidas de la esfera integradora para los dos grupos de pastillas fabricadas. Con los siguientes parámetros fijos: $\lambda_{ex} = 448\text{ nm}$, $PE = 4.9\text{ W}$, $PO = 1.44\text{ W}$ y una $DPO = 1.2\text{ W/mm}^2$.

| YAG:Ce ³⁺ (wt %) | Flujo (lm) | ELE (lm/W) | ELO (lm/W) | CCT | CRI | C _x | C _y |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|------|-------|----------------|----------------|
| Muestras con estroncio Sr | | | | | | | |
| 10 | 183.92 | 37.23 | 127.72 | 6688 | 60.58 | 0.316 | 0.269 |
| 15 | 231.57 | 46.88 | 160.81 | 6306 | 60.54 | 0.325 | 0.338 |
| 20 | 244.23 | 49.44 | 169.60 | 5868 | 58.68 | 0.352 | 0.357 |
| 25 | 232.93 | 47.16 | 161.76 | 5663 | 59.02 | 0.345 | 0.340 |
| Muestras con bario Ba | | | | | | | |
| 15 | 254.23 | 51.47 | 176.55 | 4822 | 55.74 | 0.355 | 0.402 |
| 18 | 206.52 | 41.81 | 143.42 | 5499 | 57.49 | 0.332 | 0.349 |

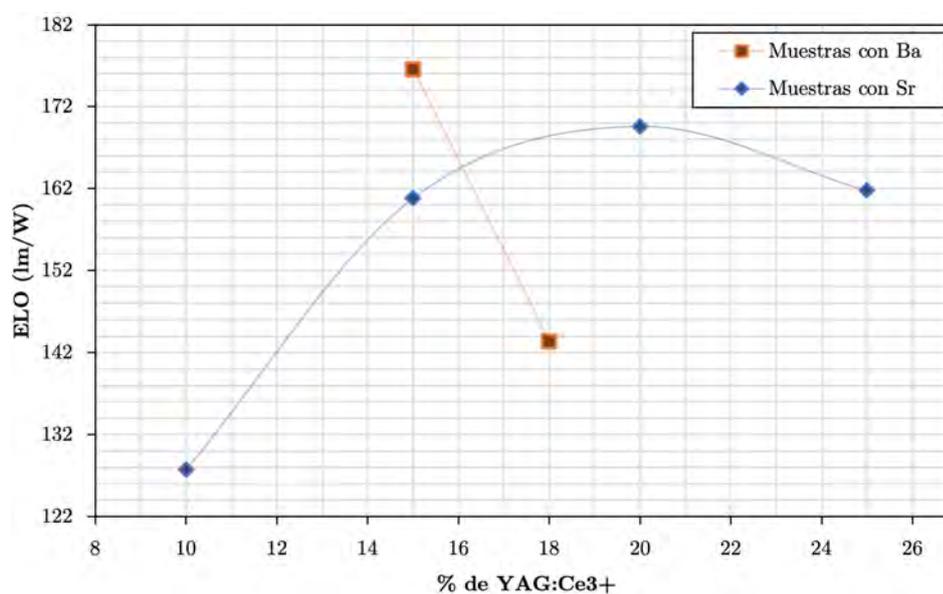


Figura 5.8: Gráfica de la tendencia del comportamiento de la ELO, respecto a la cantidad de $wt\%$ de $YAG:Ce^{3+}$, tanto para las pastillas con Sr y Ba.

5.2.4. Discusión de los resultados de las pastillas de fósforo

Observando la Figura 5.8, podemos identificar que el aumento en *wt %* del fósforo comercial incrementa gradualmente la ELO, sin embargo llega un punto en donde la ELO comienza a decaer. Según los resultados, el mejor *wt %* del fósforo comercial para las muestras de Sr es el 20 *wt %*. Por falta de tiempo, no fue posible realizar más mediciones en la esfera integradora, para pastillas de Ba de concentraciones menores a 15 *wt %*; por lo que para llegar a conclusiones precisas es necesario realizar más pruebas para el grupo de las pastillas de Ba.

Si bien la pastilla más eficiente fue la de Ba con un 15 *wt %* de YAG:Ce³⁺, las coordenadas de color no entran en el mapa de la Figura 4.3; por lo que, es necesario más pruebas para verificar si es posible realizar pequeñas variaciones en el *wt %* de YAG:Ce³⁺, para poder lograr colocar las coordenadas de color dentro del área considerada como luz blanca, por el estándar SAE J578.

Para el diseño del dispositivo, se consideró la pastilla de Ba con 18 *wt %* de fósforo comercial, debido a que, sus coordenadas de color sí entran en las especificaciones del SAE J578. Aunque, este tipo de pastilla no supera la EL de las pastillas de Sr 20 *wt %* YAG:Ce³⁺, si las supera en la DPO que pueden resistir, por lo tanto se pueden obtener más flujo luminoso de ellas.

En la Tabla 5.5, se muestra una compilación de algunos de los trabajos que tienen como objetivo, utilizar algún arreglo de fósforo YAG:Ce³⁺ para su implementación en producción de luz blanca por SSL. En la mayoría de los casos, los trabajos presentan gráficas, en donde se puede estimar las características fotoluminiscentes de interés, como la ELE y ELO. Para la ELE es necesario igualar la potencia eléctrica (PE) utilizada para poder comparar, y en caso de la ELO es necesario igualar la potencia óptica (PO) utilizada, y si es posible DPO para poder tener una comparación más acertada.

Como se puede ver en la Tabla 5.5, las pastillas obtenidas en este trabajo se encuentran aproximadamente en la zona intermedia de rendimiento, lo que indica que aún se necesita mejorar el material, además de que la DPO que puede soportar las pastillas también se debe de mejorar. Sin embargo, el procedimiento de fabricación para las pastillas propuestas, es mucho más sencillo y de menor costo en equipo, tiempo y energía; por ejemplo, los compuestos de Al₂O₃-YAG:Ce, que suelen estar a la cabeza de las eficiencias, tienen un procedimiento de fabricación que requiere muy altas presiones, de 30 a 300 MPa y temperaturas de hasta 1550 °C, por lo que se requiere equipo más costoso. Otra de las aproximaciones que en algunas ocasiones obtiene excelentes resultados es la implementación de placas de zafiro; pero igualmente, la utilización de dichas placas implica un costo extra y complejidad adicional en la fabricación. Finalmente tenemos que los monocristales, que dependiendo de la calidad de su fabricación pueden llegar a EL muy elevadas pero igualmente, su obtención implica largos periodos de tratamiento térmico de hasta 12 h a temperaturas de hasta 1600 °C [85].

Tabla 5.5: Comparación de la pastilla más eficiente obtenida, contra lo reportado en trabajos que buscan arreglos de YAG:Ce³⁺ para su utilización en SSL.

| Muestra más eficiente | PE (W) | ELE (lm/W) | PO (W) | DPO (W/mm ²) | ELO (lm/W) | CCT | CRI | Referencia | Año de publicación |
|---|---------|------------|--------|--------------------------|------------|--------|---------|---------------------|--------------------|
| Compuesto de Al ₂ O ₃ -YAG:Ce | – | – | – | ≈ 1.2 | ≈ 225 | 5766 | – | [54] | 2020 |
| PiC con SiO ₂ | – | – | – | ≈ 1.2 | ≈ 220 | 5994 | 54.20 | [72] | 2016 |
| PiC con SiO ₂ y MgO | – | – | – | ≈ 1.2 | ≈ 180 | ≈ 4750 | ≈ 57.50 | [36] | 2020 |
| PiG con placa de zafiro | – | – | 3.92 | 1.21 | 175 | ≈ 3800 | ≈ 58 | [58] | 2019 |
| Monocristal de YAG:Ce ³⁺ | – | – | ≈ 2.4 | ≈ 1.2 | ≈ 118 | ≈ 4588 | – | [39] | 2020 |
| Compuesto de Al ₂ O ₃ -YAG:Ce | – | – | ≈ 2.4 | ≈ 1.2 | ≈ 92 | ≈ 4588 | – | [39] | 2020 |
| Monocristal de YAG:Ce ³⁺ | 4.9 | 86.7 | – | – | – | 7300 | 62 | [50] | 2016 |
| Placa de zafiro embebida en LD | ≈ 12.42 | 70 | – | – | – | 6990 | 56 | [57] | 2017 |
| Compuesto de Al ₂ O ₃ -YAG:Ce | 45 | ≈ 44.44 | – | 50 | – | 5200 | – | [37] | 2016 |
| PiG con doble placa de zafiro | ≈ 4.9 | ≈ 24 | – | – | – | 6230 | 62.5 | [55] | 2019 |
| Muestra con Ba 15% YAG:Ce ³⁺ | 4.9 | 51.47 | 1.44 | 1.2 | 176.55 | 4822 | 55.74 | Este trabajo | 2020 |

5.3. Diseño resultante del prototipo de iluminación

El funcionamiento del dispositivo propuesto, queda representado a grandes rasgos por la Figura 5.9, con detalle del reflector en la Figura 4.6. Gracias a los resultados de las simulaciones de temperatura hechas por medio de “SolidWorks Simulation” y los resultados del trazo de rayos del complemento “APEX SolidWorks”, se pudo planear y dimensionar las piezas para su integración en un solo módulo portátil. A continuación se exponen los resultados de las simulaciones y el diseño final resultante para el dispositivo. Los planos y elementos en detalle de cada una de las piezas así como el método de fabricación propuesto se pueden consultar en el Apéndice C.

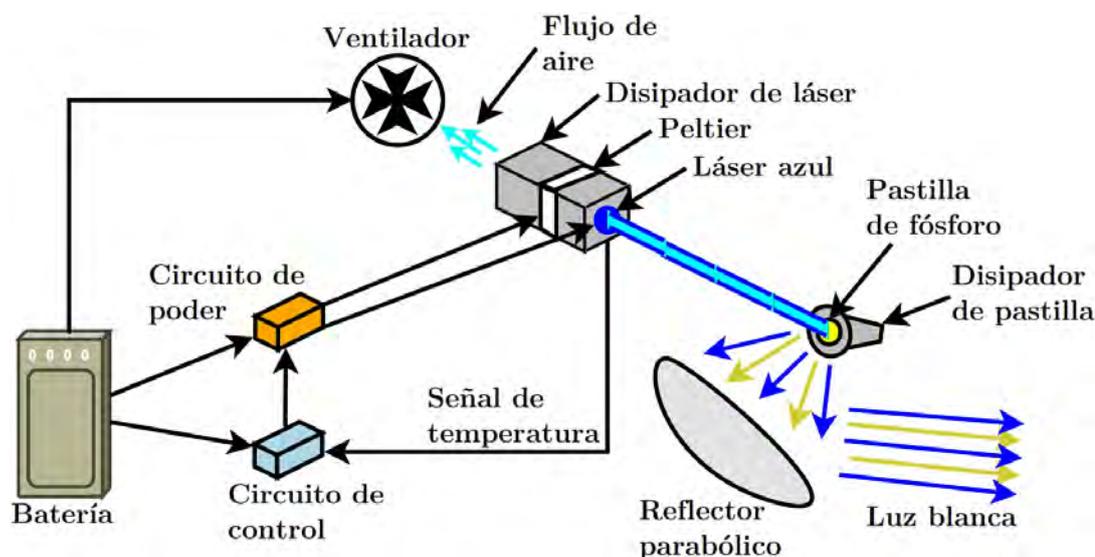


Figura 5.9: Diagrama simplificado de los componentes del prototipo de iluminación y su funcionamiento conjunto.

5.3.1. Simulaciones para el sistema de refrigeración

Como se mencionó en la sección 4.3.2, los parámetros principales para poder simular los disipadores en el entorno de “SolidWorks simulation” quedaron como se muestra en la Tabla 5.6, el material utilizado en la simulaciones de los disipadores fue el aluminio 1100. Como los disipadores se basaron en modelos de placas paralelas, ambos se obtuvieron de prismas rectangulares, el diseño intenta maximizar el número de aletas, sin llegar a un modelo complicado de fabricar en el taller mecánico del CIO. En la Figura 5.10, se puede observar cómo es el montaje del sistema de refrigeración del LD, y el del disipador de la pastilla en la Figura 5.10(a).

Para el disipador de la pastilla de fósforo, se tuvo que procurar que su tamaño no fuera demasiado grande; ya que, al estar colocado frente al reflector, un disipador grande bloquearía parte de los rayos provenientes del reflector desperdiciando parte de la luz. Como podemos darnos cuenta en la Figura 5.12, se logra que la temperatura en la zona de la pastilla no sea mayor a 120 °C, por lo que se garantiza que las pastillas de Ba no sufrirían daños irreversibles durante el funcionamiento del dispositivo.

En el caso del disipador del láser, se tuvo más libertad en el tamaño; sin embargo, el disipador no podía extenderse a un tamaño impráctico para la aplicación. A lo largo de las iteraciones de simulación, se llegó al modelo que podemos observar en la Figura 5.13, la potencia a disipar se definió en la plataforma cuadrada central en donde tendrá contacto con la celda peltier.

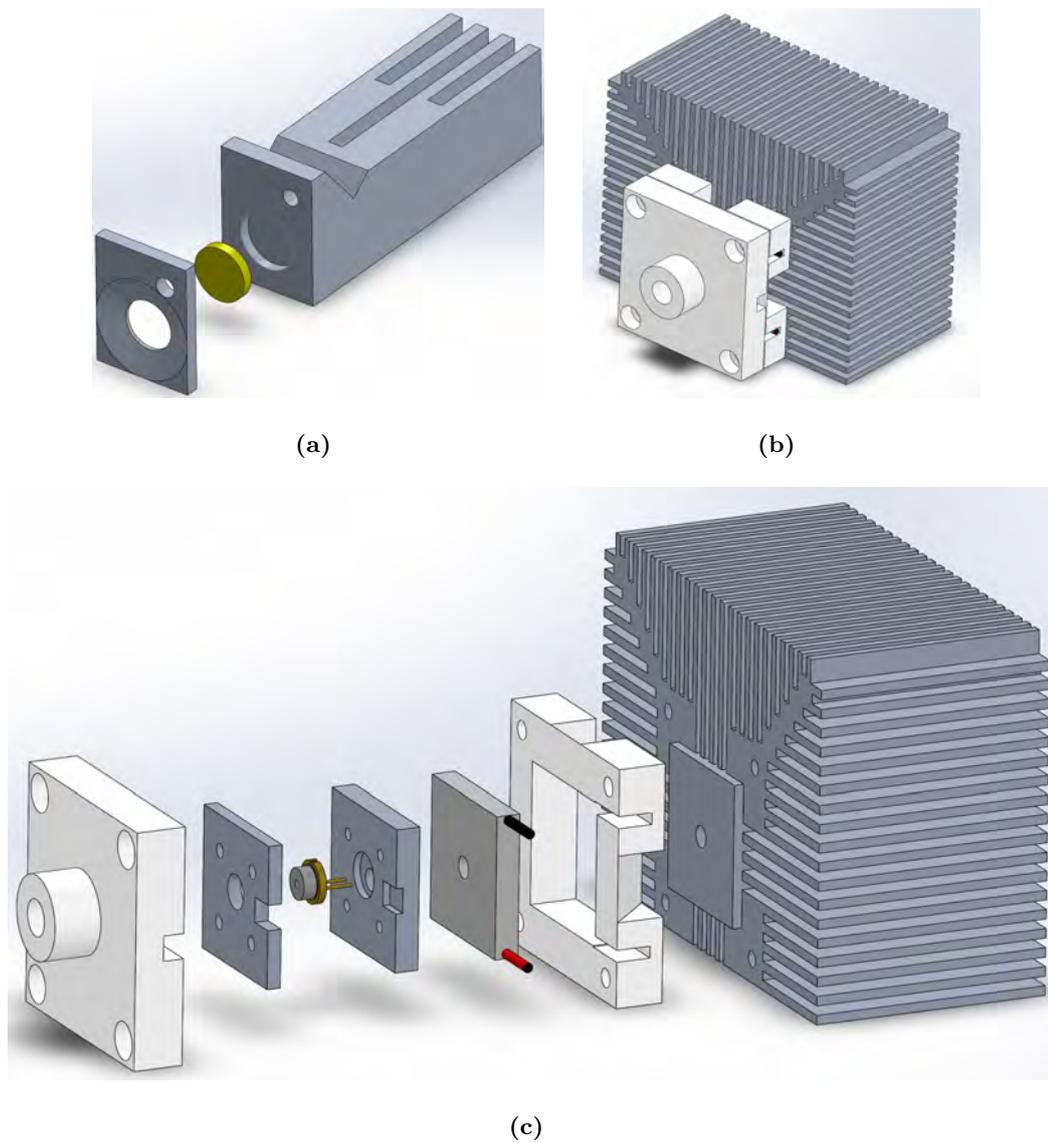


Figura 5.10: Capturas del sistema de refrigeración. a) Ensamblaje del disipador de la pastilla. b) Ensamblaje del láser. c) Ensamblaje del láser desarmado.

