



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AMPLIFICADOR  
LÁSER PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE  
ENFRIAMIENTO PARA GASES DE  ${}^6\text{Li}$

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

SEBASTIÁN ALEJANDRO MORALES RAMÍREZ

TUTOR

DR JORGE AMIN SEMAN HARUTINIAN



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Resumen

Este trabajo presenta el diseño, construcción y caracterización de un amplificador de potencia para un láser con longitud de onda 670nm, MOPA por sus siglas en inglés. Que nos permitirá mejorar los procesos de enfriamiento láser que tienen lugar en el Laboratorio de Materia Ultrafría en el Instituto de Física de la UNAM.

Siendo uno de los objetivos de esta tesis el diseño de un MOPA, se presentan los modelos para las piezas comerciales y los planos de los diseños para las que se diseñaron a lo largo de esta tesis, facilitando así la reproducción parcial o total de este diseño. El diseño está pensado en torno a un amplificador cónico, TA.

Uno de los principales resultados de esta tesis consiste en realizar una caracterización exhaustiva del funcionamiento del MOPA, después de ser construido. Por lo que se presenta el funcionamiento con distintas condiciones. Por ejemplo, se muestra que puede amplificar la potencia de un láser casi veinte veces, de 20mW a 395mW suministrando una corriente de 900 mA al TA, también se muestra cómo varía la potencia a la salida del MOPA en función de distintas variables como: *potencia de entrada*, *ángulo de polarización*. Se muestra que existe una temperatura ideal de funcionamiento. Y finalmente se estudia el modo que tiene el haz a la salida del MOPA.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>1. Gases cuánticos y láseres</b>	<b>3</b>
1.1. Gases cuánticos . . . . .	4
1.1.1. Gas de Fermi . . . . .	4
1.1.2. Resonancias de Feshbach . . . . .	5
1.1.3. Gas de Bose . . . . .	7
1.2. Láseres . . . . .	9
1.2.1. Láseres de Diodo . . . . .	10
<b>2. Enfriamiento Láser y Confinamiento Atómico</b>	<b>13</b>
2.1. Enfriamiento atómico en el LMU . . . . .	15
2.1.1. Sistema de ultra alto vacío . . . . .	15
2.1.2. Sistemas Láser . . . . .	16
2.1.3. Campos magnéticos . . . . .	17
2.1.4. Enfriamiento Evaporativo . . . . .	18
2.2. Mecanismos de Enfriamiento Láser . . . . .	19
2.2.1. Desacelerador Zeeman . . . . .	19
2.2.1.1. Fuerza de Presión de Radiación . . . . .	20
2.2.2. MOT, confinamiento atómico . . . . .	24
2.2.2.1. Melaza Óptica . . . . .	24
2.2.3. ¿Por qué necesitamos un amplificador de potencia? . . . . .	27
<b>3. Amplificadores de Potencia de Láseres</b>	<b>30</b>
3.1. MOPA . . . . .	30
3.1.1. TA . . . . .	31
3.1.2. Particularidades del TA . . . . .	35
3.1.3. Componentes del MOPA . . . . .	35
<b>4. Diseño</b>	<b>39</b>
4.1. Diseño . . . . .	39
4.1.1. Componentes del TA . . . . .	40
4.1.1.1. Disipador Térmico . . . . .	40
4.1.1.2. Circuito de Protección . . . . .	42
4.1.2. Componentes Ópticos . . . . .	43

4.1.3. Base . . . . .	44
<b>5. Montaje y procedimientos previos</b>	<b>45</b>
5.1. Construcción . . . . .	45
5.2. Ensamblado del MOPA . . . . .	46
5.3. Procedimientos Previos . . . . .	50
5.3.1. Sintonización PID del Peltier . . . . .	50
5.3.2. Pruebas de Temperatura . . . . .	53
5.3.3. Circuito de Protección y montaje del TA . . . . .	55
<b>6. Resultados, caracterización del MOPA</b>	<b>59</b>
6.1. Primer inyección . . . . .	59
6.2. Caracterización del MOPA . . . . .	62
6.2.1. Potencia de salida para distintos valores de corriente en el TA	64
6.2.2. Potencia de salida en función de la potencia de entrada . . . .	65
6.2.3. Potencia de salida en función de la temperatura . . . . .	66
6.2.4. Potencia de salida en función del ángulo de polarización . . .	68
6.2.5. Modo espacial . . . . .	70
6.2.5.1. Modo en función de la potencia de entrada . . . . .	74
6.2.5.2. Modo en función de la distancia . . . . .	75
6.2.5.3. Modo en función del desalineamiento . . . . .	76
6.3. Otros modelos comerciales . . . . .	78
6.3.1. Costo . . . . .	78
6.4. Montaje en el Experimento . . . . .	80
<b>7. Conclusiones</b>	<b>82</b>
7.1. Perspectivas . . . . .	83
<b>A. Planos Piezas</b>	<b>85</b>
<b>B. Programas de Python</b>	<b>96</b>
<b>C. Imágenes del Modo</b>	<b>113</b>
<b>D. DataSheets</b>	<b>121</b>

# Agradecimientos

A quienes se encuentren en esta sección sepan que mi gratitud es mucho más grande de lo que puedo llegar a escribir en unas líneas.

A mis padres, Susana Ramírez y Alejandro Morales, por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida y particularmente por la ayuda que me brindaron para la realización de esta tesis. Los quiero y admiro con todo mi corazón.

A Mams, por ser la mejor hermana y compinche de vida, por acompañarme durante estos meses y estar siempre presente en infinidad de aventuras.

A Jorge Seman por darme toda la confianza de trabajar en el LMU y con un maravilloso grupo de trabajo. Por mostrarme que en realidad me gusta mucho la física experimental. Por la paciencia y las lecciones que me enseñaste, por los regaños y las congratulaciones. Eres un ejemplo de lo que me gustaría llegar a ser.

A Carlos Gardea por el infinito apoyo que me brindaste para realizar esta tesis, por enseñarme de electrónica, diseño, programación y otras muchas cosas. Gracias por las risas y por corregir mis cosas mal hechas.

A Jackson Poveda por los desafíos, por las preguntas y por todas las lecciones de física y de la vida que me impartiste. Por mostrarme que a los chicos de ochos nada puede mal salir y que todo lo que me proponga es posible.

A mis compañeros del laboratorio: Diego Hernández por tu eterna paciencia para enseñarme de física y del experimento, por entender los chistes durante la comida, por siempre tener alguna forma de ayudarme a resolver un problema o alguna duda. Andrés Gutiérrez por transmitirme el conocimiento de los mayores, por ser un gran colega y amigo. Gracias por tu ayuda y gran compañía. Que la Fuerza te acompañe. Eduardo Padilla por la física, las risas, el buen café y las muchas enseñanzas. Ale del Río, por tu compañía y apoyo en la etapa más crucial de esta tesis. Manuel Mendoza por introducirme al laboratorio y enseñarme como trabajar en él. Espero que pronto volvamos a coincidir.

A Asaf Paris por el apoyo directo para poder realizar esta tesis, que de otra manera seguiría inconclusa. Gracias por las enseñanzas de física, por los juegos y por las charlas. A los Rydberg por su compañía y consejos desde el laboratorio vecino.

A Giacomo Roati, nuestro colaborador del LENS, cuyo apoyo fue indispensable para poder realizar esta tesis.

A Rodrigo Arenas por ayudarme en las distintas etapas de esta tesis, por enseñarme a usar el taladro de banco y muchas otras herramientas. Por ayudarme a desarrollar los múltiples proyectos que realice en mi estancia.

A Maira Pérez por apoyarme en todos mis proyectos, incluida esta tesis, y por

ayudarme a darles una solución a los distintos problemas que surgieron durante.

A Viani Morales, Patricio Vargas, Sandy Quinllin, Melanie Bautista, Karen Cuervo y otros compañeros del LMU por el trabajo y experiencias que compartimos.

A José Marquina, por mostrarme que si hay un lugar donde puedo juntar la física con la historia.

A Susy y Alex mis entrenadores, por llevarme a ser el más rápido de Ciencias. Por todo lo que me enseñaron, por acompañarme en los buenos y malos días, por mostrarme un mundo desconocido y por ser grandes mentores a quienes admiro y aprecio enormemente.

A María de Jesús Beltrán, Isauro Rodriguez, Marcos Ley Koo, Fernando Bustamante, Omar Morales, Víctor Ávila, maestros que han sido fundamentales para mi formación académica, quienes me han enseñado a siempre ser mejor y superarme.

A mi familia, mis tías y tíos, mis abuelitas por su gran compañía, apoyo a lo largo de mi vida académica y personal y por la gran confianza que me han dado.

A Richard mi gran amigo matemático, por tu gran amistad y por mostrarme que quizá Oaxaca si es el segundo mejor estado. A Malli, Javier, Duvignau y Erika mis amigos físicos, por los momentos que vivimos en la heroica Facultad de Ciencias. A Rayas mi amigo químico, con quien he crecido por más de diez años y con quien siempre puedo platicar.

A Andrea Rocha por inspirarme, espero seguir viéndote sobre el escenario. Gracias por tu gran amistad, por tu confianza y por tu gran cariño. Espero no haber envejecido tanto mientras escribí esta tesis.

A Javi por su inmensurable ayuda durante la carrera y también a lo largo de esta tesis, algún día sabre programar. A Ans por su amistad invaluable, por escuchar mis historias y ser una increíble amiga. A Sopi y Mariana por acompañarme estos años.

A Kemps, Raúl, Rex, Uri, Chatou y Pimpollo, mis grandes amigos de la pista, con quienes tengo el gusto de compartir mi vida fuera de ella. Les agradezco la compañía, las pláticas, las risas, las fiestas y todo lo demás que no alcance a escribir.

A Edgar Sanchez, por que no hubiera llegado a este momento de no ser por toda tu ayuda durante mi vida universitaria.

A Mau, coordi, por tu amistad, apoyo en la facultad y en la vida, y por siempre confiarme la portería.

A Swiiny por tu valiosa amistad. A Fer por tu amistad y cariño.

A Manuel por motivarme y brindarme auxilio en la última etapa de esta tesis.

Y a todos aquellos que no pudieron estar presentes, que tuvieron que irse antes. Espero se sientan orgullosos de mi.

Agradecemos a los siguientes proyectos de investigación por hacer posible la realización de esta tesis:

**Instituto de Física:**

- PIIIF-8
- PIIIF-9

**DGAPA-UNAM, PAPIIT:**

- IA101716
- IN103818
- IN109021
- IN109619

**CONACYT:**

- Ciencia Básica 255573
- Ciencia Básica 254942
- A1-S-39242

**Laboratorio Nacional:**

- 299057
- 314850
- 315838

**Coordinación de la Investigación Científica UNAM:**

- LANMAC-2019
- LANMAC-2020
- LANMAC-2021

A la compañía *Seman Baker S.A. de C.V.* por la fabricación de muchas de las piezas aquí diseñadas.

A la fundación Alberto y Dolores Andrade por el apoyo económico a lo largo de mi vida académica.

# Introducción

- *Christ, Adrian. What are you trying to do? - Nite Owl*  
- *What we all tried to do after our initial struggle to find our feet. I'm trying to improve the world. Like when I started out. - Ozymandias*

**Watchmen, Alan Moore**

A lo largo de la historia, la física ha crecido en muchas direcciones, creando modelos capaces de describir al mundo que habitamos. Sin embargo, durante la experimentación u observación se han encontrado límites y fenómenos que dichos modelos son incapaces de describir. Por lo que han sido creados nuevos modelos y nuevas teorías capaces de darnos una descripción satisfactoria, mas, estos nuevos modelos vienen acompañados de nuevas preguntas y límites que nuevamente necesitarán solución, tienen lugar las revoluciones científicas [1].

Hubo una época en la que teníamos al universo descrito en su totalidad, el genio de la física, Isaac Newton, había logrado formular una teoría capaz de describir simultáneamente el movimiento de un cuerpo en caída libre y el traslado de los cuerpos errantes en el cielo, pero Mercurio y la radiación de los cuerpos negros le mostraron a la humanidad que no era tiempo de sentirse orgullosa, que había mucho en que trabajar, múltiples revoluciones tuvieron lugar.

En el siglo XX nació una nueva ramificación de la física que comprendía el estudio de la materia y la energía en su nivel más fundamental, estudiando el comportamiento de las partículas a nivel atómico y subatómico, es decir a nivel microscópico, la *física cuántica* [2,3]. Recientemente, se logró acceder a sistemas que nos permiten observar, estudiar e interactuar de primera mano con dicho mundo cuántico, estos sistemas de estudio son los gases ultrafríos. Estos gases cuánticos conllevan un estudio interdisciplinario que abre las puertas a diversos campos de investigación. Entre los que destacan: la física atómica, la materia condensada y las transiciones de fase [4].

Actualmente el Laboratorio de Materia Ultrafría (LMU) en el Instituto de Física de la UNAM en México tiene como propósito la creación de gases cuánticos para poder estudiar las distintas propiedades que poseen a lo largo de los distintos regímenes de interacción. Particularmente el LMU trabaja con el isótopo de litio, que resulta ser una especie fermiónica,  ${}^6\text{Li}$ , razón por la cual se pueden crear gases degenerados de Fermi. Somos capaces de crear una mezcla de dos componentes de spin con interacciones sintonizables lo que nos permite explorar distintos regímenes de interacción y en particular explorar el cruce BEC-BCS, dando origen a la creación de diferentes pares como lo son los pares moleculares en el lado BEC y los pares de Cooper en el lado BCS. En un futuro se busca implementar la especie bosónica  ${}^7\text{Li}$  en el experimento [5].

Para poder crear gases ultrafríos es necesario el uso de modernas e ingeniosas técnicas de enfriamiento y confinamiento atómico [6], que utilizan elementos como láseres y campos magnéticos. Para algunas etapas y técnicas de enfriamiento se requiere una alta potencia en los láseres que oscila las centenas de *miliwatts*, estos originalmente son incapaces de producir luz con dicha potencia alcanzando apenas unas decenas de *miliwatts*. Existen amplificadores de potencia láser capaces de llevar a cabo dicha empresa, mas, su valor comercial es muy alto.

Es por esta razón que el objetivo de esta tesis es el diseño y construcción de un amplificador de potencia de un láser de bajo costo que pueda ser implementado en las técnicas de enfriamiento que se utilizan para la creación de gases cuánticos, este dispositivo es conocido como MOPA por sus siglas en inglés: *master oscillator power amplifier* [7]. Este servirá para aumentar la intensidad de la luz empleada en las técnicas de enfriamiento láser, permitiendo así aumentar tanto la eficiencia del proceso como el número de átomos que componen las muestras.

El orden que sigue la presente tesis es el siguiente:

- Capítulo 1, es una breve introducción a la teoría de los gases cuánticos y los láseres.
- En el capítulo 2 se discuten las técnicas de enfriamiento y confinamiento láser en las cuales será implementando el MOPA.
- Capítulo 3, presenta la teoría detrás de los amplificadores de potencia de láseres, con detalle en la configuración que caracteriza a los MOPAs.
- A lo largo del capítulo 4 se describe el diseño y la construcción del MOPA, además se incluyen los planos de las piezas diseñadas.
- Capítulo 5, se presenta el montaje y los procedimientos previos necesarios para su correcto funcionamiento y caracterización.
- En el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos respecto a la caracterización del MOPA.
- Finalmente el capítulo 7 contiene las conclusiones y las perspectivas del trabajo de esta tesis.
- Apéndices, se presentan los programas escritos para el desarrollo de la presente tesis, los planos de las piezas diseñadas y construidas y finalmente las fotografías tomadas para el estudio del modo de salida del MOPA.

# Capítulo 1

## Gases cuánticos y láseres

*“En una buena causa no hay fracasos”*

**Isaac Asimov**

Todas las partículas conocidas pueden ser clasificadas dentro de dos especies: *bosones* y *fermiones*, los primeros tienen espín entero, en tanto que los segundos tienen espín semi-entero. El principio de exclusión de Pauli establece que es imposible tener a dos fermiones idénticos en el mismo estado cuántico. Esta restricción no existe para los bosones y es posible tener un número arbitrario de bosones idénticos en un mismo estado cuántico.

Esta diferencia tiene como consecuencia que la estadística cuántica de los bosones y fermiones sea radicalmente diferente, dando origen a fenómenos muy diversos, como es el caso de la condensación de Bose-Einstein en sistemas bosónicos, o de los gases degenerados de Fermi en sistemas fermiónicos. Dentro del Laboratorio de Materia Ultrafría se trabaja actualmente con la especie fermiónica de litio  ${}^6\text{Li}$ ; aunque a mediano plazo se busca incorporar la especie bósónica  ${}^7\text{Li}$  y trabajar con ambas.

Para obtener experimentalmente estos fenómenos se llevan a cabo diversos procesos tales como el enfriamiento y confinamiento láser, para realizar estos procesos se utilizan distintos tipos de láseres entre los que destacan los láseres de diodo, como los que se utilizan dentro del laboratorio. Sin embargo, una de las principales desventajas es la baja potencia que tienen a la salida, menor a 40mW, ya que para llevar a cabo eficientemente estos procesos es necesario tener unas centenas de mW. Es por ello que a lo largo de esta tesis se presentará el diseño y construcción de un amplificador de potencia para un láser.

Comenzaremos este capítulo con una breve introducción teórica a los sistemas cuánticos (gases fermiónicos y bosónicos), para después introducir también un poco de teoría respecto a los láseres, que utilizamos para enfriar y trabajar con dichos sistemas, haciendo énfasis en los láseres de diodo.