Según el fabricante, la celda peltier puede alcanzar una diferencia de temperatura de hasta $67\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre sus caras, a una potencia de 16.6 W ; sin embargo, no menciona bajo qué circunstancias la celda puede alcanzar dichos valores. Para comprobar la capacidad real de la celda, se optó por realizar una experimento para probar la capacidad real de la celda peltier. En la Figura 5.11, podemos observar una toma de la cámara térmica donde se muestra la celda peltier en funcionamiento conjunto con el LD y podemos identificar una diferencia de temperatura máxima de $29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

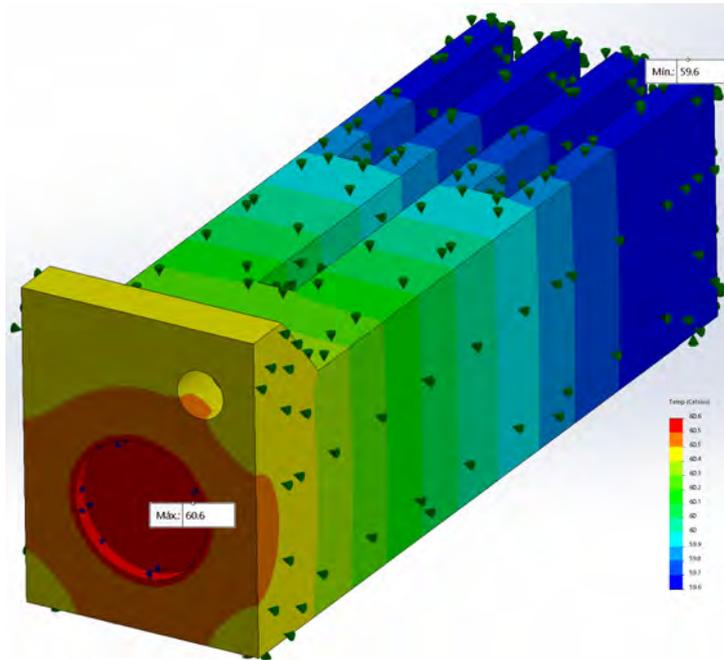
Tabla 5.6: Parámetros utilizados en las simulaciones termodinámicas del disipador de la pastilla y del láser respectivamente.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|------------------|
| Coef. de Convección Natural | 10.938 W/m^2K |
| Coef. de Convección Forzada | 53.026 W/m^2K |
| Temperatura ambiente | 60 °C 38 °C |
| Potencia a disipar | 12.45 W 1.2 W |

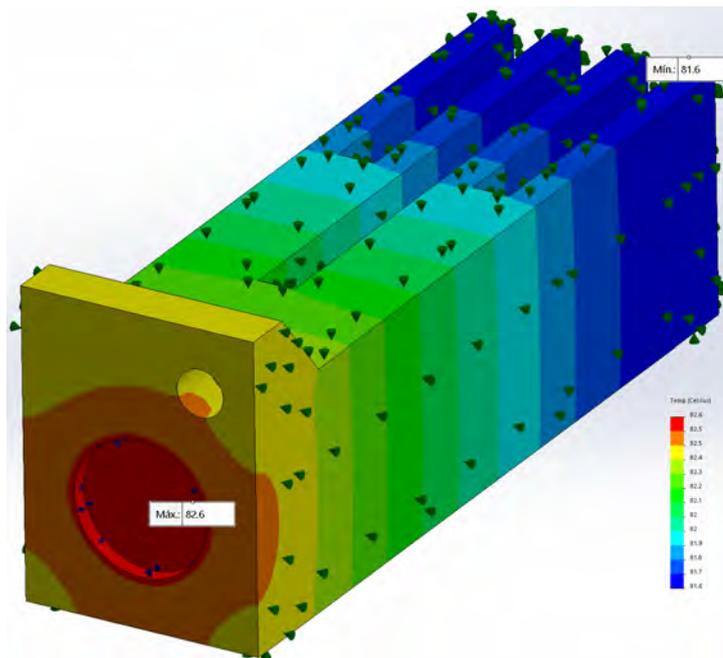


Figura 5.11: Máxima diferencia de temperatura alcanzada por el peltier TEC1- 07103T12, en funcionamiento conjunto con el LD NUBM08.

Luego entonces, si restamos la temperatura obtenida en la zona de contacto del peltier con el disipador; se obtiene una temperatura de 11.1 °C para el caso de 38 °C ambiente y de 33.1 °C para el caso de 60 °C ambiente. Para el caso de 38 °C, se garantiza un margen para que el LD pueda trabajar bajo la temperatura de 25 °C sin problema. Y para el caso de 60 °C, se garantiza que la temperatura en el LD no sobrepasará los 35 °C.

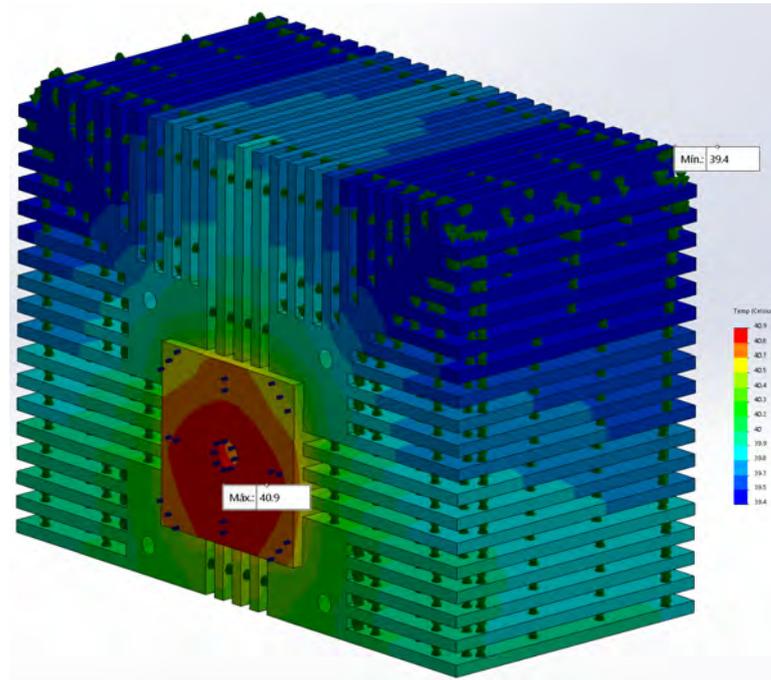


(a)

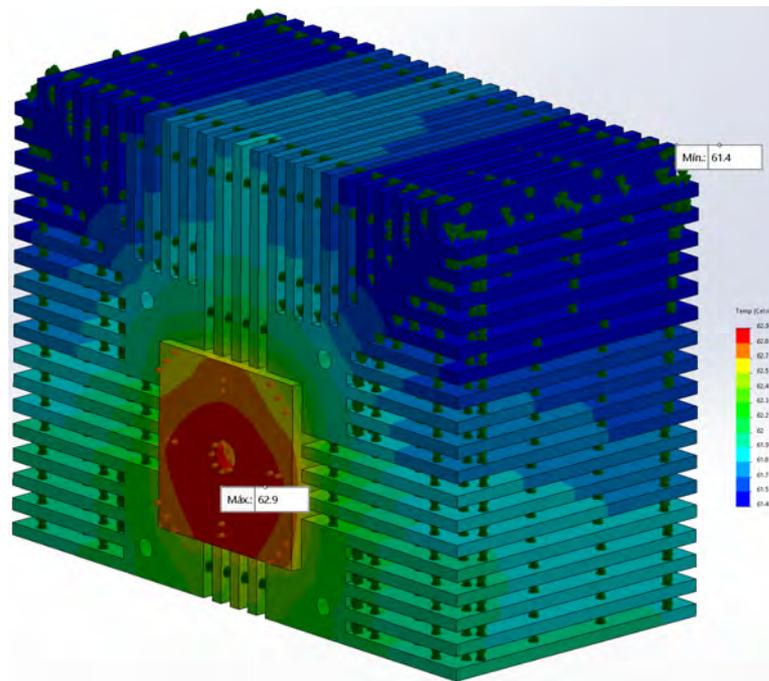


(b)

Figura 5.12: Resultado de las simulaciones termodinámicas, para el dissipador de la pastilla de fósforo, con a) 38 °C ambiente y b) 60 °C ambiente.

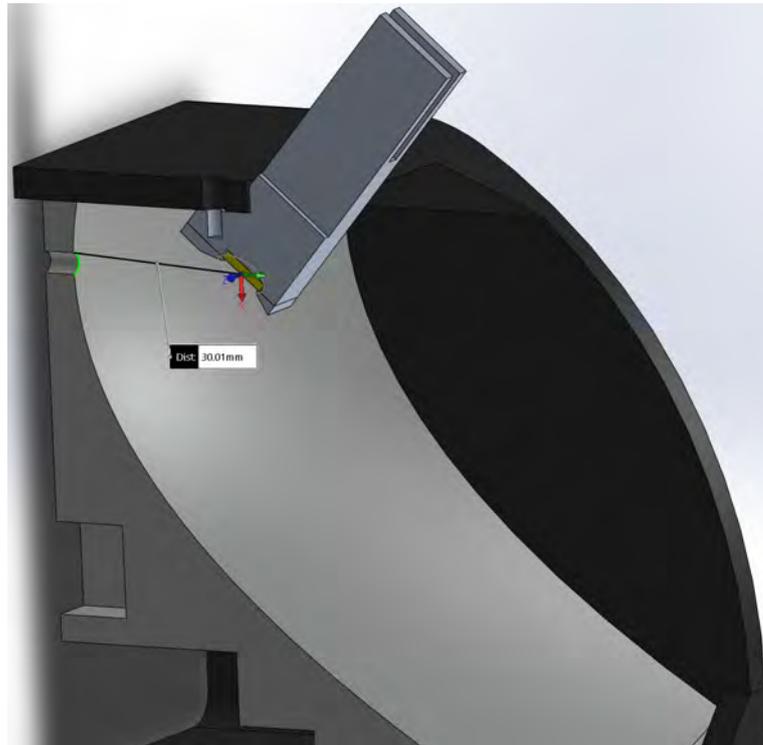


(a)

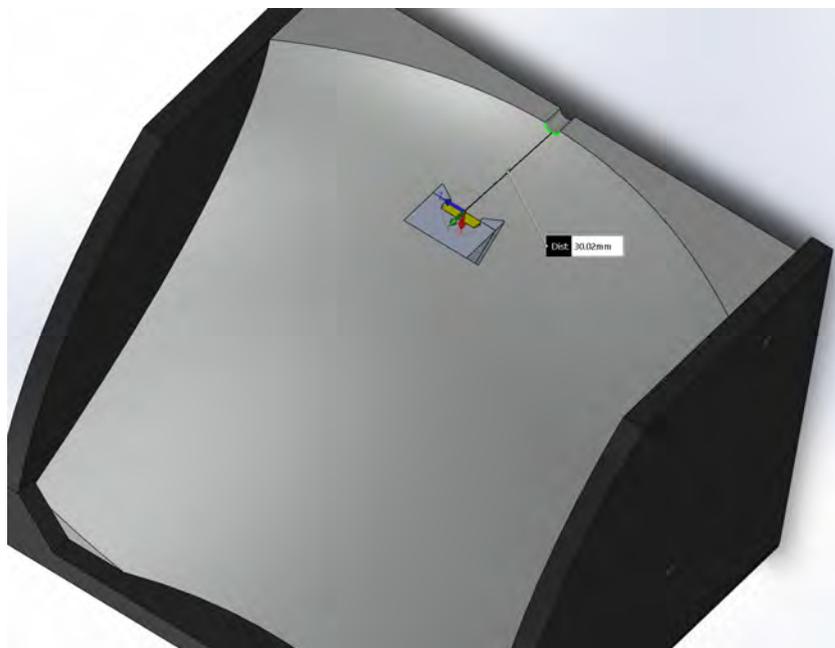


(b)

Figura 5.13: Resultado de las simulaciones termodinámicas, para el disipador del láser, con a) 38 °C ambiente y b) 60 °C ambiente.



(a)



(b)

Figura 5.14: Captura que muestra la distancia del centro de la pastilla a los perfiles parabólicos, a) vista de corte vertical f_p y b) vista de corte horizontal f_b .

5.3.2. Simulaciones para el trazo de rayos

Por medio del complemento de APEX para SolidWorks, se fueron realizando iteraciones del trazo de rayos, para identificar el posible comportamiento de las superficies propuestas en cada ocasión. La fuente de luz, se configuró como se describe en la sección 4.3.1; además de aplicar una emisión con una longitud de onda de 535 nm y un flujo de 520 lm que es la cantidad máxima de lm que se pudo obtener de la muestra de Ba con $18\text{ wt}\%$ de YAG:Ce^{3+} .

El ángulo de ataque para la pastilla se fijó en $\theta = 50^\circ$ Figura 5.15(b); el cual, fue el máximo en donde no se presentaba un bloqueo del haz del láser hacia la pastilla debido al dissipador de la pastilla. Lo anterior descrito se puede comprobar en la Figura 5.15.

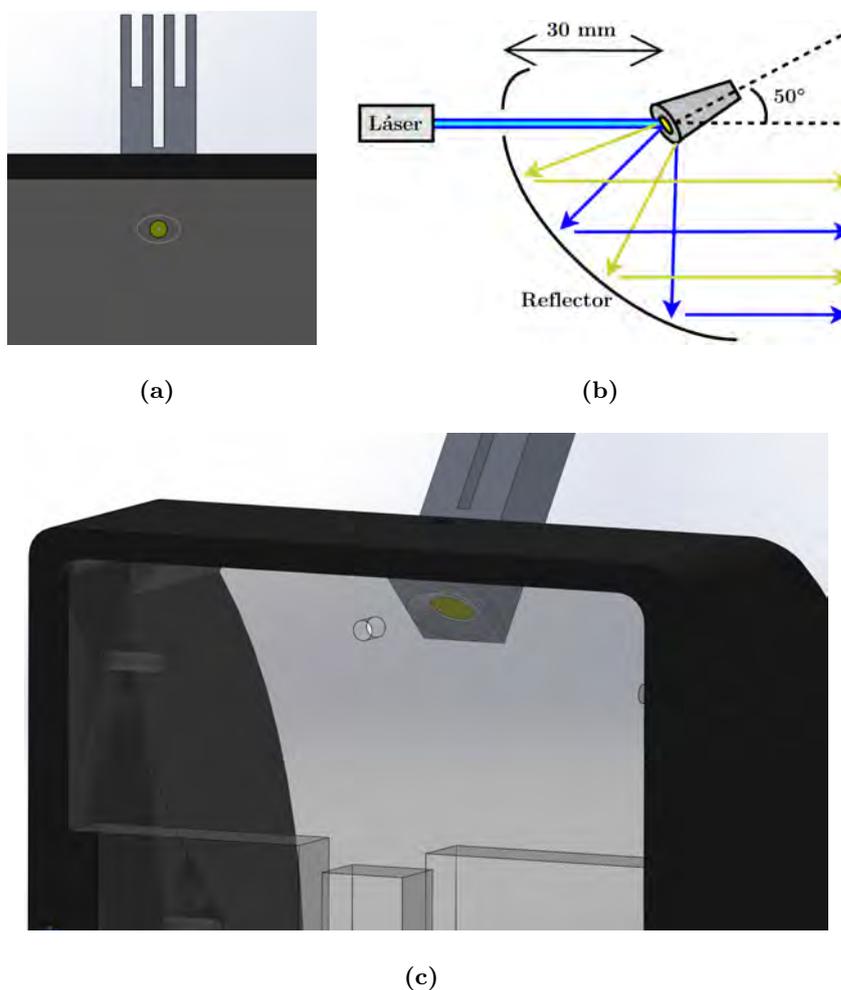


Figura 5.15: a) Vista hacia la pastilla montada en el reflector, desde la perspectiva del láser. b) Diagrama simplificado para la representación de θ y k . c) Vista con transparencia del arreglo del reflector.

A travez de las iteraciones se llegó a la conclusión de que, era necesario cubrir un área formada por una divergencia de hasta 24 deg , lo que implicaba que la luz no debía estar colimada. Así que, la pastilla de fósforo, debía estar fuera del punto focal de los perfiles parabólicos de la superficie. Por lo tanto, se fijó el valor de $k = 30 \text{ mm}$ en la ecuación 4.2, resultando:

$$y = \frac{x^2}{4 * f} - 30 \quad (5.4)$$

Donde el valor de 30 mm representa la distancia del centro de la pastilla a los dos perfiles parabólicos de la superficie del reflector, justo como se muestra en la Figura 5.15(b) y 5.14. Dicha distancia se definió así porque, a una distancia menor el dissipador de la pastilla bloqueaba en gran medida los rayos de salida del reflector. No se buscó hacer dicha distancia más grande porque esto implicaba un reflector más grande y menos portable.

Los perfiles fueron evolucionado de manera independiente a través de las iteraciones. El perfil parabólico principal (f_p), controla la extensión vertical del haz de luz proveniente del reflector, ecuación 5.5. Y el perfil parabólico de barrido (f_b), controla la extensión horizontal del haz, ecuación 5.6. Finalmente, las ecuaciones de los dos perfiles quedaron como:

$$y = \frac{x^2}{4 * 23.7} - 30 \quad (5.5)$$

$$y = \frac{x^2}{4 * 41.6} - 30 \quad (5.6)$$

El resultado final obtenido de las simulaciones realizadas en el software APEX de la distribución de candelas generada por el reflector, se muestra en la Figura 5.16; donde, se representa una pantalla perpendicular a una distancia del reflector de 18.3 m , la cual tiene una extensión de -13.5 a 13.5 deg horizontales y -4.5 a 3.5 grados verticales, centrados en la posición del reflector. Esta pantalla alcanza a cubrir los puntos especificados en la Figura 4.3. En la Tabla 5.7, se puede revisar la extracción del mapa de candelas, para los valores puntuales que aparecen en la Figura 4.4(b).

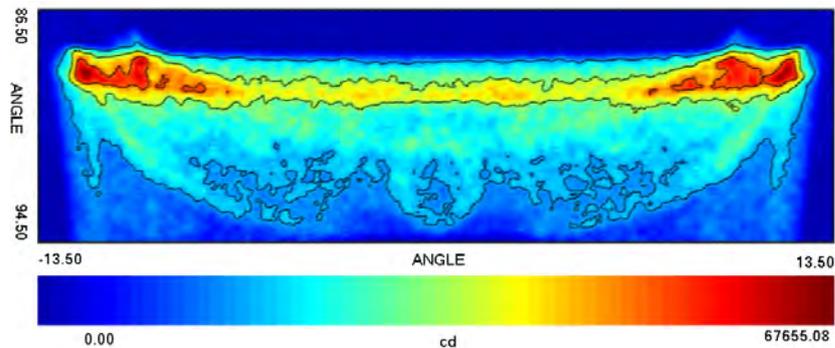


Figura 5.16: Mapa resultante de la simulación en APEX de la distribución de candelas, en una pantalla a 18.3 m del reflector.

Igualmente, se obtuvo el mapa de luxes que se generaría a nivel de suelo Figura 5.17. Esto únicamente con el objetivo de visualizar la forma de la distribución de luz generada por el reflector.

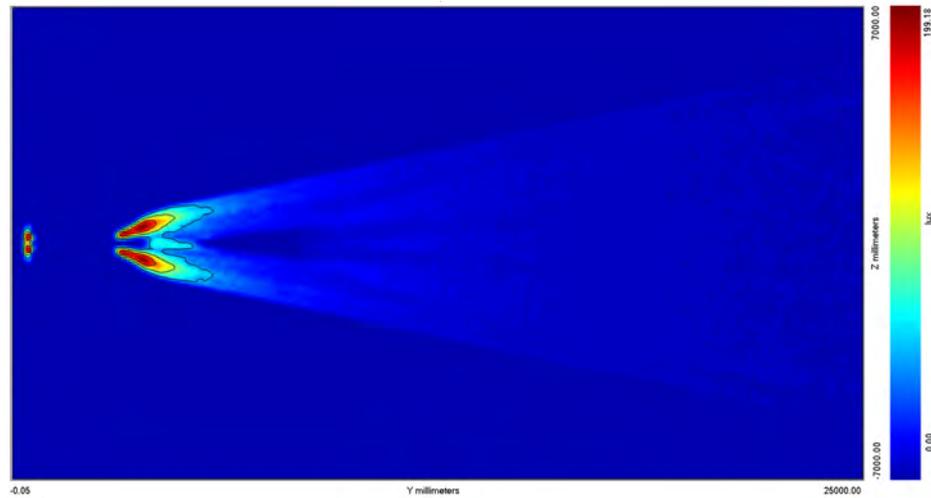


Figura 5.17: Mapa de la distribución de luxes, a nivel de piso para el reflector diseñado.