## 1.1. Gases cuánticos

### 1.1.1. Gas de Fermi

Si consideramos un gas compuesto por  $N$  átomos fermiónicos idénticos que no interactúan entre sí, lo que tenemos es un gas ideal de Fermi que está caracterizado por la estadística de Fermi-Dirac, esta nos describe la probabilidad de encontrar a un átomo del gas en estado  $i$  con energía  $\epsilon_i$ , podemos ver esta estadística en la ecuación (1.1). Aquí  $\beta = 1/k_B T$ , introduce la constante de Boltzmann y la temperatura, en tanto que  $\mu$  es el potencial químico [8–10].

$$f(\epsilon_i) = \frac{1}{e^{\beta(\epsilon_i - \mu)} + 1} \quad (1.1)$$

Cuando la temperatura tiende a cero,  $T \rightarrow 0$ , el potencial químico  $\mu_0 \equiv \mu(T = 0)$  define la energía del sistema y se le conoce como *energía de Fermi*  $E_F$ , que corresponde a la energía asociada al nivel o niveles más energéticos del sistema y fungirá como escala energética del sistema. Si consideramos un potencial armónico, como los que tenemos en el laboratorio, la energía de Fermi se puede expresar en función del número de fermiones  $N$  del sistema en dicho potencial y se ve de la siguiente forma:

$$E_F = \hbar\bar{\omega} (6N)^{\frac{1}{3}} \quad (1.2)$$

A partir de este resultado se pueden calcular otras cantidades relacionadas, que son de gran utilidad para el experimento y la toma de datos de éste. Una de estas cantidades es el vector de onda de Fermi que podemos ver en la ecuación (1.3), cuyo inverso  $\frac{1}{k_F}$  nos sirve como una escala espacial del sistema:

$$k_F = \sqrt{\frac{2mE_F}{\hbar^2}} = 2m\bar{\omega} (6N)^{\frac{1}{3}} \quad (1.3)$$

Otra de estas cantidades, de gran importancia, es la *Temperatura de Fermi*, definida en la ecuación (1.4):

$$T_F = \frac{E_F}{k_F} = \frac{\hbar\bar{\omega} (6N)^{\frac{1}{3}}}{k_F}, \quad (1.4)$$

que nos puede ayudar a definir si el gas con el que trabajamos es degenerado, esto ocurre cuando  $T \ll T_F$ . Podemos definir entonces al *gas degenerado de Fermi*, que tiene lugar cuando disminuimos la temperatura del gas, siendo aproximado en muchas ocasiones como el momento cuando tenemos  $T = 0$ , de tal manera que todos los átomos tienen energía menor a  $E_F$ , y como consecuencia del principio de exclusión de Pauli tendremos a un único átomo por estado cuántico, dando lugar a una gran distribución espacial y a una alta energía cinética. Podemos ver este fenómeno en la Figura (1.1) [8, 11].

El gas degenerado de Fermi es una excelente aproximación para describir sistemas fermiónicos cuya temperatura es mucho menor que la temperatura de Fermi  $T \ll T_F$ , esta aproximación también se puede utilizar en sistemas de fermiones interactuantes como es el caso del gas de electrones en un metal [12].

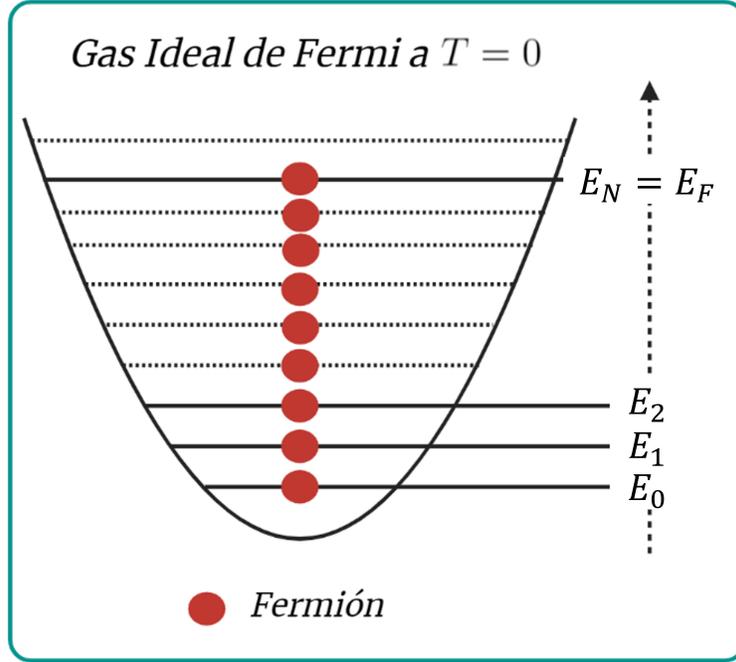


Figura 1.1: Representación gráfica de un gas ideal de Fermi en una trampa armónica a  $T = 0$ .

### 1.1.2. Resonancias de Feshbach

Una de las ventajas más importantes en el estudio de gases atómicos neutros es la posibilidad de sintonizar las interacciones interatómicas por medio de campos magnéticos externos. Ya que esto nos brinda la posibilidad de formar pares atómicos cuyo comportamiento es completamente diferente al gas degenerado de Fermi.

Las *Resonancias de Feshbach* [13] son la herramienta por excelencia que nos permite modificar las interacciones entre los átomos, a temperaturas muy bajas, mediante el control de la longitud de dispersión  $a_s$ , conocida en inglés como *scattering length* [14]. El valor absoluto de  $a_s$  determina la intensidad de la interacción y su signo nos indica si la interacción es repulsiva  $a_s > 0$  ó atractiva  $a_s < 0$ . Para sistemas fermiónicos la intensidad de las interacciones se describe mediante el parámetro adimensional  $(k_F a_s)^{-1}$ , donde  $k_F$  es el vector de onda de Fermi. Para interacciones efectivamente repulsivas tendremos:  $(k_F a_s)^{-1} > 0$ , que nos permitirá asociar moléculas diatómicas compuestas por dos átomos iguales que tendrán un comportamiento bosónico, que se explicará más adelante. Mientras que para interacciones efectivamente atractivas tendremos:  $(k_F a_s)^{-1} < 0$ , donde podremos formar pares de Cooper en un gas que puede ser descrito por la teoría BCS. Estos regímenes de interacción son conocidos como regímenes de interacción molecular y podemos acceder a ellos a través de las resonancias de Feshbach que nos permiten transitar de un régimen al otro, atravesando el cruce BEC-BCS que corresponde a:  $-1 < (k_F a_s)^{-1} < 1$ , aquí el sistema es fuertemente interactuante. En medio de este cruce tenemos un tercer caso que es conocido como el límite unitario que existe cuando  $a_s \rightarrow \pm\infty$  [15].

Pero como hemos dicho, estamos interesados en cambiar el scattering length me-

diante un campo magnético externo, sabemos que cerca de una resonancia de Feshbach tenemos dicha relación está descrita por la siguiente ecuación:

$$a(B) = a_{bg} \left( 1 - \frac{\Delta}{B - B_0} \right), \quad (1.5)$$

en donde  $B_0$  es la posición donde la longitud de resonancia diverge,  $a_{bg}$  es la longitud de dispersión de fondo y  $\Delta$  es el ancho de la resonancia [13].

La importancia de las resonancias de Feshbach recae en que nos permiten la exploración de distintos regímenes de interacción interatómica que podemos estudiar con una misma especie atómica, en nuestro caso en el LMU con  ${}^6\text{Li}$ . Pues si bien, los fermiones son idénticos y por lo tanto no interactúan, somos capaces de crear mezclas de spín y controlar la interacción entre ellas. En el laboratorio producimos con un conjunto de bobinas un campo magnético con el que somos capaces de cambiar el valor de  $a_s$ , como nos describe la ecuación (1.5), y así movernos a través de la resonancia como se puede ver en la Figura (1.2).

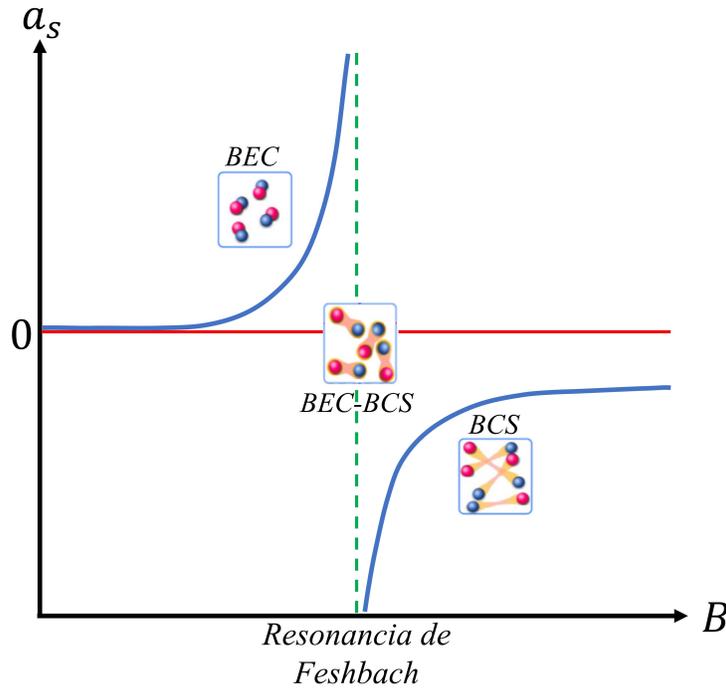


Figura 1.2: Longitud de dispersión  $a_s$  como función del campo magnético. Se muestran los regímenes moleculares alrededor de la resonancia de Feshbach.

Ya que escapa del propósito de esta tesis una explicación teórica completa de estos fenómenos se recomiendan a continuación un conjunto de referencias que contienen desarrollos más extensos y completos de estos temas. El trabajo de A.J. Moerdijk *et al.* [16] da un tratamiento amplio al tema, además de precisar en las especies que utilizamos en el laboratorio,  ${}^6\text{Li}$  y  ${}^7\text{Li}$ . Sobre las resonancias de Feshbach en condensados de Bose-Einstein y otros fenómenos ultrafríos, los trabajos de Ph. Courteille [17] y S.

Inouye [18] abordan la fenomenología. En particular la tesis de maestría de Eduardo Padilla [19] trata en conjunto estos temas. Y finalmente sobre las resonancias de Feshbach los trabajos de Taron [20] y Fraser [21] dan un tratamiento didáctico sobre el tema. Todos estos textos fueron utilizados para la escritura de esta tesis.

Debido a la importancia del Condensado de Bose-Einstein (BEC), y a la posibilidad de crear éste a partir de moléculas de  ${}^6\text{Li}$  a través de las resonancias de Feshbach, se revisará brevemente un poco de la teoría del gas de Bose y la condensación de Bose-Einstein.

### 1.1.3. Gas de Bose

El gas de Bose ideal puede ser descrito con la estadística de Bose-Einstein, ésta se encuentra en la ecuación (1.6) [8, 14].

$$f(\epsilon_i) = \frac{1}{e^{\beta(\epsilon_i - \mu)} - 1}, \quad (1.6)$$

estamos interesados en la cantidad de partículas en el estado base,  $N_0$ , por lo tanto podemos conocer el número máximo de partículas en cualquier otro estado que no sea el base, esto será  $N_T^{max} = N - N_0$ .

$$N - N_0 = \zeta(3) \left( \frac{k_B T}{\hbar \bar{\omega}} \right)^3, \quad (1.7)$$

donde  $\zeta(x)$  es la función zeta de Riemann. Cuando tenemos  $N_T^{max} \rightarrow 0$  significa que la mayoría de las partículas se encuentra en el estado base, esto da lugar a la condensación de Bose-Einstein, este fenómeno acontece a una temperatura crítica dada por:

$$T_c = \frac{\hbar \bar{\omega}}{k_B} \left( \frac{N}{\zeta(3)} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.8)$$

y finalmente podemos reescribir la ecuación (1.7) en términos de esta temperatura para así tener la población en el estado base:

$$\frac{N_0}{N} = 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^3. \quad (1.9)$$

La condensación de Bose-Einstein, BEC por sus siglas en inglés (*Bose-Einstein Condensate*) es uno de los fenómenos de mayor importancia para la física atómica, predicha teóricamente por el físico indio Satyendra Nath Bose y el alemán Albert Einstein entre los años de 1924 y 1925 [22–24], y que fue creado en un laboratorio por primera vez el año de 1995 por los físicos Carl Wiemann y Eric Cornell utilizando una muestra de rubidio, y por Wolfgang Ketterle cuyo grupo produjo un condensado con sodio, estos tres físicos fueron acreedores del premio Nobel de física en 2001 [25, 26]. En 2018 el grupo del LMU dirigido por el Dr. Jorge Amin Seman fue capaz de crear el primer condensado de Bose-Einstein utilizando una especie fermiónica en México [5].

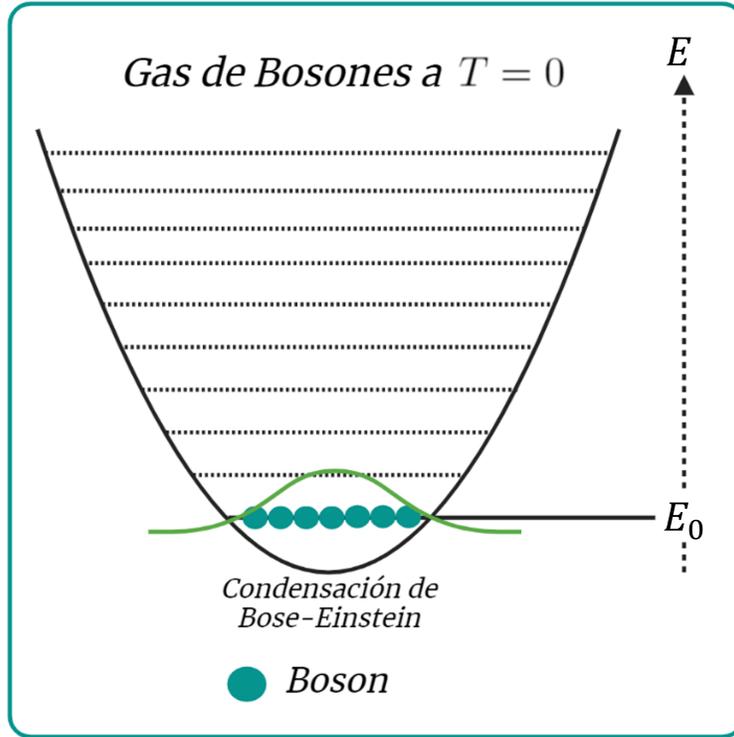


Figura 1.3: Representación gráfica de un gas de bosones en una trampa armónica a  $T = 0$ . Ocurre la Condensación de Bose-Einstein.

La Condensación de Bose-Einstein ocurre cuando la temperatura disminuye de tal forma que el valor del potencial químico  $\mu$  es muy cercano, llegando a ser igual, al valor de la energía del estado base del sistema  $\epsilon_0$ , llegando hasta la temperatura crítica  $T_c$  para la cual tenemos  $\mu = \epsilon_0$ . En esta temperatura tenemos una ocupación macroscópica del estado de mínima energía y entre más baje la temperatura y se acerque a  $T = 0$  mayor será la cantidad de partículas en este estado.

Hasta ahora en el gas ideal no habíamos considerado las interacciones entre partículas, sin embargo éstas juegan un rol de gran importancia en este fenómeno. Para describir las interacciones como hemos visto utilizaremos la longitud de dispersión  $a_s$ . Si definimos a  $n$  como la densidad de las partículas, tenemos el siguiente parámetro  $n|a_s^3|$ , que compara la separación interatómica y el scattering length<sup>1</sup>. Cuando tenemos un gas diluido, la distancia interatómica es mucho más grande que  $a_s$  teniendo entonces la siguiente condición:

$$n|a_s^3| \ll 1. \quad (1.10)$$

Cuando se cumple esta condición las interacciones son débiles y pueden ser descritas por una aproximación de campo medio. De tal forma que si estamos a  $T = 0$  y en el límite  $N \gg 1$  la función de onda que describe al condensado satisface la ecuación de

<sup>1</sup>Es importante señalar el cambio que presentamos respecto a la escala del sistema físico. Anteriormente habíamos utilizado la energía de Fermi, utilizando  $k_F$ , como escala para el sistema fermiónico. Para un sistema bosónico, lo que nos describe mejor la escala del sistema es la densidad.

Gross-Pitaevskii [14, 27, 28]:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{ext}(\vec{r}, t) + g|\psi(\vec{r}, t)|^2 \right) \psi(\vec{r}, t), \quad (1.11)$$

donde  $g = \frac{4\pi\hbar^2 a_s}{m}$  es el parámetro de interacción entre las partículas.

Como mencionamos anteriormente, es posible crear experimentalmente estos sistemas tales como los condensados de Bose-Einstein o los gases degenerados de Fermi. Para ello se emplean sofisticados arreglos experimentales, dentro de los cuales uno de los mecanismos necesarios para enfriar y manipular las muestras atómicas es el enfriamiento láser, que nos permite alcanzar temperaturas del orden de  $\mu\text{K}$ , que por ejemplo en un gas diluido de  ${}^6\text{Li}$ ,  $1.8\mu\text{K}$  equivalen a la temperatura de Fermi.