Tabla 5.7: Valores para los puntos específicos de candelas, obtenidas en la simulación del reflector en APEX para SolidWorks, para los puntos especificados por el estándar [81].

| Punto de Prueba | Candelas |
|-----------------|-------------|
| 2U-V | 4950 |
| 1U-3L/3R | 39076/36528 |
| H-V | 24025 |
| H-3L/3R | 31941/29368 |
| H-6L/6R | 32063/31411 |
| H-9L/9R | 26328/26899 |
| H-12L/12R | 21820/22351 |
| 1.5D-V | 21994 |
| 1.5D-9L/9R | 22581/21506 |
| 2.5-D-V | 15618 |
| 2.5D-12L/12R | 13885/14582 |
| 4D-V | 3755 |

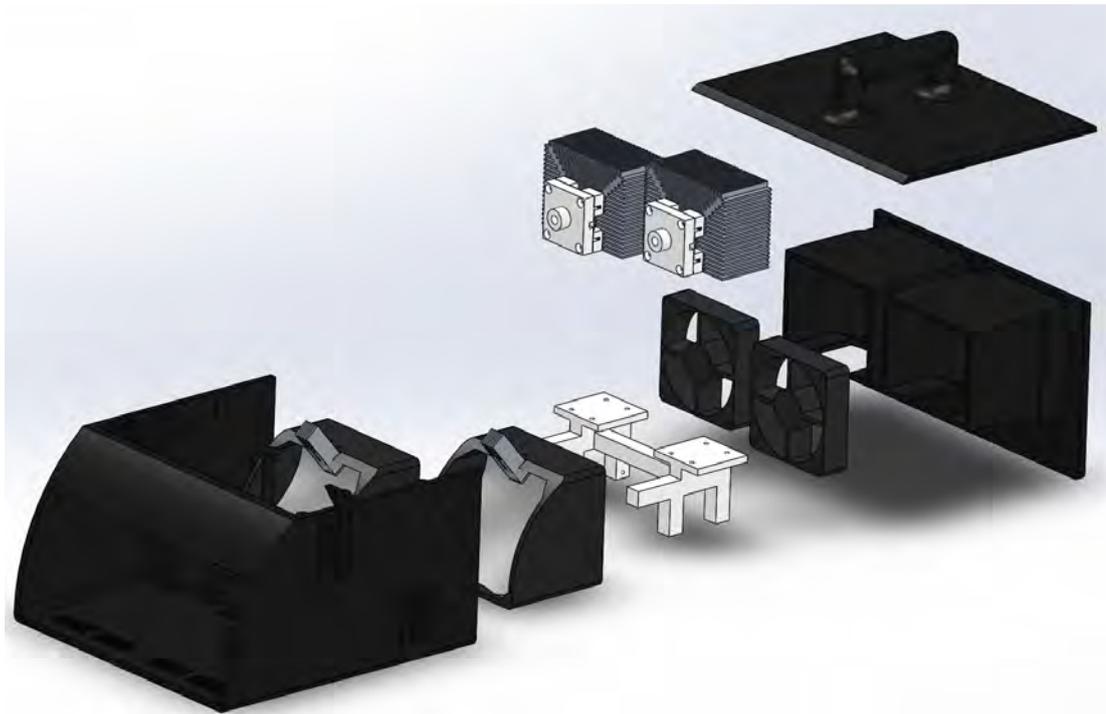


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 5.18: Capturas del diseño final del dispositivo de SSL; a) vista frontal, b) Vista posterior, c) vista con transparencias y d) vista desarmada.

Comparando la Tabla 5.7 con la Tabla 4.4(b), podemos identificar que el único punto que no cumple con la especificación es el H-V; sin embargo, es posible alcanzar dicho valor utilizando 2 configuraciones iguales del reflector diseñado. Por lo tanto, se propone utilizar dos sistemas gemelos, los cuales tendrán exactamente las mismas características; de esta manera el diseño del dispositivo propuesto quedaría como se muestra en la Figura 5.18. El diseño del encapsulado, como se mencionó antes, solo tuvo como objetivo servir de soporte y volver portable todo el arreglo, por lo que se incluyó un asa en la parte superior.

5.3.3. Circuito electrónico del módulo láser

En la anterior sección, se propone que el dispositivo de iluminación debe de tener dos sistemas gemelos de reflectores; por lo tanto, los circuitos electrónicos que se encargan de alimentar los LDs y las celdas peltier están duplicados. El circuito de control no es necesario duplicarlo, debido a que, se pueden configurar varios canales analógicos para la medición de temperatura y además el microcontrolador propuesto tiene las salidas digitales suficientes.

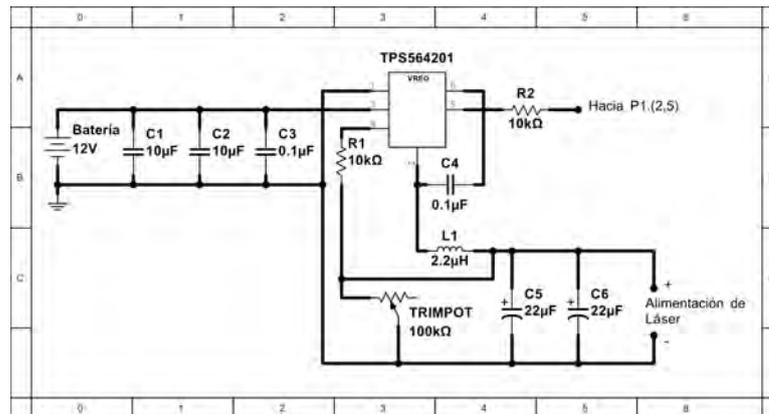
Recordando lo mencionado en la sección 4.3.3, se buscaron reguladores de voltaje conmutados “Step Down” para la alimentación tanto del LD como para la celda peltier. Para el caso del LD “NUBM08”, se necesita una alimentación de 4.8 V a 3.5 A; así que se eligió el regulador TPS564201DDCR de Texas Instruments, el cual puede entregar los requerimientos de alimentación del LD manteniendo una eficiencia del 90 %.

En el caso de la celda peltier “TEC1-07103T125”, se necesita una alimentación de 8.5 V a 3 A; aquí se eligió el regulador BD9C401EFJ-E2 de ROHM Semiconductors, el cual puede entregar los requerimientos de alimentación de la celda peltier manteniendo una eficiencia por encima del 90 %. Cabe mencionar que, este modelo de regulador es más económico que el utilizado para el LD.

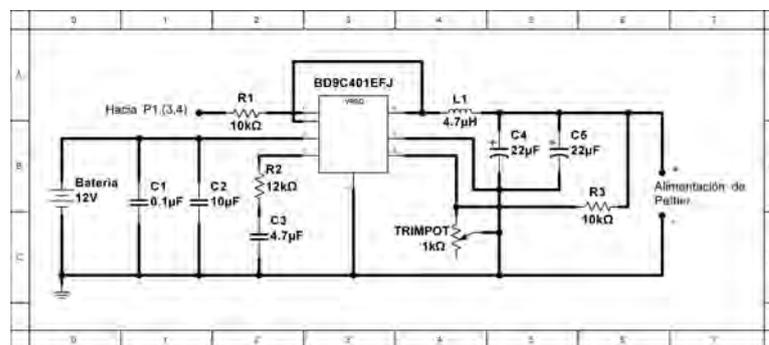
Los fabricantes de los dos reguladores proponen, en sus respectivas hojas de datos, el circuito y los componentes necesarios para el correcto funcionamiento de cada uno, Figura 5.21. Una característica importante de ambos reguladores es que, disponen de una señal de control para activar o desactivar, por lo que los reguladores pueden apagarse sin necesidad de desconectar todo el sistema.

Para la regulación de corriente por voltaje en el LD, se propone utilizar un MOS-FET de potencia “IRF350z un amplificador operacional mono fuente “TLC271CP”, Figura 5.19.

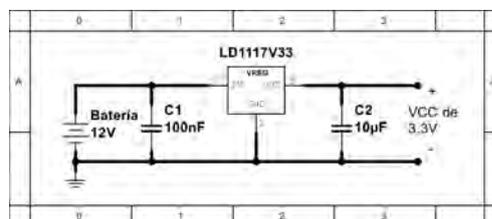
El control por temperatura, se hará posible por medio del Algoritmo 1; donde, se hace uso de las entradas analógicas para obtener un arreglo de varias lecturas proporcionadas por los sensores “LM35”, que toman la temperatura de los LDs. Después, se verificar si es que las lecturas son concisas y estables, esto con el objetivo de asegurar si los sensores están conectados y funcionando correctamente. Luego, se identifica si la temperatura promedio de las lecturas es permisible para el correcto funcionamiento de los LDs. Finalmente, se pasa a la decisión de apagar o encender tanto los LDs como las celdas peltier según sea el caso.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.21: Diagrama del circuitos de alimentación del dispositivo. a) Regulador del láser. b) Regulador de la celda peltier. c) Regulador de circuito de control.

Para la verificación del correcto funcionamiento de los sensores de temperatura, se pensó utilizar la desviación estándar para obtener posibles irregularidades en las lecturas; pero debido a la limitada memoria RAM del microcontrolador, se optó únicamente por identificar la diferencia máxima entre las mediciones. En la Figura 5.22, se puede observar el diagrama de estados de la toma de decisiones según las lecturas de temperatura.

La programación de los microcontroladores de la familia MSP430, se lleva a cabo por medio de la propia plataforma de Texas Instruments llamada Code Composer. El código fuente del programa se puede revisar en el Apéndice B.

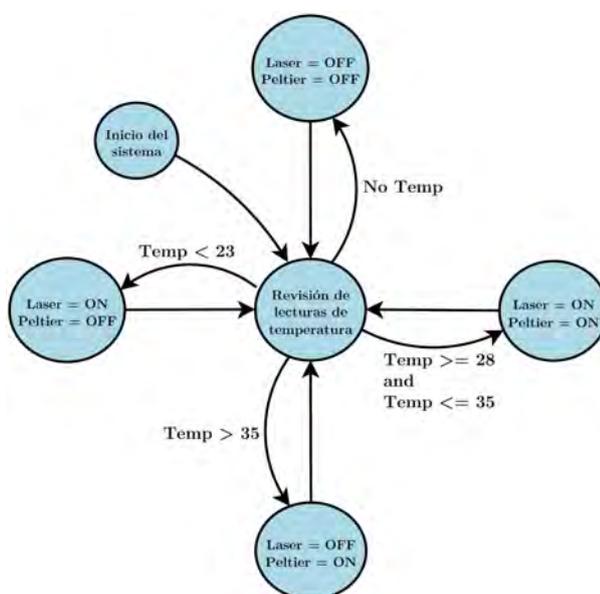
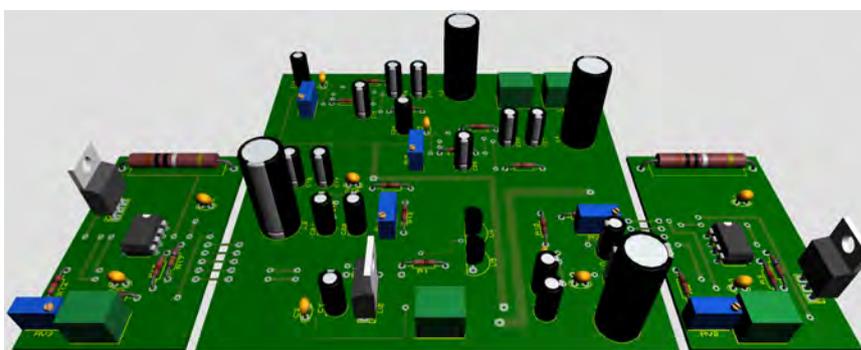


Figura 5.22: Diagrama de estados, que muestra la toma de decisiones del microcontrolador según el promedio de temperatura obtenido, por las lecturas de temperatura en el LD.

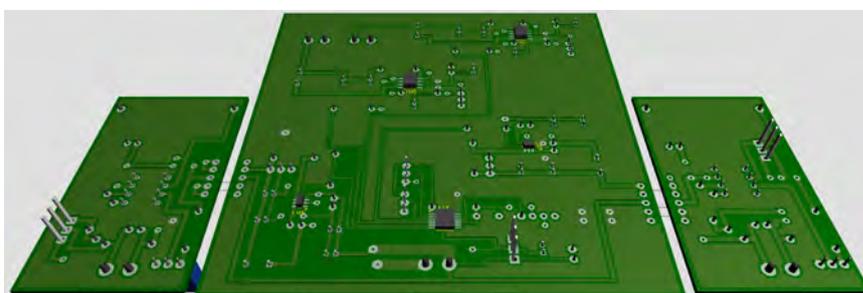
Todos los circuitos descritos anteriormente, así como todos y cada uno de los componentes necesarios, marcas y modelos se pueden revisar en el Apéndice B; la representación virtual del circuito electrónico se pueden ver en la Figura 5.23.

5.3.4. Discusión de resultados del prototipo de iluminación

El diseño de reflector propuesto, cumple con casi toda la distribución de candelas requerida; sin embargo, tiene dos áreas a los extremos de la distribución donde se concentra parte de la luz disponible; no es deseable que existan dichas concentraciones. Lo anterior se debe a que, el reflector no comprende una complejidad avanzada; esto da pie a un punto de mejora para modificar la superficie de manera discontinua, por ejemplo con la técnica de superficies elípticas [82], se puede llegar a redireccionar ese exceso de luz hacia el punto H-V dando la posibilidad de que un solo reflector sea capaz de cumplir con la distribución de candelas.



(a)



(b)

Figura 5.23: Representación virtual del circuito de control y alimentación, a) parte superior y b) parte inferior. Donde, en la parte central se concentra el microcontrolador y los reguladores de voltaje, y en los laterales los circuitos de control de corriente para los LDs.

En cuestión a las estimaciones y simulaciones del sistema de refrigeración, se logró cumplir con los objetivos de diseño, los cuales eran soportar una temperatura ambiente de hasta $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y garantizar un funcionamiento correcto del LD a una temperatura de hasta $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En el apartado del circuito electrónico, se cumple de forma básica el control de la temperatura de los láseres y protección contra sobrecalentamiento, por medio de un sistema “on-off” con ventana de histéresis. En un futuro, este sistema de control puede mejorarse dependiendo de la información obtenida del comportamiento real del dispositivo ya fabricado.

En general y según las simulaciones, el dispositivo propuesto puede cumplir con los requerimientos mencionados en la sección 4.2., claramente esta es una primera iteración de un dispositivo de esta clase desarrollado en el laboratorio de NAFOMA. Si bien, el dispositivo aún está lejos de cumplir con los requerimientos de un modelo industrial, aún puede ser utilizado en el corto plazo como dispositivo de pruebas para los futuros materiales que se desarrollen para aplicaciones de SSL.

Algoritmo 1 Control de temperatura

```
1: Se definen la cantidad máxima de mediciones y la cantidad de mediciones por canal
2: Inicializa las entradas y salidas del microcontrolador
3: Inicializa la configuración de convertidor analógico digital
4: while Infinito do
5:   Promedio canal = 0
6:   Diferencia máxima = 0
7:   Variable auxiliar = 0
8:   for  $i = 0; i < \text{Numero máximo de muestras por canal}; i++$  do
9:     Promedio de canal += Muestra[ $i$ ]
10:  end for
11:  Promedio de canal = Promedio de canal / Numero máximo de muestras por canal
12:  for  $i = 0; i < \text{Numero máximo de muestras por canal} - 1; i++$  do
13:    Variable auxiliar = Muestra[ $i$ ] - Muestra[ $i + 1$ ]
14:    if Variable auxiliar  $\geq$  Diferencia máxima then
15:      Diferencia máxima = Variable auxiliar
16:    end if
17:  end for
18:  if Diferencia máxima  $<$  Diferencia tolerable then
19:    if Promedio de canal  $>$  35 °C then
20:      Desactivar láser, activar celda peltier
21:    end if
22:    if Promedio de canal  $>$  28 °C And Promedio de canal  $<$  35 °C then
23:      Activar láser y celda peltier
24:    end if
25:    if Promedio de canal  $<$  22 °C then
26:      Activar láser, desactivar celda peltier
27:    end if
28:  else
29:    Desactivar láser y celda peltier
30:  end if
31:  wait for Arreglo de mediciones desde el módulo analógico digital
32: end while
```

Conclusiones

En este trabajo, se probó un material capaz de contener el fósforo YAG:Ce³⁺. Con el material se fabricaron pastillas, a las cuales se les realizaron pruebas de caracterización y se encontró que, llegaban a mantener las características fotoluminiscentes del fósforo, logrando una eficacia luminosa hasta de 176.55 *lm/W* obteniendo resultados similares como se vio en la Tabla 5.5. Además, se propuso una metodología de fabricación de fácil implementación, por medio del método de sinterizado, el cual es muy utilizado para la creación de cerámicos.

También, se ha propuesto un diseño para la construcción de un prototipo que implementa la tecnología del SSL; el cual, enfoca su aplicación en un faro de automóvil de luz alta, cumpliendo con los requisitos mínimos de la aplicación. Sin embargo, el dispositivo puede poner a prueba materiales cerámicos capaces de soportar altas densidades de potencia; por lo que, a corto plazo puede ser utilizado como banco de pruebas para los materiales producidos en el laboratorio NAFOMA.

El diseño del prototipo, cimienta las bases para cada una de las partes básicas de un faro de automóvil basado en SSL; considerando elementos como, la unidad de control de láser por temperatura, sistema de refrigeración y morfología de los reflectores. Dichas partes se pueden seguir afinando para lograr un dispositivo de nivel industrial.

6.1. Trabajo futuro

Para la continuación futura de éste trabajo, se deben mejorar los siguientes aspectos del material y el prototipo:

- Identificar las cantidades óptimas de Bario y Boro, para mejorar el mantenimiento de la eficacia luminosa del fósforo, traslucidez de la pastilla y disminución de tiempo y temperatura de sinterizado.
- Mejorar el entendimiento del material, por medio de exámenes como rayos X y catodoluminiscencia.

- Continuar calibrando la temperatura y tiempo de sinterizado, para optimizar el tiempo de fabricación.
- Probar el aumento de presión por medio de una prensa isostática, al momento del consolidado de la pastilla. Para así mejorar la translucidez y conductividad térmica de la pastilla.
- Construir el prototipo para verificar los resultados de las simulaciones.
- Una vez construido el prototipo, realizar pruebas de larga duración para comprobar que, a lo largo de jornadas largas de funcionamiento las pastillas no pierden emisión.
- Mejorar el diseño óptico del reflector mediante técnicas ópticas de no imagen, para dirigir las acumulaciones de intensidad en lugares indeseados de la distribución de luz, a puntos donde se requiera intensidad adicional.
- Reducir u optimizar el espacio del prototipo, para compactar y ahorrar espacio.

Igualmente, con el objetivo de mejorar el prototipo y acercarlo cada vez más a una aplicación industrial que compita con los emergentes dispositivos de SSL, se deben adicionar los siguientes puntos:

- Los reflectores para luz baja, utilizando el diseño de superficies elípticas o por medio de un sistema de proyector.
- Un sistema de seguridad para evitar accidentes debido a un desalineación del láser o violación del encapsulado exterior.
- Adicionar capacidades adaptativas, por medio de visión artificial y servomotores.
- Mejorar el control de corriente de los LDs, para que se tome en consideración la intensidad de la luz que se genera y así garantizar la calidad de la iluminación proporcionada por el faro bajo cualquier circunstancia.

Iteraciones del diseño del material

De las Tablas A.1 hasta A.3, se contienen todas las iteraciones realizadas en el proceso de diseño del material. Dos de los parámetros que se mantuvieron fijos en todas las iteraciones fue, el tamaño de las esferas de molido (3 mm) y la cantidad (74.86 gr). Dichos valores fueron escogidos gracias a resultados previos de algunos trabajos en el laboratorio de NAFOMA, lo único que se cambió en este apartado fue el tiempo de molido y el número de revoluciones por minuto del molino.

Las variables de fabricación se definen como:

- ▶ t_m es el tiempo de molido.
- ▶ V revoluciones por minuto.
- ▶ T_p temperatura pico del tratamiento térmico.
- ▶ t_s tiempo en temperatura pico del tratamiento térmico.
- ▶ $N95/H5$ atmósfera de hidrógeno al 95 % e hidrogeno al 5 %, a una presión de 0.03 MPa y un flujo de 1 lt/min.
- ▶ V_{acc} recámara del horno con vacío de -0.07 MPa, previamente purgado por gas hidrógeno al 95 % e hidrogeno al 5 %.

Las etapas de fabricación se identificarán como:

- ▶ E_1 : Revisión de porosidad visible en la pastilla y resistencia del ambate del láser.
- ▶ E_2 : Toma de espectros de emisión.
- ▶ E_3 : Densidad de potencia que resiste la pastilla.
- ▶ E_4 : Revisión del “quenching” térmico.
- ▶ E_5 : Obtención de las características fotoluminiscentes.

Tabla A.1: Iteraciones realizadas para la fabricación del material parte 1.

| Nombre de la muestra | Composición del material soporte | Parametros de fabricación | Etapas de caracterización |
|---|---|---|---------------------------|
| Iteración 1 Sr, 5 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 1 Sr, 10 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 1 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 2 Sr, 30 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 2 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.94} SrCe _{0.06} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 2 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.92} SrCe _{0.08} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 3 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 3 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.92} SrCe _{0.08} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 4 Sr, 10 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 6 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 4 Sr, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 6 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 4 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 6 \text{ h}, N95/H5$ | E ₂ |
| Iteración 5 Sr, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 5 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 5 Sr, 25 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 5 Sr, 30 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 5 Sr, 35 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 6 Sr, 5 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 6 Sr, 40 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |

Tabla A.2: Iteraciones realizadas para la fabricación del material parte 2.

| Nombre de la muestra | Composición del material soporte | Parametros de fabricación | Etapas de caracterización |
|---|---|--|---------------------------|
| Iteración 6 Sr, 50 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 6 Sr, 5 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 6 Sr, 25 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 6 Sr, 50 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al ₄ Si _{0.4} B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 7 Sr, 10 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 25 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 7 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 25 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 7 Sr, 40 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 25 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 7 Sr, 50 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.98} SrCe _{0.02} Al _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 25 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 7 Sr, 25 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 25 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 7 Sr, 50 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 25 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, N95/H5$ | E ₃ |
| Iteración 8 Sr, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, V_{acc}$ | E ₃ |
| Iteración 8 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{1.96} SrCe _{0.04} Al _{3.5} Si _{0.5} B ₁ O ₁₂ | $t_m = 4 \text{ h}, T_p = 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 20 \text{ rpm}, t_s = 3 \text{ h}, V_{acc}$ | E ₃ |
| Iteración 9 Sr, 10 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}, T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, V_{acc}$ | E ₃ |
| Iteración 9 Sr, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}, T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, V_{acc}$ | E ₅ |
| Iteración 9 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}, T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, V_{acc}$ | E ₅ |
| Iteración 9 Sr, 10 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{2.98} SrCe _{0.02} Al _{3.4} Si ₁ B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}, T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, V_{acc}$ | E ₃ |
| Iteración 9 Sr, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{2.98} SrCe _{0.02} Al _{3.4} Si ₁ B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}, T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, V_{acc}$ | E ₃ |
| Iteración 9 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{2.98} SrCe _{0.02} Al _{3.4} Si ₁ B _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}, T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}, t_s = 4 \text{ h}, V_{acc}$ | E ₅ |

Tabla A.3: Iteraciones realizadas para la fabricación del material parte 3.

| Nombre de la muestra | Composición del material soporte | Parametros de fabricación | Etapas de caracterización |
|--|---|--|---------------------------|
| Iteración 10 Sr, 10 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 4 \text{ h}$, V_{acc} | E ₄ |
| Iteración 10 Sr, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 4 \text{ h}$, V_{acc} | E ₄ |
| Iteración 11 Sr, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 4 \text{ h}$, N95/H5 | E ₄ |
| Iteración 11 Sr, 10 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y _{2.98} SrCe _{0.02} Al _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 4 \text{ h}$, N95/H5 | E ₄ |
| Iteración 12 Sr, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 5 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 13 Sr, 12 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 10 \text{ h}$, V_{acc} | E ₃ |
| Iteración 14 Sr, 17 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 6 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 15 Sr, 20 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 6 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 15 Sr, 25 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ SrAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 6 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 16 Ba, 18 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ BaAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 5 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 17 Ba, 15 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ BaAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1420 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 3 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 18 Ba, 12.5 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ BaAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1410 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 16 \text{ h}$, V_{acc} | E ₃ |
| Iteración 19 Ba, 12.5 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ BaAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 4 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 20 Ba, 10 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ BaAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 4 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 20 Ba, 7.5 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ BaAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 3 \text{ h}$, V_{acc} | E ₅ |
| Iteración 20 Ba, 5.0 wt % YAG:Ce ³⁺ | Y ₂ BaAl _{3.4} SiB _{0.6} O ₁₂ | $t_m = 5 \text{ h}$, $T_p = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ $V = 22 \text{ rpm}$, $t_s = 3 \text{ h}$, V_{acc} | E ₃ |

Elementos de fabricación para circuito electrónico del prototipo

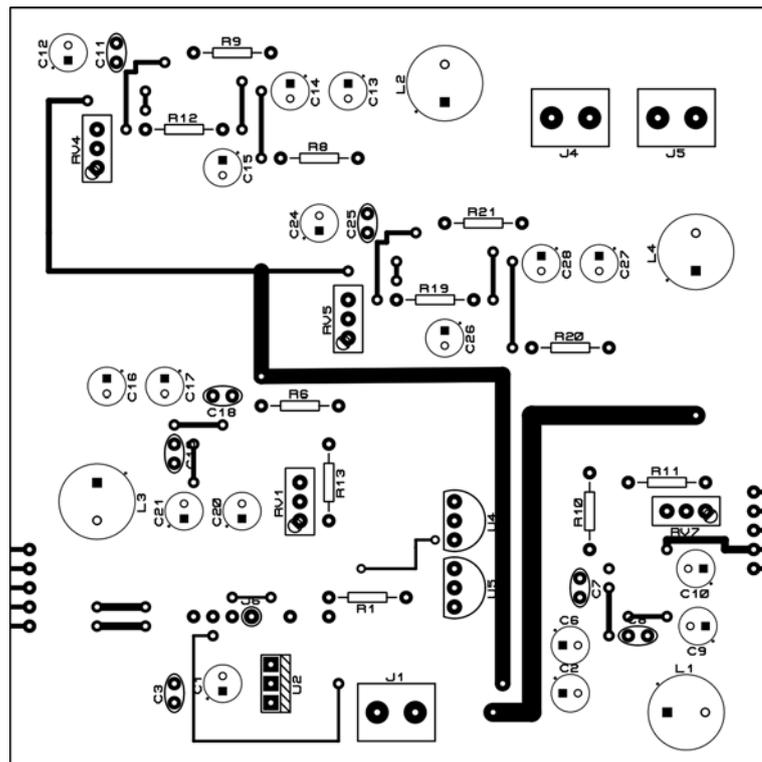


Figura B.1: Plantilla superior para fabricar el circuito principal, el cual contiene el microcontrolador y todos los reguladores de voltaje.

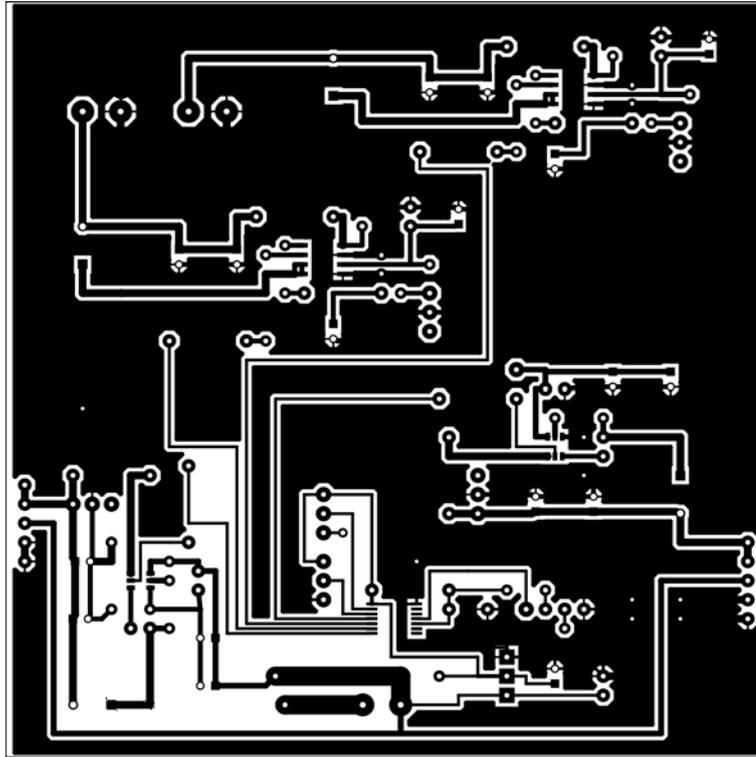
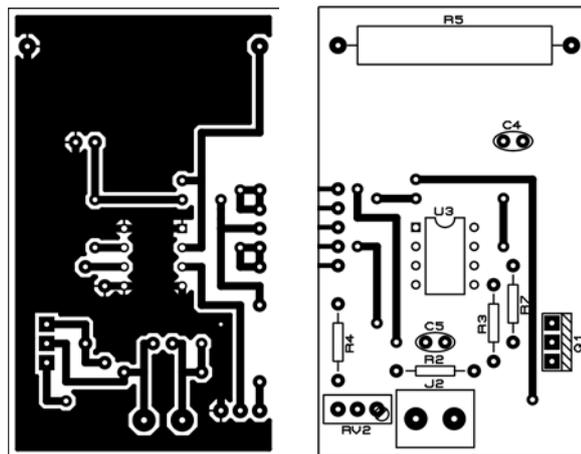


Figura B.2: Plantilla inferior para fabricar el circuito principal, el cual contiene el microcontrolador y todos los reguladores de voltaje.



(a)

(b)

Figura B.3: Plantillas para fabricar el circuito regulador de corriente del láser derecho, a) parte inferior y b) parte superior.

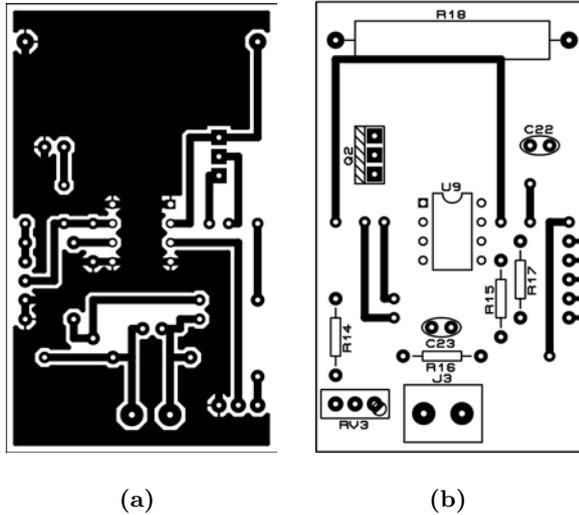


Figura B.4: Plantillas para fabricar el circuito regulador de corriente del láser izquierdo, a) parte inferior y b) parte superior.

```

1 // Required libraries -----
2 #include <msp430.h>
3 //-----
4 // Auxiliary constants
5 #define N_Samples 20
6 #define N_Channels 2
7 #define SamPerChnl 10
8 #define Tol_Dif 50
9 -----
10 // Program variables -----
11 volatile unsigned int ASamples[N_Samples];
12 volatile unsigned int i;
13 volatile unsigned int Average[N_Channels];
14 volatile unsigned int Max_Dif[N_Channels];
15 volatile unsigned int Aux[N_Channels];
16 -----
17 // Main program -----
18 int main(void)
19 {
20     // Set the microcontroller configurations -----
21     WDTCTL = WDTPW | WDTHOLD; // Stop watchdog timer
22     //-----
23     // Analog configurations -----
24     P1SEL |= BIT0 + BIT1; // Enable A/D channels inputs
25     // Turn on ADC10 + Multisample mode + Sampling time to 2 preset + Reference generator ON to 1.5 V + Enable interrupts + Vr+=Vref+ and Vr=-AVss
26     ADC10CTL0 |= ADC10ON + MSC + ADC10SHT_2 + REFON + ADC10IE + SREF_1;
27     ADC10CTL1 |= INCH_1 + CONSEQ_3; // A1 to A0 sequence + Sequence of channels
28     ADC10AE0 |= BIT0 + BIT1; // P1.0, P1.1 ADC option select
29     ADC10DTC1 = N_Samples; // Enable data transfer controller up to N conversions
30     //-----
31     // Digital outputs configurations -----
32     P1DIR |= BIT2 + BIT3 + BIT4 + BIT5; // P1.2 (laser 1), P1.3 (peltier 1), P1.4 (peltier 0), P1.5 (laser 0) set as output
33     P1OUT &= ~BIT5; // Turn off laser 0
34     P1OUT &= ~BIT2; // Turn off laser 1
35     P1OUT |= BIT4; // Turn on peltier 0
36     P1OUT |= BIT3; // Turn on peltier 1
37     //-----
38     // Set the initial state -----
39     for(i=0; i<N_Samples; i++)
40     {
41         ASamples[i] = 0;
42     }
43     //-----
44     // Control Program -----

```

Figura B.5: Programa del microcontrolador del dispositivo parte 1.

```

44 // Control Program -----
45 while(1)
46 {
47     while(ADC10CTL1 & BUSY); // Waiting if the storing of data does haven't end
48     ADC10SA = (unsigned int)ASamples; // Transfer data from the block of the DTC |(unsigned int)&(ASamples);
49     //-----
50     // Average calculation -----
51     for(i=0; i<N_Channels; i++)
52     {
53         Average[i] = 0;
54         Max_Dif[i] = 0;
55     }
56     for(i=0; i<SamPerChnl; i++)
57     {
58         Average[0] += ASamples[i];
59         Average[1] += ASamples[i+SamPerChnl];
60     }
61     Average[0] = (unsigned int)(Average[0]/SamPerChnl);
62     Average[1] = (unsigned int)(Average[1]/SamPerChnl);
63     //-----
64     // Maximum difference calculation -----
65     for(i=0; i<SamPerChnl-1; i++)
66     {
67         Aux[0] = (unsigned int)(ASamples[i]-ASamples[i+1]);
68         Aux[1] = (unsigned int)(ASamples[i+SamPerChnl]-ASamples[i+SamPerChnl+1]);
69         if(Aux[0] > Max_Dif[0])
70         {
71             Max_Dif[0] = Aux[0];
72         }
73         if(Aux[1] > Max_Dif[1])
74         {
75             Max_Dif[1] = Aux[1];
76         }
77     }
78     //-----
79     // Setting the outputs -----
80     if(Max_Dif[0] < Tol_Dif) // Look if the temperature sensor 0 is connected
81     {
82         if(Average[0] >= 238) // Equal or more than 35 °C
83         {
84             P1OUT &= ~BIT5; // Turn off laser 0
85             P1OUT |= BIT4; // Turn on peltier 0
86         }
87         else if(Average[0] > 191 && Average[0] < 238) // More tan 28 °C and less than 35 °C

```

Figura B.6: Programa del microcontrolador del dispositivo parte 2.

```

87         else if(Average[0] > 191 && Average[0] < 238) // More tan 28 °C and less than 35 °C
88         {
89             P1OUT |= BIT5; // Turn on laser 0
90             P1OUT |= BIT4; // Turn on peltier 0
91         }
92         else if(Average[0] < 150) // Less than 22 °C
93         {
94             P1OUT |= BIT5; // Turn on laser 0
95             P1OUT &= ~BIT4; // Turn off peltier 0
96         }
97     }
98     else
99     {
100         P1OUT &= ~BIT5; // Turn off laser 0
101         P1OUT &= ~BIT4; // Turn off peltier 0
102     }
103     if(Max_Dif[1] < Tol_Dif) // Look if the temperature sensor 1 is connected
104     {
105         if(Average[1] >= 238) // Equal or more than 35 °C
106         {
107             P1OUT &= ~BIT2; // Turn off laser 1
108             P1OUT |= BIT3; // Turn on peltier 1
109         }
110         else if(Average[1] > 191 && Average[1] < 238) // More tan 28 °C and less than 35 °C
111         {
112             P1OUT |= BIT2; // Turn on laser 1
113             P1OUT |= BIT3; // Turn on peltier 1
114         }
115         else if(Average[1] < 150) // Less than 22 °C
116         {
117             P1OUT |= BIT2; // Turn on laser 1
118             P1OUT &= ~BIT3; // Turn off peltier 1
119         }
120     }
121     else
122     {
123         P1OUT &= ~BIT2; // Turn off laser 1
124         P1OUT &= ~BIT3; // Turn off peltier 1
125     }
126     //-----
127     // Get samples from temperature sensor -----
128     ADC10CTL0 |= ENC + ADC10SC; // Sampling and conversion ready
129     __bis_SR_register(CPUOFF + GIE); // Enter LPM, Enable interrupts
130     __no_operation(); // For debugger
131 }
132 //-----

```

Figura B.7: Programa del microcontrolador del dispositivo parte 3.

```

132 //-----
133 }
134 //-----
135 // Interrupt ADC10 structure -----
136 #if defined(__TI_COMPILER_VERSION__) || defined(__IAR_SYSTEMS_ICC__)
137     #pragma vector = ADC10_VECTOR
138     __interrupt void ADC10_ISR (void)
139 #elif defined(__GNUC__)
140     void __attribute__((interrupt(ADC10_VECTOR))) ADC10_ISR (void)
141 #else
142     #error Compiler not supported!
143 #endif
144 {
145     ADC10CTL0 &= ~ENC;           // Stop the ADC conversions
146     __bic_SR_register_on_exit(CPUOFF); // Exit of LPM
147 }
148 //-----

```

Figura B.8: Programa del microcontrolador del dispositivo parte 4.