Por ello a continuación, se presentará una breve introducción teórica a los láseres. Además en el siguiente capítulo se detallará el enfriamiento láser haciendo una revisión teórica de este mecanismo.

## 1.2. Láseres

En 1958, después de desarrollar exitosamente lo que hoy en día se conoce como *máser*, Townes y Schawlow publicaron un artículo en el cual llevaban las ideas detrás del funcionamiento de un máser a frecuencias ópticas. Idearon el concepto de un amplificador óptico dentro de una cavidad resonante con espejos que estimulaban el crecimiento del haz. Tan solo dos años después, Theodore Maiman produjo el primer láser utilizando un cristal de rubí como el amplificador y una lámpara como la fuente de energía.

Láser, es el acrónimo correspondiente a *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa: **amplificación de luz por emisión estimulada de radiación**. Y es un dispositivo que amplifica luz y produce un haz de alta intensidad, cuya propagación es casi unidireccional y que comúnmente tienen una frecuencia, o longitud de onda, pura (o única). Los láseres en general están conformados por tres componentes que sirven para amplificar la luz que usualmente es generada por otro medio, el primero de estos componentes es un amplificador o un medio de ganancia que se encarga de la emisión estimulada, el segundo es el bombeo que es el encargado de suministrar energía al medio de ganancia y finalmente el tercer componente es una configuración óptica que se funge como un resonador encargado de que la luz pase una y otra vez a través del medio de ganancia. Podemos ver un esquema de un láser típico en la Figura (1.4) [29].

El resonador óptico, usualmente está conformado de dos componentes ópticos, uno completamente reflejante y uno con un cierto porcentaje de transmisión por donde se extrae luz que conformará al láser. Debe mantenerse la suficiente reflexión para siempre tener luz resonando. También es de suma importancia que el bombeo siempre provea de energía suficiente para compensar la luz que extraemos y otras pérdidas.

Existen muchos tipos de láser: de gases atómicos [30], de colorantes orgánicos [31], de estado sólido [32], de diodos semiconductores [33], entre otros varios. Las propiedades que tienen son diversas: longitudes de onda desde las microondas hasta

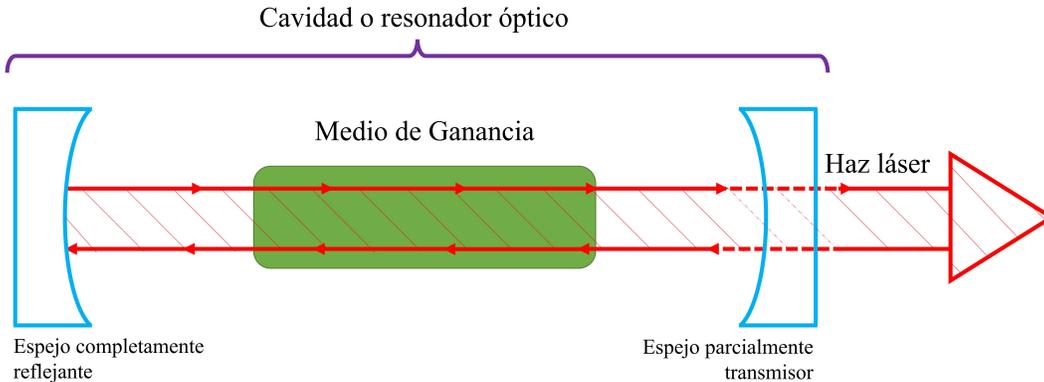


Figura 1.4: Esquema simplificado de un láser típico. Imagen adaptada de la referencia [29].

Rayos-X, potencias de salida desde los  $10^{-9}$ W hasta los  $10^{20}$ W, con frecuencias desde los  $10^{11}$ Hz hasta los  $10^{17}$ Hz. También tienen una diversidad de usos gigantescos, desde fungir como la aguja del fonógrafo en los lectores de CD y DVD, hasta usos médicos como en las operaciones oculares [29].

### 1.2.1. Láseres de Diodo

Particularmente, nos interesa el funcionamiento y las características de los diodos semiconductores láser, ya que son el tipo de láseres que ocupamos en diversos procesos de enfriamiento en el laboratorio y cuya potencia queremos amplificar mediante el MOPA, que se desarrolla a lo largo de esta tesis.

Este tipo de láseres son únicos respecto a otros tipos. Entre sus características destacan que son pequeños, operan con baja potencia a la entrada, son altamente eficientes, su tiempo de vida es largo, se puede modular directamente la radiación emitida, consumen poca energía y el ancho de banda de su espectro de emisión es angosto, entre otras. Sin embargo, cuenta con algunas desventajas tales como una alta sensibilidad a los cambios de temperatura, poca colimación en el haz saliente, se calientan fácilmente por la corriente que pasa en el material del diodo y finalmente una baja potencia a la salida, siendo esta última el principal motivo para la realización de un amplificador de potencia casero que se desarrolla en esta tesis [29, 34].

Por su parte los diodos son componentes electrónicos con dos terminales que únicamente permiten la circulación eléctrica en un sentido. Los semiconductores son elementos que pueden comportarse como conductores o aislantes dependiendo de factores como campos eléctricos o magnéticos, en ellos, los orbitales atómicos se superponen unos a otros de tal suerte que los electrones no se encuentran en niveles discretos como ocurre en un único átomo. Tenemos una estructura de bandas, que se compone de una banda de conducción y una banda de valencia. Separadas por una diferencia energética que llamaremos  $E_g$ . La banda de conducción está llena de electrones, mientras que la banda de valencia tiene tantos "huecos" como electrones tiene la otra banda. Como es una estructura continua, los electrones y los huecos se mueven libremente, por lo que su comportamiento se puede aproximar como un gas de electrones, es decir

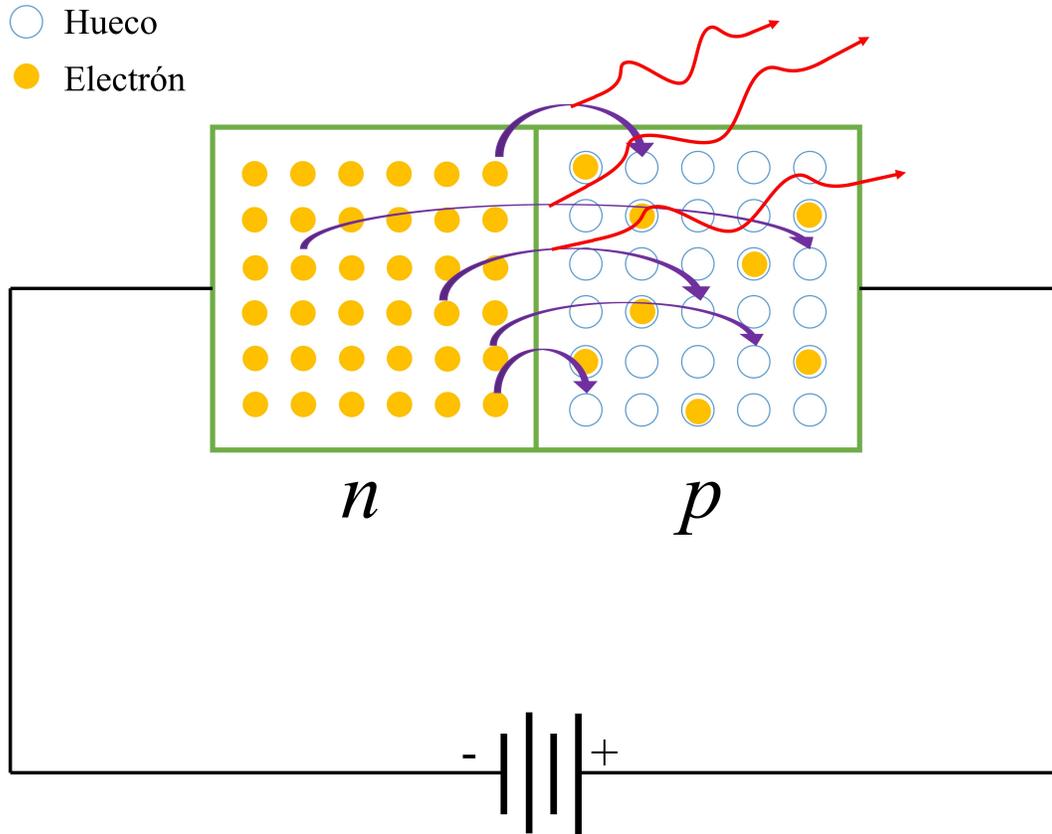


Figura 1.5: Esquema de un diodo láser semiconductor

como un gas de Fermi, utilizando la misma ecuación (1.1) [35].