Tabla B.1: Componentes electrónicos necesarios para la construcción del circuito de potencia y control.

| Componente | Modelo | Fabricante | Uds. |
|------------------------------|----------------|-------------------------|------|
| Microcontrolador | MSP430F2012TPW | Texas Instruments | 1 |
| Celda peltier | TEC1-07103T125 | Genérico | 2 |
| Regulador de voltaje DC-DC | TPS564201DDCR | Texas Instruments | 2 |
| Regulador de voltaje DC-DC | BD9C401EFJ-E2 | ROHM Semiconductors | 2 |
| MOSFET | IRF530 | International Rectifier | 2 |
| Bobina 3.3 μH | AIUR-03-3R3K | ABR | 2 |
| Bobina 4.7 μH | AIUR-03-4R7K | ABR | 2 |
| Regulador de voltaje 3.3 V | LD1117V33 | ST Microelectronics | 1 |
| Sensor de temperatura | LM35DZ | Texas Instrument | 2 |
| Amplificador operacional | TLC271CP | Texas Instruments | 2 |
| Resistencia 68 Ω | RC-68E/1/2 | Genérico | 10 |
| Resistencia 10 $k\Omega$ | RC-10K/1/2 | Genérico | 10 |
| Resistencia 12 $k\Omega$ | RC-12K/1/2 | Genérico | 10 |
| Resistencia 18 $k\Omega$ | RC-18K/1/2 | Genérico | 10 |
| Trimpot 1 $k\Omega$ | 3296W-1-102 | Suntan | 10 |
| Trimpot 5 $k\Omega$ | 3296W-1-502 | Suntan | 10 |
| Trimpot 100 $k\Omega$ | 3296W-1-104 | Suntan | 10 |
| Capacitor 0.1 μF | CC-.1/50V | Weller | 10 |
| Capacitor 4.7 μF | CE-4.7/16V | TEAPO | 2 |
| Capacitor 10 μF | CE-10/25V | TEAPO | 7 |
| Capacitor 22 μF | CE-22/25V | TEAPO | 8 |
| Capacitor 100 μF | CE-100/25V | TEAPO | 1 |
| Bornera | N/A | Genérico | 5 |
| Disipador de calor TO220 | N/A | Genérico | 3 |
| Ventilador 12 V | N/A | Genérico | 2 |
| Disipador de calor TO220 | N/A | Genérico | 3 |
| Disipador de calor Raspberry | N/A | Genérico | 4 |
| Header macho | N/A | Genérico | 5 |
| Header hembra | N/A | Genérico | 5 |

Piezas y planos para la construcción del prototipo

Todos los planos fueron diseñados con la plataforma CAD Solid Works. La superficie parabólica del reflector debe llevar un metalizado al vacío con aluminio.

Tabla C.1: Materiales y métodos utilizados para la construcción de las diferentes piezas del prototipo.

| Nombre de la pieza | Material | Método de fabricación | uds. |
|-------------------------------------|----------|-----------------------|------|
| Disipador de láser | Aluminio | Maquinado a 3 ejes | 2 |
| Sujetador de láser | Aluminio | Maquinado a 3 ejes | 2 |
| Disipador de fósforo | Aluminio | Maquinado a 3 ejes | 2 |
| Sujetador de fósforo | Aluminio | Maquinado a 3 ejes | 2 |
| Reflector | Acetal | Maquinado a 3 ejes | 2 |
| Base aislante de láser | Acetal | Maquinado a 3 ejes | 2 |
| Montura para reflector | PLA | Impresión 3D | 2 |
| Montura para láseres | PLA | Impresión 3D | 1 |
| Estructura inferior del encapsulado | PLA | Impresión 3D | 1 |
| Tapa superior del encapsulado | PLA | Impresión 3D | 1 |
| Tapa posterior del encapsulado | PLA | Impresión 3D | 1 |

Tabla C.2: Listado de los tornillos necesarios para la sujeción de las piezas del prototipo.

| Medida métrica | Área involucrada | Uds. |
|----------------|-----------------------------------|------|
| M3 | Disipadores de fósforos | 2 |
| M4 | Sujeción de las piezas en general | 40 |
| M5 | Parte inferior del encapsulado | 4 |

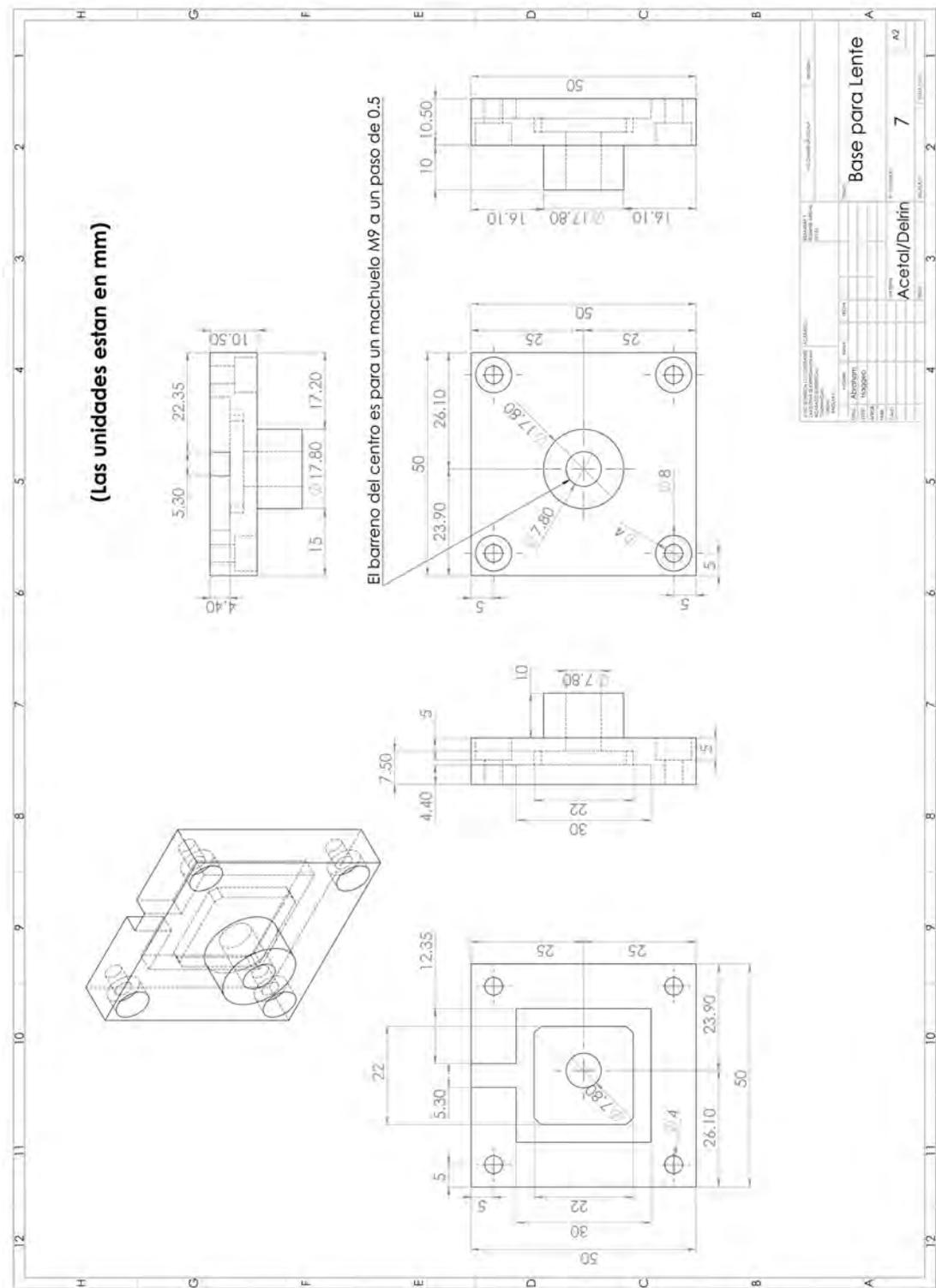


Figura C.1: Plano de construcción para la base en donde se monta la lente de enfoque del láser.

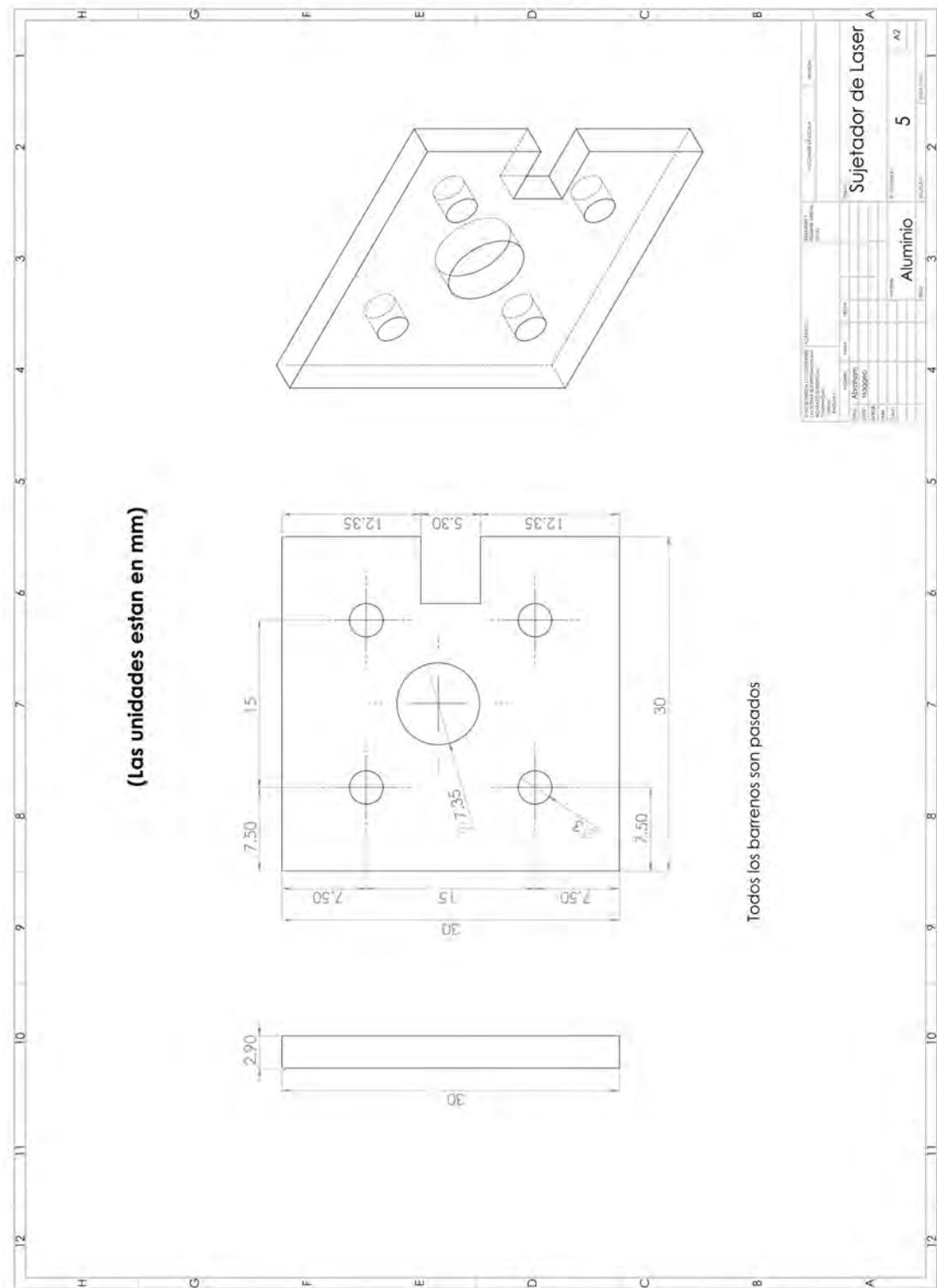


Figura C.2: Plano de construcción para la placa que sujeta el láser a su base.

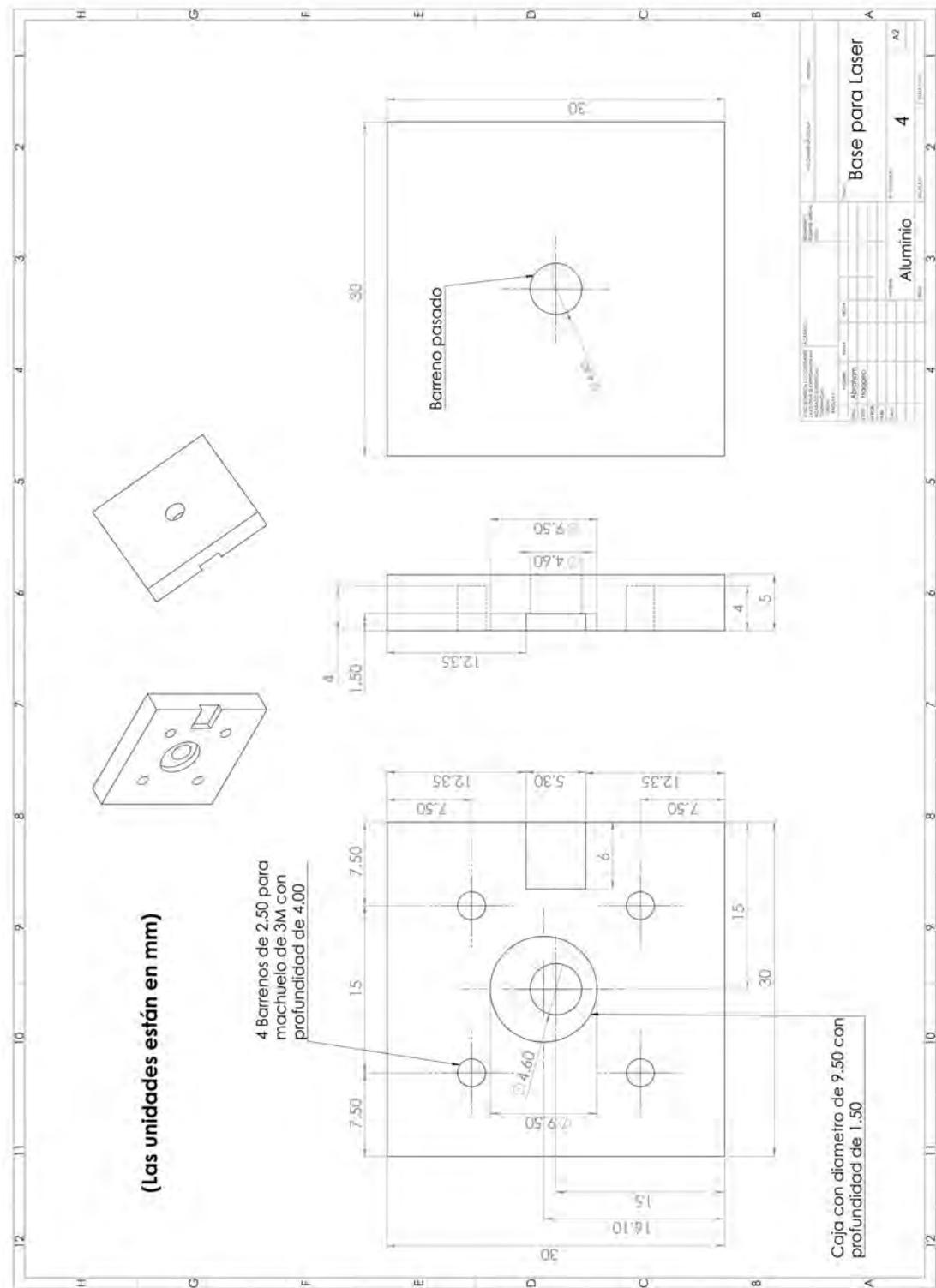


Figura C.3: Plano de construcción para la base del láser.

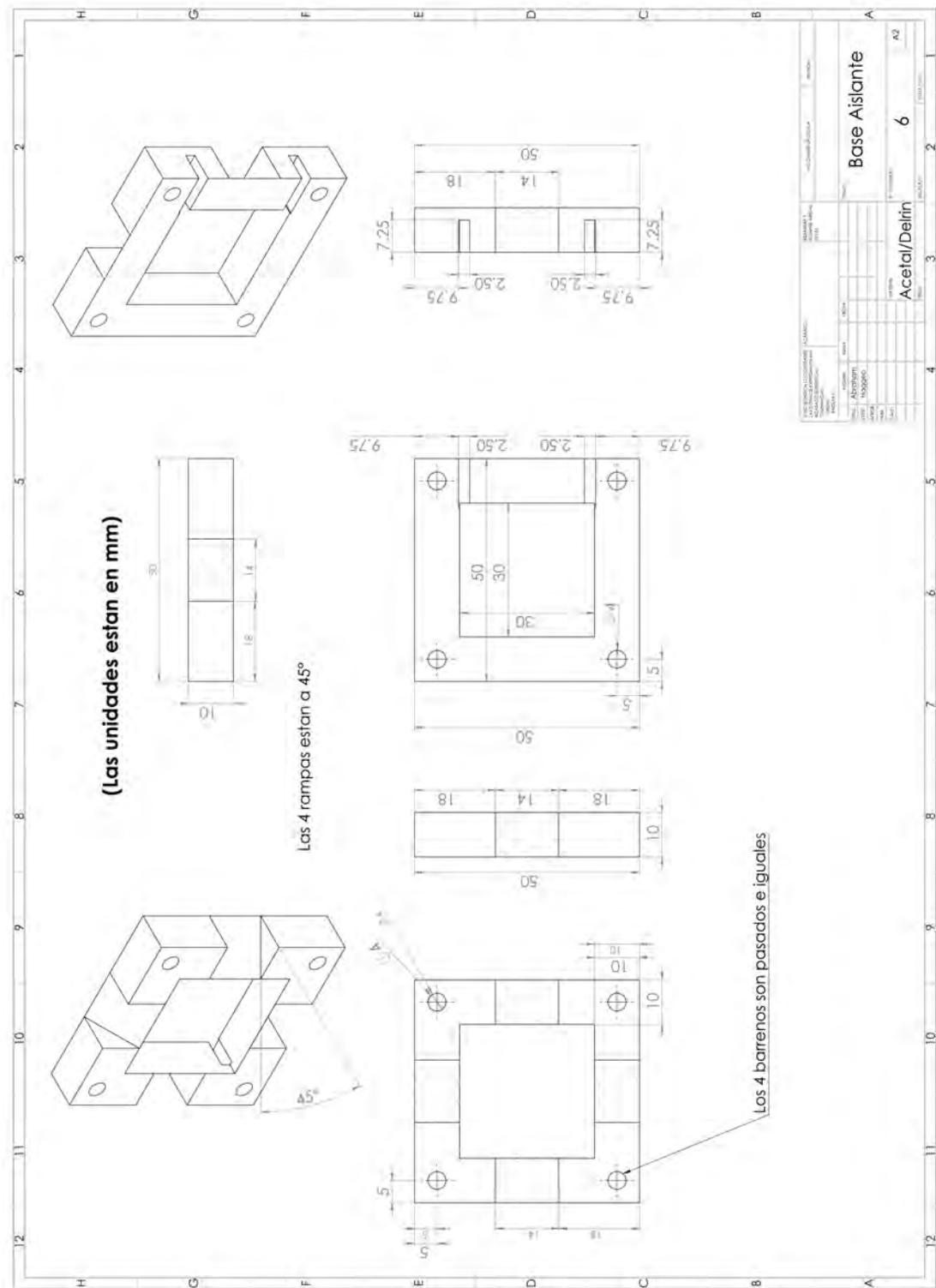


Figura C.4: Plano de construcción para la pieza que aísla la zona del láser con el exterior.

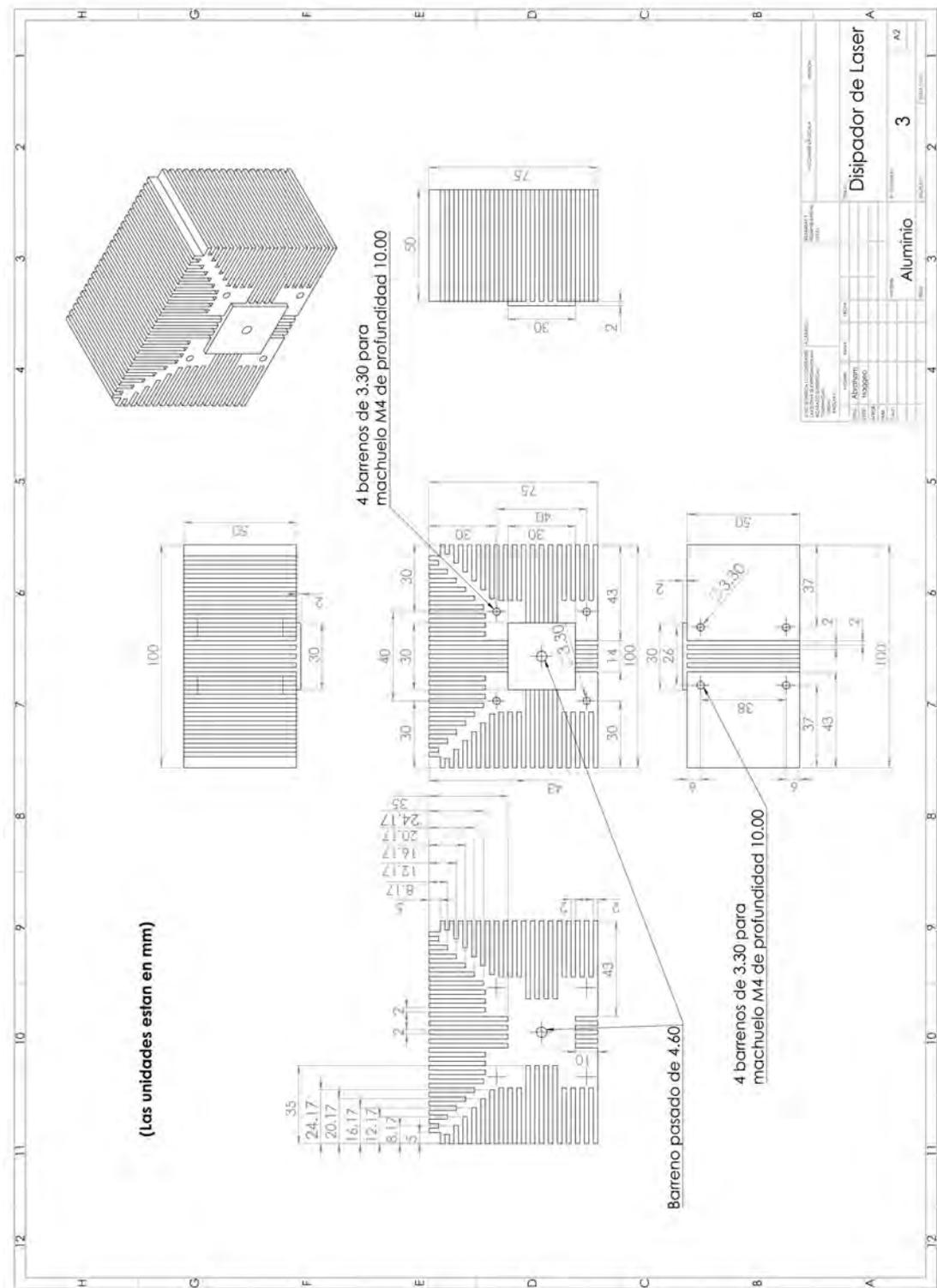


Figura C.5: Plano de construcción para el disipador del láser.

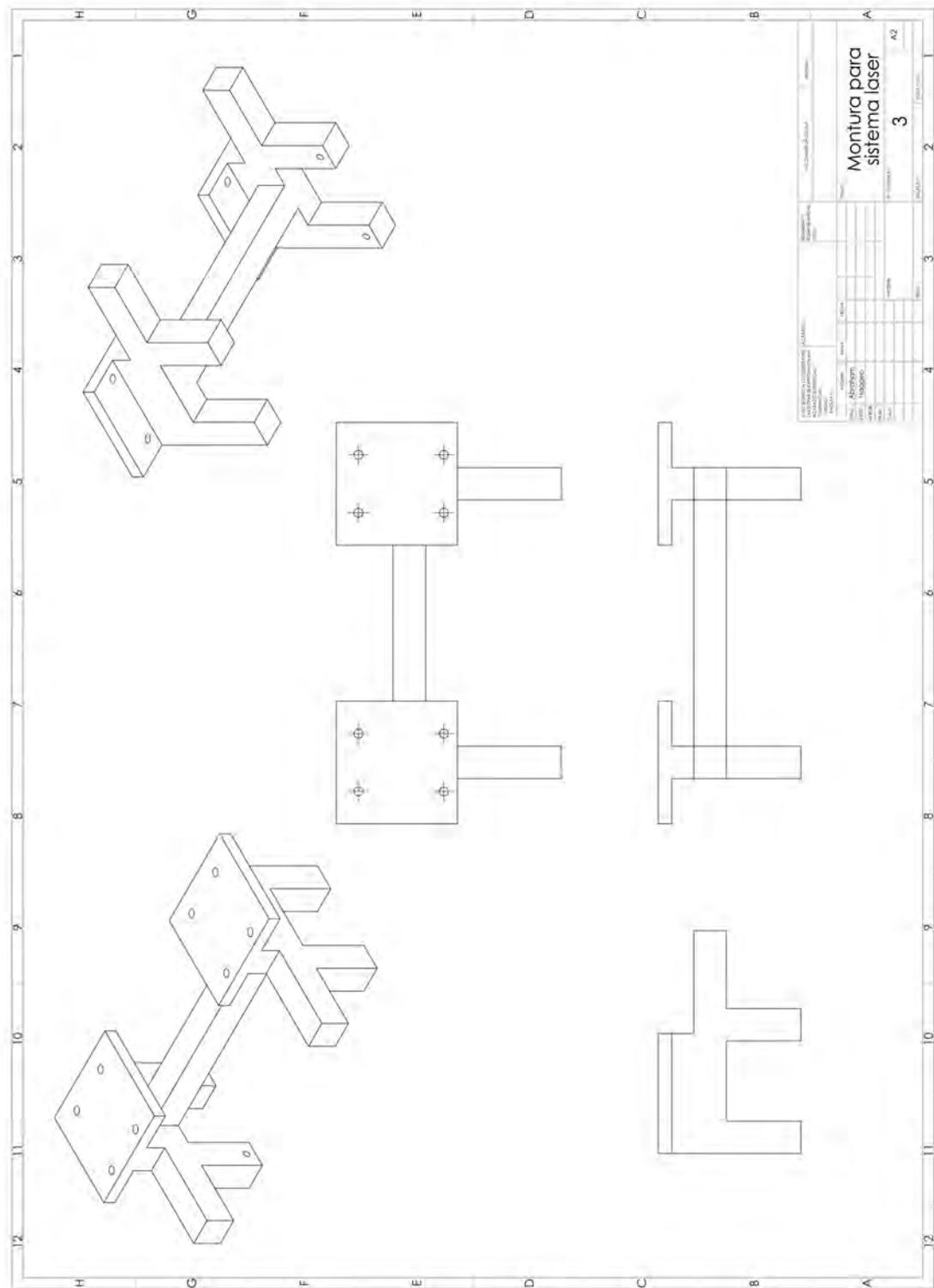


Figura C.6: Plano ilustrativo del diseño de la montura para el sistema de láseres.

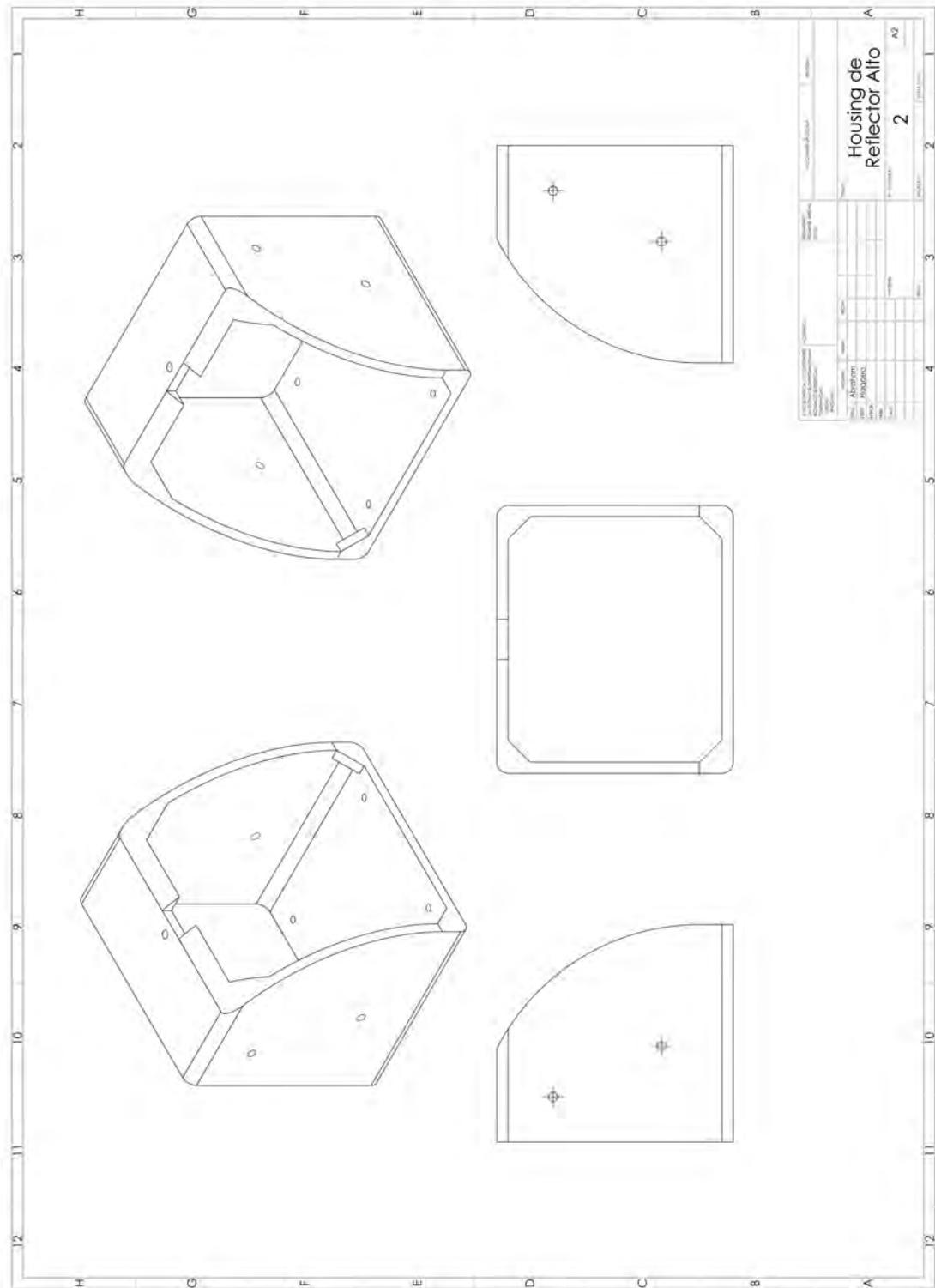


Figura C.7: Plano ilustrativo del diseño de la cubierta del reflector.

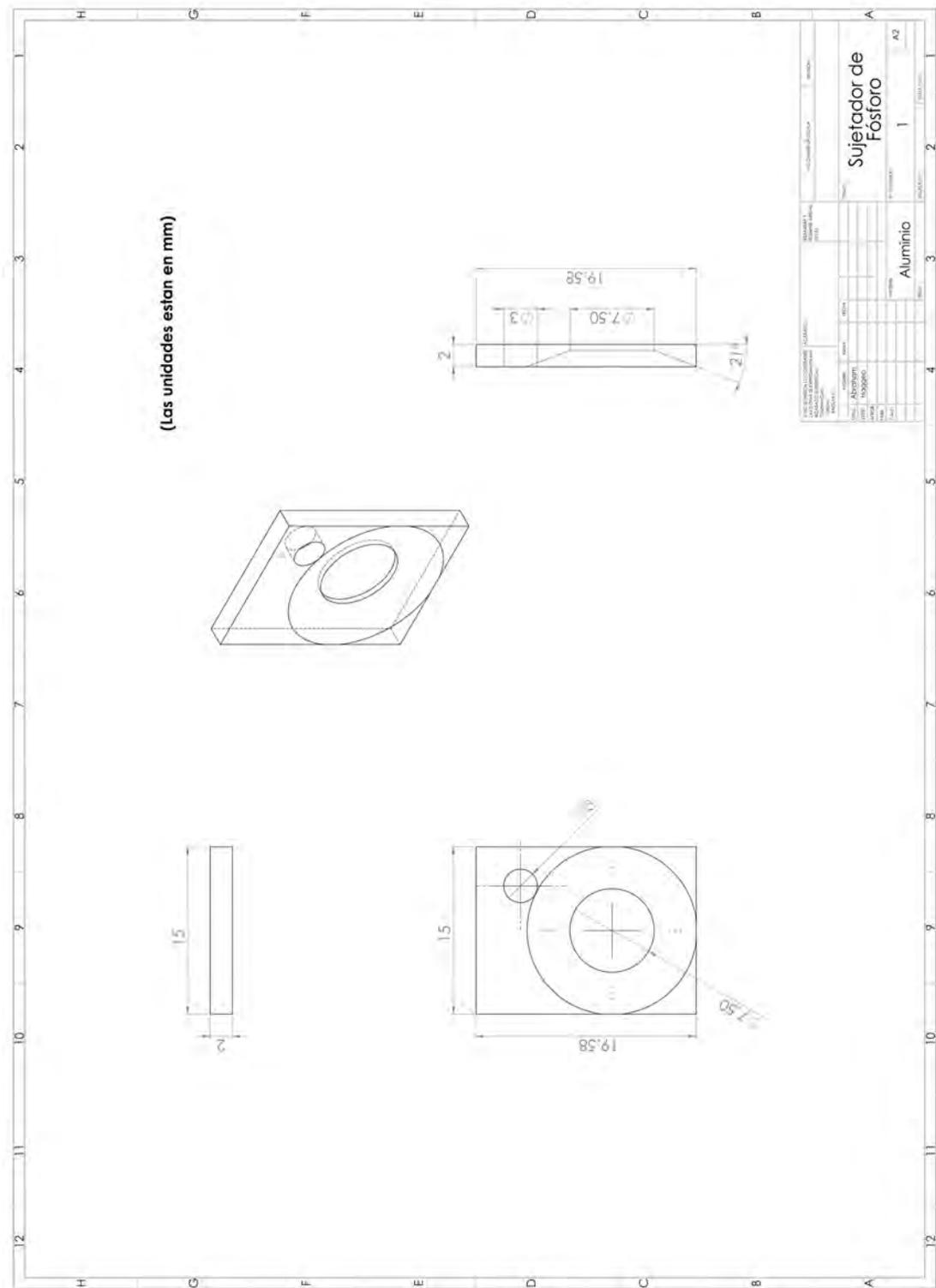


Figura C.10: Plano de construcción para de la placa que sujeta la pastilla de fósforo.