Cuando añadimos átomos, impurezas, extraños a un semiconductor, se pueden llegar a producir cambios sobresalientes en las propiedades eléctricas del material. A este proceso se le conoce como dopado y da lugar a semiconductores *tipo n* y *tipo p*. Al agregar impurezas pentavalentes, es decir con átomos que cuentan con cinco electrones de valencia, se aportan electrones libres que aumentan la conductividad y se tienen así los *tipo n*. En cambio, al agregar impurezas trivalentes provoca que se crean deficiencias de electrones de valencia, que son a lo que llamamos *huecos* [35,36].

Al juntar ambos materiales, los *tipo p* y *tipo n*, la unión llamada **unión P-N**, se comporta de manera muy distinta a como lo hacen los materiales por si solos. Básicamente, se restringe la circulación de la corriente a una única dirección, que como sabemos un dispositivo con dicha característica es un diodo. Los electrones van del material tipo  $n$  al tipo  $p$ , donde se recombinan con los huecos, atrás dejan átomos cargados positivamente. Mientras que los huecos se difunden en la dirección contraria y se recombinan con los electrones, dejando atrás átomos cargados negativamente. Así, el área en medio de la unión, llamada *región de agotamiento*, pierde sus portadores de carga (huecos o electrones) y se llega a un equilibrio con iones positivos en el lado del material  $n$  e iones negativos en el lado del material  $p$ . Generando así un campo eléctrico, y consecuentemente un potencial. Si añadimos un potencial externo,

la diferencia de potencial en los dos materiales puede cambiarse. De tal manera que el flujo de electrones regresa, al recombinarse un electrón con un hueco, se emite un fotón de energía  $\hbar\omega$ , si dicho fotón se generó por emisión espontánea entonces que será la luz del láser [35, 37].

Finalmente como tenemos distintas diferencias energéticas para distintos materiales que conforman a los semiconductores, la luz emitida tendrá distintas longitudes de onda dependiendo de los materiales que compongan al semiconductor, con lo cual tenemos distintos láseres. Además, con el fin de mantener un único modo espacial, las dimensiones transversales del medio de ganancia deben de ser del orden del largo de la longitud de onda de la luz, tal que esta limitante provoca una baja potencia de salida del láser debido al calentamiento del medio, por ello es necesario la creación de mecanismos externos que nos ayuden a aumentar dicha potencia, para ello el amplificador de potencia que se desarrolla en esta tesis [29, 35, 38].

Hemos terminado entonces con este pequeño repaso teórico de los gases cuánticos y láseres, en el siguiente capítulo se discutirán los mecanismos de enfriamiento y confinamiento que nos permiten la creación de estos gases, haciendo énfasis en el enfriamiento láser.

## Capítulo 2

# Enfriamiento Láser y Confinamiento Atómico

*“The best that most of us can hope to achieve in physics is simply to misunderstand at a deeper level”*

**Wolfgang Pauli**

Uno de los objetivos del LMU es la creación y estudio de gases cuánticos en diversos regímenes de interacción, para poder conseguirlo deben emplearse distintos mecanismos de enfriamiento y confinamiento atómico, que nos permitan producir muestras ultrafrías de  ${}^6\text{Li}$ . Estos mecanismos operan de distintas formas y por lo tanto los resultados alcanzados con cada uno de ellos son distintos, por ello es que se utilizan de acuerdo a una secuencia que nos permite llegar a las temperaturas más bajas con la mayor cantidad de átomos. A continuación se describirán brevemente algunos de estos mecanismos, haciendo énfasis en aquellos en los que el amplificador de potencia de láser que se desarrolla en esta tesis tiene injerencia directa. La descripción será de acuerdo a la secuencia que siguen dentro del experimento.

Mas, antes de dar comienzo con la descripción de estos mecanismos, será necesario dar un pequeño repaso al concepto de temperatura, así como presentar de forma breve el experimento con la finalidad de ubicar con precisión el accionar de los mecanismos dentro de éste.

En el experimento, todo comienza con un gas de  ${}^6\text{Li}$  a una temperatura mayor a  $400^\circ\text{C}$  y terminará con un gas cuántico a una temperatura de tan sólo unos  $nK$ , es importante notar que la definición de temperatura es inadecuada cuando hablamos de enfriamiento de átomos con láseres. En termodinámica la temperatura suele definirse como una propiedad que nos permite saber si un sistema está en equilibrio térmico con otros sistemas, una manera de entender este concepto es ver a la temperatura como una medida de que tan caliente está un objeto, pero eso requiere una escala [39]. La primer definición infiere el contacto térmico entre el sistema y el ambiente que lo contiene, como por ejemplo intercambio de calor.

Sin embargo, cuando enfriamos con láseres no tenemos dicho intercambio de calor y aunado a ello debido a la constante absorción y dispersión de luz el ambiente está continuamente siendo alterado, por ello es que el sistema no está en equilibrio térmico.

Sabemos que la temperatura de una muestra atómica se encuentra relacionada con la energía cinética promedio  $\langle E_k \rangle$  de la siguiente forma [10]:

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} k_B T, \quad (2.1)$$

siendo  $k_B$  la constante de Boltzmann. Pero sabemos por mecánica clásica que la energía cinética está relacionada a la velocidad por la siguiente ecuación:  $E_k = \frac{1}{2} m v^2$ , por esta razón cuando hablamos de enfriar gases cuánticos nos encontramos con procesos de reducción de velocidad, pues a mayor temperatura, mayor velocidad en los átomos.

Pero antes de comenzar con la descripción del experimento y de algunos de los mecanismos que lo conforman, es bueno definir dos valores especiales de temperaturas que son importantes de entender. Es importante conocer el significado de algunas cantidades físicas importantes,  $\Gamma$  es el ancho de línea de la transición de un estado cuántico a otro,  $m$  es la masa del átomo y  $k$  número de onda de la luz láser empleada en los procesos de enfriamiento; algunas de estas se tratarán con más detalle más adelante [6].

- **Temperatura Doppler**, o también conocida como *límite Doppler* por su relación con los valores máximos que pueden alcanzar ciertas técnicas de enfriamiento láser, esta temperatura está directamente asociada con el ancho natural de las transiciones atómicas  $\Gamma$ , de tal forma que la ecuación que describe esta temperatura es la siguiente:

$$k_B T_D = \frac{\hbar \Gamma^2}{2}, \quad (2.2)$$

con una velocidad asociada correspondiente a:  $v_D = \sqrt{k_B T_D / m}$ . Mientras la temperatura Doppler es del orden de  $\mu K$ , la velocidad corresponde a unas decenas de  $cm/s$  [6].

- **Energía de retroceso**, la última temperatura corresponde a la energía asociada al retroceso de un único fotón. Esto se presenta durante el proceso de emisión o absorción de un único fotón ya que los átomos obtienen una velocidad de retroceso de la forma:  $v_r = \frac{\hbar k}{m}$ , el cambio de energía que ocurre se puede asociar a una temperatura:

$$k_B T_r = \frac{\hbar^2 k^2}{m}, \quad (2.3)$$

se le conoce como el límite de retroceso y es de apenas unos cuantos  $\mu K$  [6].

A continuación se presentará una breve descripción del experimento, los distintos mecanismos y procesos de enfriamiento y confinamiento que lo conforman. Así después de ello se detallarán los dos procesos de enfriamiento láser, pues estos están directamente relacionados con esta tesis.

## 2.1. Enfriamiento atómico en el LMU

A continuación describimos de manera breve nuestro sistema experimental así como los procedimientos que se utilizan para producir las muestras superfluidas. Más detalles pueden encontrarse en las referencias [5, 19, 40].

### 2.1.1. Sistema de ultra alto vacío

Hemos de considerar que cuando hayamos conseguido enfriar a los átomos a las temperaturas necesarias, éstos estarán a una temperatura mucho más baja que el ambiente, cualquier interacción con éste los calentaría y sería imposible entonces mantenerlos a esas temperaturas o incluso llegar a ellas. Es por ello que se necesita un sistema de ultra alto vacío que nos garantice que nuestras muestras no estarán en contacto con el ambiente de ninguna forma.

Este sistema está dividido en tres secciones, todas están siendo bombeadas por una bomba iónica/*getter* para mantener el vacío y mejorarlo gradualmente, las secciones son: (i) el horno, (ii) el bombeo diferencial y (iii) el desacelerador de Zeeman junto con la cámara de ciencia.

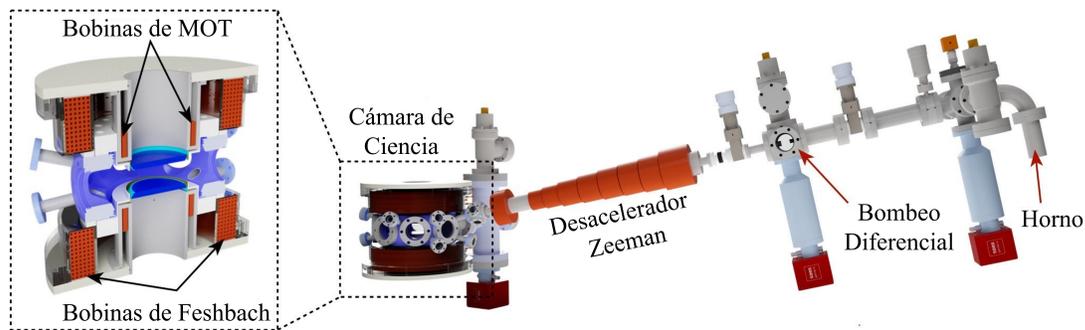


Figura 2.1: Esquema del sistema de Vacío empleado en el laboratorio de Materia Ultrafría, imagen adaptada de la referencia [5].