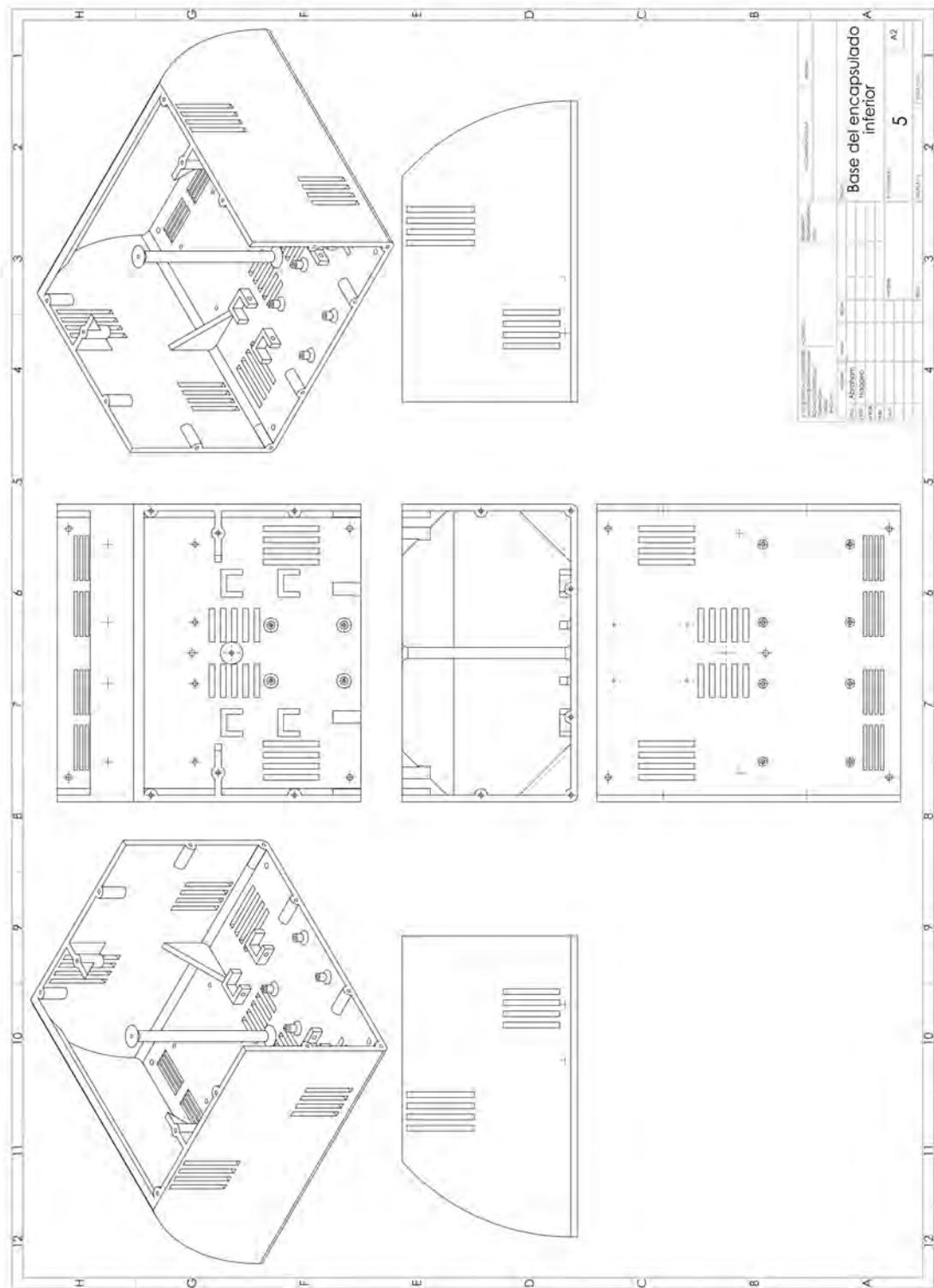


Figura C.11: Plano ilustrativo del diseño de la parte inferior del encapsulado general.

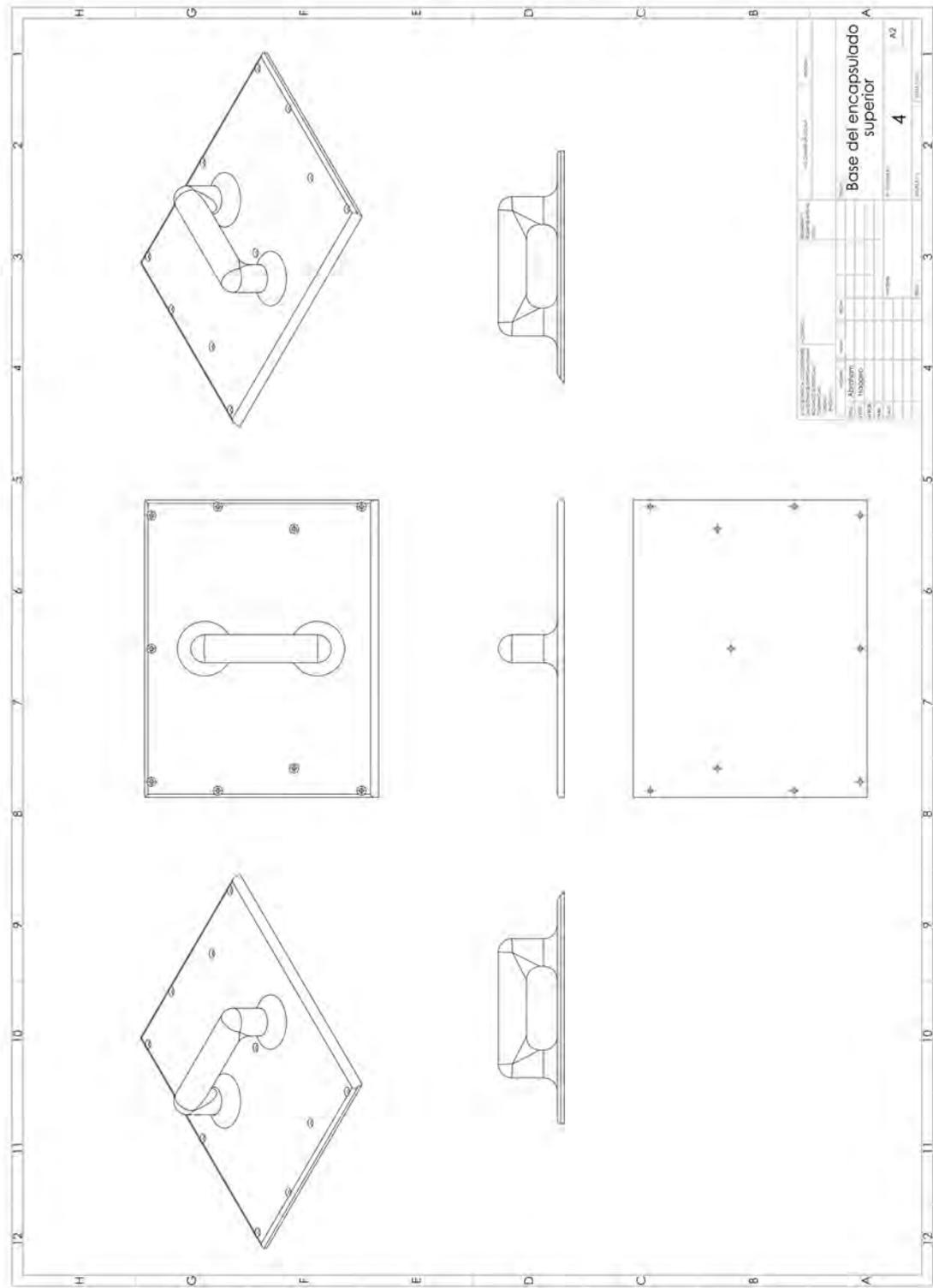


Figura C.12: Plano ilustrativo del diseño de la parte superior del encapsulado general.

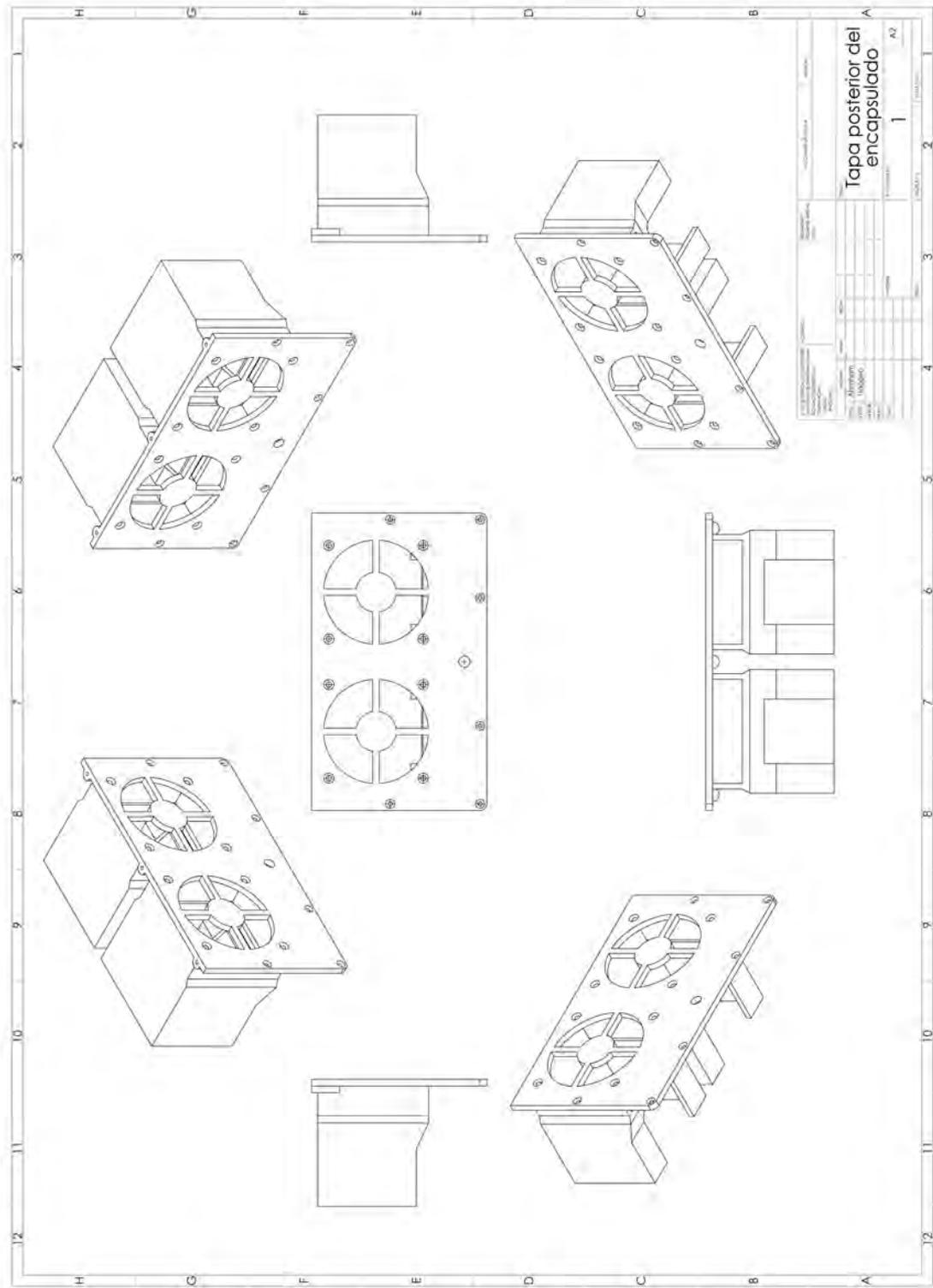


Figura C.13: Plano ilustrativo del diseño de la parte posterior del encapsulado general.

Cálculo del coeficiente de convección para una placa vertical

Existe un modelo aproximado para calcular el coeficiente de convección de una placa paralela h_q (Eq. D.3 cuando es flujo laminar y $10^{-1} < Ra_L < 10^9$) [87]. El modelo utiliza el número de Rayleigh caracterizado por longitud (Eq. D.2) y el de Prandtl (Eq. D.1); dichos números quedan definidos por las características del fluido que esta en contacto con la placa paralela. En la Tabla D.1 se pueden consultar todas las propiedades del aire que se consideraron para el cálculo.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (D.1)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta\theta_b Pr L^3}{\nu^2} \quad (D.2)$$

$$h_q = \frac{k}{L} \left(0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{(1 + (0.492/Pr)^{9/16})^{4/9}} \right) \quad (D.3)$$

Donde:

g es la aceleración de la gravedad de 9.81 m/s^2 .

L es la longitud característica, en otras palabras, la longitud vertical de la placa que es de $15 \times 10^{-3} \text{ m}$.

β es el coeficiente de expansión térmica.

θ_b es la diferencia de temperatura del sólido y el fluido en contacto, en este caso es de 60 K considerando una temperatura máxima del disipador en 394 K y la temperatura ambiente de 334 .

ν es la viscosidad cinemática del aire.

μ es la viscosidad dinámica del aire.

C_p es el calor específico del aire.

k es el coeficiente de transferencia de calor del aire.

Tabla D.1: Características del aire consideradas para el cálculo del coeficiente de convección natural del disipador de la pastilla.

| Variable | Valor | Condiciones | Referencia |
|----------|----------------------------------|--------------|------------|
| β | $3.02 \times 10^{-3} K^{-1}$ | 1 atm 60 °C | [88] |
| ν | $1.79 \times 10^{-5} m^2/s$ | 1 atm 50 °C | [89] |
| μ | $1.95 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ | 1 atm 50 °C | [89] |
| C_p | 1010 J/kg * K | 1 atm 100 °C | [89] |
| k | $2.554^{-2} W/m \cdot K$ | 1 atm 60 °C | [90] |

Referencias

- [1] S. Li, D. Tang, Z. Tian, X. Liu, T. Takeda, N. Hirosaki, F. Xu, Z. Huang, and R.-J. Xie, “New insights into the microstructure of translucent $\text{CaAlSiN}_3\text{:Eu}^{2+}$ phosphor ceramics for solid-state laser lighting,” *Journal of Materials Chemistry C*, no. 5, pp. 1024–1051, 2017. [1](#)
- [2] J. J. Wierer, J. Y. Tsao, and D. S. Sizov, “Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting,” *Laser Photonics Reviews*, vol. 7, no. 6, pp. 963–993, 2013. [1](#), [13](#)
- [3] L.-Y. Chen, W.-C. Cheng, C.-C. Tsai, J.-K. Chang, Y.-C. Huang, J.-C. Huang, and W.-H. Cheng, “Novel broadband glass phosphors for high CRI WLEDs,” *Optics Express*, vol. 22, May 2014. [1](#), [10](#)
- [4] J. H. Delgado, “Optimización de la extracción de fotones en fósforos remotos para luminarias LED de alta potencia,” maestría en ciencias (óptica), Centro de Investigaciones en Óptica A. C., Leon, Guanajuato, México., Diciembre 2017. [2](#), [19](#)
- [5] P. Zheng, S. Li, L. Wang, T.-L. Zhou, S. You, T. Takeda, N. Hirosaki, and R.-J. Xie, “Unique color converter architecture enabling phosphor-in-glass (PiG) films suitable for high-power and high-luminance laser-driven white lighting,” *Applied Materials & Interfaces*, pp. 14930–14940, April 2018. [3](#), [15](#)
- [6] Q.-Q. Zhu, X. Xu, L. Wang, Z.-F. Tian, Y.-Z. Xu, N. Hirosaki, and R.-J. Xie, “A robust red-emitting phosphor-in-glass (PiG) for use in white lighting sources pumped by blue laser diodes,” *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 193–198, January 2017. [3](#), [15](#)
- [7] S. Li, Q. Zhu, L. Wang, D. Tang, Y. Cho, X. Liu, N. Hirosaki, T. Nishimura, T. Sekiguchi, Z. Huang, and R.-J. Xie, “ $\text{CaAlSiN}_3\text{:Eu}^{2+}$ translucent ceramic: a promising robust and efficient red color converter for solid state laser displays and lighting,” *Journal of Materials Chemistry C*, pp. 8197–8205, August 2016. [3](#)
- [8] LEDinside, “La guerra comercial entre China y EE. UU. continúa, el mercado de LED para automóviles de China cambia en 2019.” <https://www.ledinside.com.tw/news/20190103-35827.html>, January 2019. [3](#)

-
- [9] F. Flores, “Crece industria automotriz en Guanajuato.” <https://www.somosindustria.com/articulo/crece-industria-automotriz-en-guanajuato/>, December 2015. 3
- [10] Ó. Reyes, “El boom de la industria automotriz cambió para siempre a Guanajuato.” <https://www.elsoldemexico.com.mx/mexico/sociedad/el-boom-de-la-industria-automotriz-cambio-para-siempre-a-guanajuato-686196.html>, Enero 2018. 3
- [11] D. Chitnis, N. T. Kalyani, H. C. Swart, and S. J. Dhoble, “Escalating opportunities in the field of lighting,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 727–748, June 2016. 5
- [12] J. Cho, J. H. Park, J. K. Kim, and E. F. Schubert, “White light-emitting diodes: History, progress, and future,” *Laser & Photonics Reviews*, vol. 11, no. 2, 2017. 5, 7
- [13] M. Ashby, T. Davies, and S. Gorsse, “The CES EduPack DB for bulk functional materials,” *GRANTA Teaching Sources*, 2015. 6
- [14] Y. Li, Y. Yang, H. Zheng, F. Yu, Q. Liang, H. Yang, X. Yi, J. Wang, and J. Li, “Review of high power phosphor-converted light-emitting diodes,” *China International Forum on Solid State Lighting*, no. 16, pp. 111–115, 2019. 6
- [15] A. David, N. G. Young, C. Lund, and M. D. Craven, “Thermal droop in high-quality InGaN LEDs,” *Applied Physics Letters*, vol. 115, November 2019. 8
- [16] C. D. Santi, M. Meneghini, M. L. Grassa, N. Trivellin, B. Galler, R. Zeisel, B. Hahn, M. Goano, S. Dominici, M. Mandurrino, F. Bertazzi, G. Meneghesso, and E. Zanoni, “Thermal droop in InGaN-based LEDs: physical origin and dependence on material properties,” *Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XX*, vol. 9768, 2016. 8
- [17] S. Lin, T. mo Shih, W. Yan, Y. Lu, Y. Lin, R. R.-G. Chang, and Z. Chen, “Maximum limits on external quantum efficiencies in bare LEDs,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 4, pp. 1597–1601, 2017. 8
- [18] J. Piprek *Optical and Quantum Electronics*, vol. 51, November 2019. 8, 13
- [19] D. Feezell and S. Nakamura, “Invention, development, and status of the blue light-emitting diode, the enabler of solid-state lighting,” *Comptes Rendus Physique*, vol. 19, no. 3, pp. 113–133, 2018. 7
- [20] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: Jhon Wiley & Sons, Inc, 1st ed., 1991. 8
- [21] J. Piprek, “Energy efficiency analysis of gan-based blue light emitters,” *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 9, no. 1, p. 015008, 2019. 8
- [22] Y.-C. Lin, M. Karlsson, and M. Bettinelli, “Inorganic phosphor materials for lighting,” *Topics in Current Chemistry*, vol. 374, no. 2, 2016. 9, 17
-