El horno se encuentra a  $450^{\circ}\text{C}$  y se encarga de calentar 5gr de  ${}^6\text{Li}$  purificado, generando así un vapor cuya presión es de  $1 \times 10^{-4}\text{Torr}$  que al tener una bomba de vacío en esa posición tenemos una presión de  $1 \times 10^{-8}\text{Torr}$ , este vapor pasa a través de un *nozzle* (boquilla) generando así un haz atómico que atravesará el resto del sistema hasta llegar a la cámara de ciencia en donde será enfriado. Debido a que la presión en la cámara de ciencia deber ser del orden de  $10^{-11}\text{Torr}$  (de ahí que sea ultra alto vacío<sup>1</sup>) se implementó el bombeo diferencial que nos permite tener esta gran diferencia de presiones.

Finalmente, el desacelerador Zeeman, del que se hablará más adelante en la sección (2.2.1) es el primer mecanismo de enfriamiento, que consiste en un arreglo de nueve bobinas que generan un campo magnético. Al terminar de atravesarlo el haz

<sup>1</sup>Recordando que la definición de vacío es un espacio lleno de gas cuya presión es menor a la presión atmosférica [41].

atómico llega a la cámara de ciencia, donde ocurren las restantes etapas de enfriamiento, además es donde se encontrará confinada la muestra de litio y donde se llevarán a cabo los experimentos. Cuenta con numerosas ventanas por las cuales entran los distintos haces de los láseres y se toman las imágenes.

### 2.1.2. Sistemas Láser

Las diferentes técnicas de enfriamiento láser que implementamos en el experimento utilizan las transiciones ópticas del  ${}^6\text{Li}$   $D1$  y  $D2$ , que se pueden ver en la Figura (2.2). Se utilizan dos láseres de diodo, cada uno para cada línea, ambos fijados a una referencia atómica proveniente de una celda de espectroscopia.

Particularmente utilizamos la línea  $D2$  para la creación del haz contrapropagante del desacelerador Zeeman, para implementar la trampa magneto óptica que consiste en un arreglo de haces láser contra puestos y un campo magnético capaz de confinar y enfriar los átomos simultáneamente, se hablará de ella en la Sección 2.2.2, y finalmente se utiliza esta línea para la etapa de enfriamiento por melazas ópticas. Por su parte, la línea  $D1$  se utiliza para la etapa de enfriamiento sub-Doppler. El ancho natural de ambas líneas es  $\Gamma = 2\pi \times 5.87$  MHz.

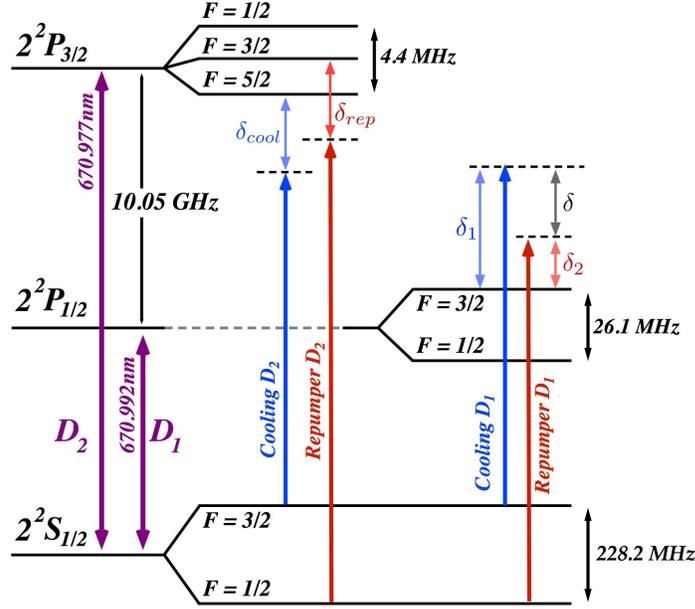
Después de que el haz atómico ha salido del horno, durante su trayecto a través del desacelerador Zeeman se encuentra con un haz láser en dirección opuesta que en conjunto se encargan de la primera etapa de enfriamiento que sentirán los átomos. Este láser lleva consigo dos frecuencias ambas desintonizadas al rojo<sup>2</sup> de las transiciones de enfriamiento y rebombeo de la línea  $D2$ , esto se explicará con mayor detalle en las próximas secciones. Entonces se desaceleran los átomos de velocidades debajo de  $960 \frac{m}{s}$  a tan sólo  $40 \frac{m}{s}$ . Es importante que los átomos bajen a dicha velocidad pues es inferior a la velocidad de captura de la trampa magneto-óptica que se utilizará para confinar y enfriar los átomos en las siguientes etapas, en la Sección 2.2.2 se discute su funcionamiento.

A continuación, con los átomos desacelerados llegando a la cámara de ciencia comienza el proceso de carga de la MOT. Este proceso consiste en atrapar a los átomos utilizando la trampa magneto óptica, dura 8.6s y tenemos  $N = 5 \times 10^9$  átomos a  $T = 7\text{mK}$ . Para conseguir que la muestra se enfríe aún más, dos procesos de enfriamiento láser son llevados a cabo. El primero es un proceso de melaza óptica basado en la línea  $D2$ , con este podemos llegar a la temperatura Doppler (2.2). Comenzamos justo después de cargar la MOT, ya que este proceso requiere la ausencia del campo magnético de la MOT, por lo cual éste se apaga. Se disminuye la intensidad de los haces de la MOT y se mueven las frecuencias del enfriamiento y el rebombeo hacia la resonancia. La temperatura disminuye hasta llegar a  $500\mu\text{K}$  con aproximadamente  $6 \times 10^8$  átomos [6].

Enseguida se aplica la técnica de melaza gris que utiliza la línea  $D1$ , este es un proceso de dos fotones en configuración<sup>3</sup> $\Lambda$  que combina dos procesos: *enfriamiento*

<sup>2</sup>Desintonizado al rojo significa que la frecuencia del láser es menor a la transición atómica. Desintonizado al azul, por el contrario, nos indica que la frecuencia del láser es mayor a la transición atómica. En resonancia significa que la frecuencia del láser es igual a la transición atómica.

<sup>3</sup>La configuración  $\Lambda$  corresponde a una configuración atómica de tres niveles,  $|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle$ , en la


 Figura 2.2: Transiciones D1 y D2 del  $Li^6$ .

*Sísifo* [42] y *Atrapamiento Coherente por Selección de Velocidad*, que es más conocido por su nombre en inglés: **Velocity Selective Coherent Population Trapping (VSCPT)** [43]. Brevemente podemos decir que el esquema  $\Lambda$  crea dos estados coherentes, que llamamos *estado brillante* y *estado oscuro*, el primero interactúa con los campos de luz, generados por los láseres, mientras que el segundo no. Debido a que la probabilidad de transición del estado oscuro al brillante depende del cuadrado del momento de los átomos los más lentos se acumulan en el estado oscuro. De esta manera evitamos que los átomos lentos interactúen con la luz y se calienten, por ello es que decimos que tenemos un proceso de selección mediante velocidad. El mecanismo Sísifo se encarga de mantener a los átomos en los estados brillante y oscuro reduciendo su momento y por lo tanto ayudando a enfriar la muestra. Estos mecanismos se aplican inmediatamente después del enfriamiento de melazas ópticas de la D2. Ambos procesos nos ayudan a enfriar nuestra muestra debajo de la energía de retroceso, que podemos ver en la ecuación 2.3.

Finalmente, al terminar con todo el proceso de enfriamiento láser, el experimento produce una muestra con alrededor de  $4.5 \times 10^8$  y se alcanza una temperatura de  $40\mu K$ .

### 2.1.3. Campos magnéticos

Antes de continuar con el proceso de enfriamiento atómico que nos permite llegar a la degeneración cuántica, vale la pena dar un pequeño resumen sobre los tres campos magnéticos que deben producirse para conseguir estos resultados.

---

cuál el nivel energético más bajo es  $|1\rangle$ , el más energético es  $|2\rangle$  y en medio se encuentra el nivel  $|3\rangle$ . Las transiciones atómicas van del nivel  $|1\rangle$  al  $|2\rangle$  y de ahí al  $|3\rangle$  de ahí el nombre de configuración  $\Lambda$ .