-
- [23] C. C. Lin and R.-S. Liu, “Advances in phosphors for light-emitting diodes,” *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 2, pp. 1268–1277, 2011. [9](#)
- [24] Z. Fang, R. Cao, F. Zhang, Z. Ma, G. Dong, and J. Qiu, “Efficient spectral conversion from visible to near-infrared in transparent glass ceramics containing Ce³⁺-Yb³⁺ codoped Y₃Al₅O₁₂ nanocrystals,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 2, no. 12, pp. 2204–2211, 2014. [11](#)
- [25] M. Gong, X. Liang, Y. Wang, H. Xu, L. Zhang, and W. Xiang, “Novel synthesis and optical characterization of phosphor-converted WLED employing Ce:YAG-doped glass,” *Alloys and Compounds*, vol. 664, pp. 125–132, 2016. [10](#)
- [26] R. Zhang, H. Lin, Y. Yu, D. Chen, J. Xu, and Y. Wang, “A new-generation color converter for high-power white LED: transparent Ce³⁺:YAG phosphor-in-glass,” *Laser & Photonics Reviews*, vol. 8, no. 1, pp. 158–164, 2014. [10](#)
- [27] Y. K. Lee, J. S. Lee, J. Heo, W. B. Im, and W. J. Chung, “Phosphor in glasses with Pb-free silicate glass powders as robust color-converting materials for white LED applications,” *Optics Letters*, vol. 37, no. 15, pp. 3276–3278, 2012. [10](#)
- [28] H. Segawa, S. Ogata, N. Hirosaki, S. Inoue, T. Shimizu, M. Tansho, S. Ohki, and K. Deguchi, “Fabrication of glasses of dispersed yellow oxynitride phosphor for white light-emitting diodes,” *Optical Materials*, vol. 33, pp. 170–175, 2010. [10](#)
- [29] L.-Y. Chen, W.-C. Cheng, C.-C. Tsai, Y.-C. Huang, Y.-S. Lin, and W.-H. Cheng, “High-performance glass phosphor for white-light-emitting diodes via reduction of Si-Ce³⁺:YAG inter-diffusion,” *Optical Materials Express*, vol. 4, December 2013. [10](#)
- [30] D. Chen, W. Xiang, X. Liang, J. Zhong, H. Yu, M. Ding, H. Lu, and Z. Ji, “Advances in transparent glass-ceramic phosphors for white light-emitting diodes - a review,” *ScienceDirect*, vol. 35, pp. 859–869, 2015. [11](#), [12](#)
- [31] H. Ji, L. Wang, Y. Cho, N. Hirosaki, M. S. Molokeev, Z. Xia, Z. Huang, and R.-J. Xie, “New Y₂BaAl₄SiO₁₂:Ce³⁺ yellow microcrystal-glass powder phosphor with high thermal emission stability,” *Journal of Materials Chemistry C*, pp. 9872–9878, September 2016. [12](#), [18](#), [19](#)
- [32] S. Tanabe, S. Fujita, S. Yoshihara, A. Sakamoto, and S. Yamamoto, “YAG glass-ceramic phosphor for white LED (II): Luminescence characteristics,” *Fifth International Conference on Solid State Lighting*, 2005. [12](#)
- [33] M. Raukas, J. Kelso, Y. Zheng, K. Bergenek, D. Eisert, A. Linkov, and F. Jermann, “Ceramic phosphors for light conversion in LEDs,” *Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 2, pp. 3168–3176, December 2012. [12](#), [14](#), [15](#)
- [34] S. K. Hussain and J. S. Yu, “Broad red-emission of Sr₃Y₂Ge₃O₁₂:Eu²⁺ garnet phosphors under blue excitation for warm WLED applications,” *RSC Advances*, pp. 13281–13288, February 2017. [12](#)
-

-
- [35] P. Sun, P. Hu, Y. Liu, S. Liu, R. Dong, J. Jiang, and H. Jiang, "Broadband emissions from Lu₂Mg₂Al₂Si₂O₁₂:Ce³⁺ plate ceramic phosphors enable a high color-rendering index for laser-driven lighting," *Journal of Materials Chemistry C*, December 2019. [12](#), [15](#)
- [36] Q. Yao, P. Hu, P. Sun, M. Liu, R. Dong, K. Chao, Y. Liu, J. Jiang, and H. Jiang, "YAG:Ce³⁺ transparent ceramic phosphors brighten the next-generation laser-driven lighting," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 19, p. 1907888, 2020. [12](#), [54](#)
- [37] S. Li, Q. Zhu, D. Tang, X. Liu, G. Ouyang, L. Cao, N. Hirosaki, T. Nishimura, Z. Huang, and R.-J. Xie, "Al₂O₃-YAG:Ce composite phosphor ceramic: a thermally robust and efficient color converter for solid state laser lighting," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 4, pp. 8648–8654, August 2016. [12](#), [15](#), [54](#)
- [38] Y. H. Song, E. K. Ji, B. W. Jeong, M. K. Jung, E. Y. Kim, C. W. Lee, and D. H. Yoon, "Design of laser-driven high-efficiency Al₂O₃/YAG:Ce³⁺ ceramic converter for automotive lighting: Fabrication, luminous emittance, and tunable color space," *Dyes and Pigments*, vol. 139, pp. 688–692, 2017. [12](#), [15](#)
- [39] J. Xua, Y. Yang, Z. Guo, D. D. Corell, B. Du, B. Liu, H. Ji, C. Dam-Hansen, and O. B. Jensen, "Comparative study of Al₂O₃-YAG:Ce composite ceramic and single crystal YAG:Ce phosphors for high-power laser lighting," *Ceramics International*, vol. 46, pp. 17923–17928, April 2020. [12](#), [15](#), [54](#)
- [40] C. J. Cozzan, S. Denbaars, and R. Seshadri, "Ce:YAG/Al₂O₃ composites for laser-excited solid-state white lighting." International application published under the patent cooperation treaty (PCT), February 2018. [12](#), [16](#)
- [41] S. Nakamura, "First laser diodes fabricated from III-V nitride based materials," *Materials Science & Engineering*, vol. B43, pp. 258–264, 1997. [12](#)
- [42] L. M. Osorio, L. V. P. Cabrera, and E. Posada, *Descubriendo la materia mediante luz láser. La espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) como método para determinar la composición elemental de la materia*. EAE LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co., January 2012. [13](#)
- [43] J. Piprek, "What limits the efficiency of high-power InGaN/GaN lasers?," *Journal of Quantum Electronics*, vol. 53, no. 1, pp. 1–4, 2017. [13](#)
- [44] M.-H. Kim, M. F. Schubert, Q. Dai, J. K. Kim, and E. F. Schubert, "Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 91, no. 183507, 2007. [14](#)
- [45] M. Murayama, Y. Nakayama, K. Yamazaki, Y. Hoshina, H. Watanabe, N. Fuutagawa, H. Kawanishi, T. Uemura, and H. Narui, "Watt-class green (530 nm) and blue (465 nm) laser diodes," *Physica Status Solidi*, vol. 215, no. 10, p. 1700513, 2017. [14](#)
- [46] J. Piprek, "Comparative efficiency analysis of GaN-based light-emitting diodes and laser diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 109, no. 2, p. 021104, 2016. [14](#)
-

-
- [47] S. Feng, H. Qin, G. Wu, H. Jiang, J. Zhao, Y. Liu, Z. Luo, J. Qiao, and J. Jiang, "Spectrum regulation of YAG:Ce transparent ceramics with Pr, Cr doping for white light emitting diodes application," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 37, no. 10, pp. 3403–3409, 2017. [15](#)
- [48] N. Wei, T. Lu, F. Li, W. Zhang, and B. Ma, "Transparent Ce:Y₃Al₅O₁₂ ceramic phosphors for white light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 061902, 2012. [15](#)
- [49] S. V. Nizhankovskiy, A. V. Tan'ko, Y. N. Savvin, S. I. Krivonogov, A. T. Budnikov, and A. V. Voloshin, "Single crystalline YAG:Ce phosphor for powerful solid-state sources of white light. the influence of production conditions on luminescence properties and lighting characteristics," *Optics and Spectroscopy*, vol. 120, no. 6, pp. 915–921, 2016. [15](#)
- [50] M. Cantore, N. Pfaff, R. M. Farrell, J. S. Speck, S. Nakamura, and S. P. DenBaars, "High luminous flux from single crystal phosphor-converted laser-based white lighting system," *Optics Express*, vol. 24, January 2016. [15](#), [54](#)
- [51] S. Nishiura¹, S. Tanabe¹, K. Fujioka², Y. Fujimoto, and M. Nakatsuka, "Preparation and optical properties of transparent Ce:YAG ceramics for high power white LED," *IOP Materials Science and Engineering*, no. 1, 2009. [15](#)
- [52] J. Y. Park, W. C. Lee, J. W. Chung, and H. K. Yang, "Phosphor-in-glass (PiG) plates for blue laser diode driven white-light emission," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 155922, 2020. [15](#)
- [53] Y. Yuan, D. Wang, B. Zhou, S. Feng, M. Sun, S. Zhang, W. Gao, Y. Bi, and H. Qin, "High luminous fluorescence generation using Ce:YAG transparent ceramic excited by blue laser diode," *Optical Materials Express*, vol. 8, no. 9, pp. 2760–2767, 2018. [15](#)
- [54] S. B. Kwon, B. Y. Kim, I. S. Jang, S. W. Jeon, W. H. Kim, J. P. Kim, M. K. Jung, B. W. Jeong, B. K. Kang, D. H. Yoon, and Y. H. Song, "Fabrication and luminous properties of phosphor ceramic for application in automotive laser headlight," *Current Applied Physics*, April 2020. [15](#), [16](#), [54](#)
- [55] Y. Peng, Y. Mou, Q. Sun, H. Cheng, M. Chen, and X. Luo, "Facile fabrication of heat-conducting phosphor-in-glass with dual-sapphire plates for laser-driven white lighting," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 790, pp. 744–749, 2019. [15](#), [54](#)
- [56] R. Wei, L. Wang, P. Zheng, H. Zeng, G. Pan, H. Zhang, P. Liang, T. Zhou, and R. Xie, "On the luminance saturation of phosphor-in-glass (PiG) films for blue-laser-T driven white lighting: Effects of the phosphor content and the film thickness," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, pp. 1909–1917, 2019. [15](#)
- [57] Y. Yang, S. Zhuang, and B. Kai, "High brightness laser-driven white emitter for etendue-limited applications," *Applied Optics*, vol. 56, pp. 8321–8325, October 2017. [15](#), [54](#)
-

-
- [58] X. Zhang, S. Si, J. Yu, Z. Wang, R. Zhang, B. Lei, Y. Liu, J. Zhuang, C. Hu, Y. Cho, R.-J. Xie, H.-W. Zhang, Z. Tian, and J. Wang, “Improving the luminous efficacy and resistance to blue laser irradiation of phosphor-in-glass based solid state laser lighting through employing dual-functional sapphire plate,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 7, pp. 354–361, 2019. [15](#), [54](#)
- [59] J. Xu, A. Thorseth, C. Xu, A. Krasnoshchoka, M. Rosendal, C. Dam-Hansen, B. Du, Y. Gong, and O. B. Jensen, “Investigation of laser-induced luminescence saturation in a single-crystal T YAG:Ce phosphor: Towards unique architecture, high saturation threshold, and high-brightness laser-driven white lighting,” *Journal of Luminescence*, pp. 279–285, April 2019. [15](#)
- [60] Y. Ma, M. Wang, and X. Luo, “A comparative study of reflective and transmissive phosphor-converted laser-based white lighting,” *IEEE Itherm Conference*, no. 17, pp. 773–777, 2018. [15](#)
- [61] C. Basu, M. Meinhardt-Wollweber, and B. Roth, “Lighting with laser diodes,” *Adv. Opt. Techn.*, vol. 4, pp. 313–321, July 2013. [15](#)
- [62] A. F. George, S. Al-waisawy, J. T. Wright, W. M. Jadwisieniczak, and F. Rahman, “Laser-driven phosphor-converted white light source for solid-state illumination,” *Applied Optics*, vol. 55, pp. 1899–1905, March 2016. [16](#)
- [63] K.-W. Tseng, T.-H. Chen, S.-J. Chen, Y.-D. Su, H.-C. Wang, S.-W. Feng, Z. T. Ye, and K.-H. Tu, “Laser headlamp with a tunable light field,” *Energias MDIP*, February 2019. [16](#)
- [64] Y.-P. Chang, J.-K. Chang, H.-A. Chen, S.-H. Chang, C.-N. Liu, P. Han, and W.-H. Cheng, “An advanced laser headlight module employing highly reliable glass phosphor,” *Optics Express*, vol. 27, pp. 1808–1815, February 2019. [16](#)
- [65] A. Neumann, J. J. Wierer, Jr., W. Davis, Y. Ohno, S. R. J. Brueck, and J. Tsao, “Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality,” *Optics Express*, vol. 19, July 2011. [16](#)
- [66] Y. Li, M. Knöchelmann, and R. Lachmayer, “High-resolution headlamps: Innovative functionalities and the potential of using laser diodes as light sources,” 2019. [16](#)
- [67] T. Koji and T. Yoshiyuki, “Light emitting device, vehicle headlamp, illumination device, and laser element.” US Patent 9,816,677, May 2017. [16](#)
- [68] S. Chun-Yao, “Laser vehicle headlight system and detecting method thereof.” US Patent 10,215,625, February 2019. [16](#)
- [69] H. Georg, “Monitoring apparatus for monitoring the operating state of a laser vehicle headlamp.” US Patent 10,569,711, February 2020. [16](#)
- [70] B. Leon, “The NHTSA has finally approved advanced headlight technologies like laser lights for U.S. road use.” <https://www.nydailynews.com/autos/news/nhtsa-advanced-adaptive-laser-headlights-regulations-article-1.4043781>, October 2018. [16](#)
-

-
- [71] Y.-P. Chang, C.-N. Liu, Z. Pei, S.-M. Lee, Y.-K. Lai, P. Han, H.-K. Shih, and W.-H. Cheng, “New scheme of LiDAR-embedded smart laser headlight for autonomous vehicles,” *Optics Express*, vol. 27, no. 20, pp. A1481–A1489, 2019. 16
- [72] Y. H. Song, E. K. Ji, B. W. Jeong, M. K. Jung, E. Y. Kim, and D. H. Yoon, “High power laser-driven ceramic phosphor plate for outstanding efficient white light conversion in application of automotive lighting,” *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, 2016. 16, 54
- [73] M. Upasani, “Synthesis of Y3Al5O12:Eu and Y3Al5O12:Eu,Si phosphors by combustion method: Comparative investigations on the structural and spectral properties,” *Journal of Advanced Ceramics*, vol. 5, pp. 344–355, September 2016. 18
- [74] J. Hojo, *Materials Chemistry of Ceramics*. Fukuoka, Japan: Springer, 1 ed., November 2019. 20
- [75] D.-H. Lee, J.-Y. Joo, and S.-K. Lee1, “Modeling of reflection-type laser-driven white lighting considering phosphor particles and surface topography,” *Optics Express*, vol. 23, July 2015. 22
- [76] K. Ø. Apeland, “Reduction of speckle contrast in HDTV laser projection display,” science in electronics, Norwegian University of Science and Technology, July 2008. 22
- [77] Valeoscope, *Technical handbook Valeo lighting systems from light to advanced vision*. Valeo, 70, Rue Pleyel 93285 Saint Denis CEDEX, France, 2015. 27, 28, 31
- [78] UNECE, “UN vehicle regulations.” <https://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>, October 2017. 27
- [79] NHTSA, “Federal motor vehicle safety standards; lamps, reflective devices, and associated equipment.” <https://www.federalregister.gov/documents/2018/10/12/2018-21853/federal-motor-vehicle-safety-standards-lamps-reflective-devices-and-associated-equipment#h-16>, 2018 12. 29
- [80] SAE, “SAE J1383: Performance requirements for motor vehicle headlamps.” https://www.sae.org/standards/content/j1383_201005/, April 1985. 29, 30
- [81] SAE, “SAE J578: Color specifications for electric signal lighting devices.” https://www.sae.org/standards/content/j578_200612/, June 1995. 31, 63
- [82] F. Fournier, *Freeform reflector design with extended sources*. Doctor of philosophy in creol, M.S. University of Central Florida, Orlando, Florida, 2008. 31, 68
- [83] CONAGUA, “Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvia.” <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>, Enero 2020. 32

-
- [84] Wikipedia, “Parabolic antenna.” https://en.wikipedia.org/wiki/Parabolic_antenna, April 2020. 35
- [85] T. Ghrib, A. L. Al-Otaibi, M. A. Almessiere, A. Ashahri, and I. Masoudi, “Structural, optical and thermal properties of the Ce doped YAG synthesized by solid state reaction method,” *Thermochimica Acta*, vol. 654, pp. 35–39, 2017. 39, 53
- [86] A. Diani, S. Mancin, C. Zilio, and L. Rossetto, “An assessment on air forced convection on extended surfaces: Experimental results and numerical modeling,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 67, pp. 120–134, 2013. 40
- [87] S. W. Churchill and H. H. S. Chu, “Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate,” *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1323–1329, 1975. 97
- [88] E. ToolBox, “Air - density, specific weight and thermal expansion coefficient at varying temperature and constant pressures.” https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html, Revisado el 15/05/2020 2003. 98
- [89] Efundu, “Aire.” https://www.efunda.com/materials/common_mat1/show_gas.cfm?MatlName=Air0C, Revisado el 15/05/2020. 98
- [90] E. ToolBox, “Air - thermal conductivity.” https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-viscosity-conductivity-heat-capacity-d_1509.html, Revisado el 15/05/2020 2009. 98