El primero de estos campos magnéticos corresponde al desacelerador Zeeman. Este es una configuración de nueve bobinas que genera un campo magnético inhomogéneo que disminuye su intensidad conforme el haz atómico se propaga, el campo eventualmente invierte de signo en una configuración conocida como *spin flip*. De esto se hablará más adelante en la Sección 2.2.1. La corriente que atraviesa las bobinas es de 2.0A y debido a que las bobinas son diferentes físicamente el campo que producen va de alrededor de 600G a  $-250\text{G}$ .

El segundo campo magnético aparece a continuación con el cuadrupolo magnético, que es empleado para producir la MOT. Para generar este campo se utilizan dos bobinas pequeñas en configuración anti-Helmholtz. De tal forma que el campo que se genera es un gradiente axial que en el centro de la trampa es  $\frac{\partial}{\partial z} B_z(z)|_{z=0} \simeq 28\text{G}/\text{cm}$ .

Finalmente, el último campo magnético es el que corresponde a la resonancia de Feshbach, que como hemos visto es el mecanismo que nos permite manipular las interacciones interatómicas y así acceder a los distintos regímenes de interacción. Utilizaremos la resonancia entre los dos subestados Zeeman del  ${}^6\text{Li}$  de más baja energía. Esta resonancia tiene su centro en 832G. Las bobinas que crean este campo magnético nos permiten valores desde el cero hasta los 1000G, se disponen cerca de configuración de Helmholtz para que se genere una pequeña curvatura en el campo magnético que será de utilidad para las últimas etapas del experimento que se explicarán en la Sección 2.1.4, dicha curvatura en el campo de Feshbach a lo largo de la dirección axial de las bobinas es  $B_z''(0) = 6.2\text{G}/\text{cm}^2$ , el correspondiente gradiente magnético se encuentra cercano al cero.

#### 2.1.4. Enfriamiento Evaporativo

Después del enfriamiento láser se alcanzan temperaturas del orden de las decenas de los microkelvin, por lo que necesitamos de otro mecanismo de enfriamiento que nos permita llegar a las temperaturas necesarias para la degeneración cuántica. Este nuevo proceso es conocido como enfriamiento evaporativo y ocurre dentro de un potencial conservativo que es creado mediante la combinación de una trampa óptica dipolar, conocida como ODT por sus siglas en inglés (*optical dipole trap*) [44] y la curvatura de campo magnético descrita en la sección anterior.

Para crear la ODT enfocamos un haz láser gaussiano infrarrojo producido por un láser de fibra dopada con iterbio que nos da una potencia de 200W y tiene una longitud de onda de  $\lambda = 1070\text{nm}$ . Éste es enfocado en el centro de la muestra y cuando la frecuencia es altamente desintonizada hacia el rojo por lo que los átomos no la absorberán y sólo sentirán una fuerza conservativa de dipolo asociada al campo eléctrico de la luz. Es en este potencial donde es posible realizar la última etapa de enfriamiento que nos permite llegar al régimen degenerado.

Podemos entender al enfriamiento evaporativo fácilmente si imaginamos a los átomos de la muestra teniendo una distribución de velocidades y al potencial como un pozo cuya profundidad es variable. Los átomos se encuentran moviéndose en el potencial, los más energéticos se mueven a mayor velocidad y los menos energéticos por el contrario se mueven a menor velocidad, además podemos pensar que al moverse más lentamente permanecen en lo más profundo del pozo, mientras que los calientes

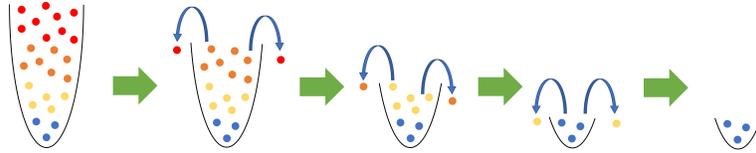


Figura 2.3: Enfriamiento evaporativo, los puntos de color rojo representan los átomos más energéticos mientras que los átomos menos energéticos están representados por los puntos azules. Al disminuir el potencial los átomos más energéticos dejan de estar contenidos por éste, finalmente los únicos átomos que quedan son los menos energéticos.

se mueven por todo el pozo, si nosotros vamos disminuyendo la profundidad del pozo los átomos más calientes comenzarán a escapar pues el pozo ya no será capaz de contenerlos, es decir que si realizamos este proceso exitosamente nos hemos de quedar únicamente con los átomos más fríos. El término “evaporativo” viene de pensar que los átomos más energéticos se evaporan o escapan de la muestra y van quedando los átomos con menos energía. Esto se ilustra ver en la Figura (2.3) [45].

La forma en la que reducimos la altura del pozo es disminuyendo la potencia del láser mediante rampas exponenciales, se llevan a cabo tres de éstas. El proceso de evaporación va de 200W a 35mW, lo que se traduce en una disminución de unas decenas de  $\mu\text{K}$  hasta unos cuantos nK, todo este proceso tiene una duración de 1300ms. Así tras realizar el enfriamiento evaporativo tenemos  $1 \times 10^5$  átomos a  $T \approx 20\text{nK}$ , que por medio de la resonancia de Feshbach podremos asociar en pares que nos permiten producir superfluidos con  $5 \times 10^4$  pares.

En la Figura (2.4) se muestran imágenes adquiridas de las distintas muestras cuánticas degeneradas obtenidas en el laboratorio mediante el proceso de enfriamiento explicado en el presente capítulo, además se muestran sus perfiles de densidad conforme la longitud de dispersión.

## 2.2. Mecanismos de Enfriamiento Láser

Después de este resumen sobre el funcionamiento del experimento del LMU, es momento de profundizar en el tratamiento teórico en algunos de los procesos de enfriamiento láser que se utilizan. Ya que son en estos en los cuales el amplificador de potencia láser, cuyo diseño y desarrollo representa el propósito de esta tesis, tiene injerencia directa.

### 2.2.1. Desacelerador Zeeman

Como hemos presentado el primer proceso de enfriamiento de átomos que salen del horno es el uso de un desacelerador Zeeman, el funcionamiento de este depende del efecto Zeeman y de la fuerza de presión de radiación para reducir la velocidad de los átomos. Se emplea un haz láser en resonancia con los átomos provenientes del horno, que llamaremos el haz del desacelerador Zeeman, para reducir la velocidad de los átomos. Sin embargo, mientras van reduciendo su velocidad los átomos dejan de

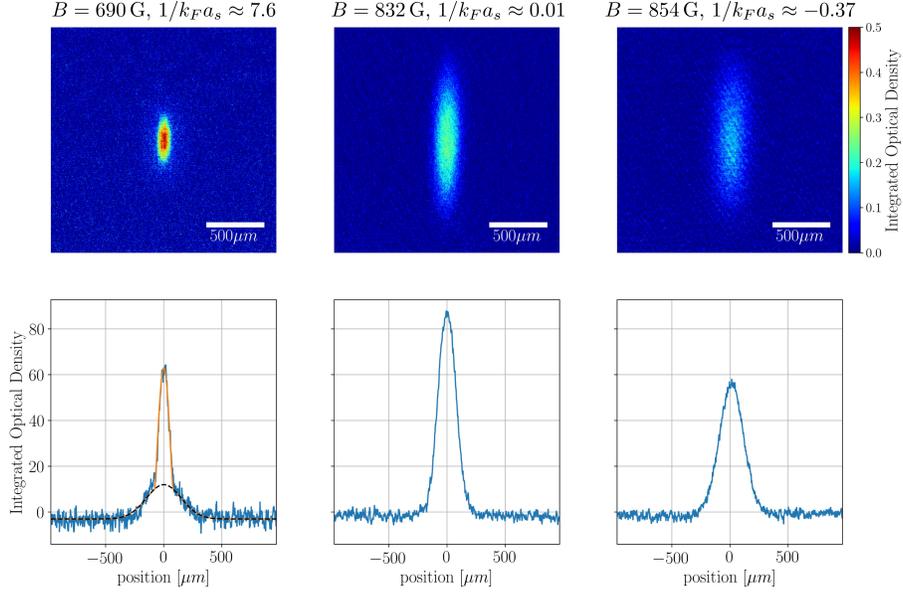


Figura 2.4: Paneles superiores: imágenes tomadas mediante técnica de absorción de muestras cuánticas degeneradas. Paneles inferiores: sus correspondientes perfiles de densidad integrados conforme la longitud de dispersión varía a través del cruce BEC-BCS. De izquierda a derecha tenemos: BEC molecular, gas superfluido en límite unitario y gas ultrafrío en el lado BCS de la resonancia de Feshbach. Imagen tomada de la referencia [5].

estar en resonancia con el haz debido al efecto Doppler, para compensar y mantener a los átomos resonantes en cada posición de su trayecto se emplea un campo magnético inhomogéneo. En esta sección se presentará el funcionamiento teórico de este mecanismo. A continuación se hablará de la fuerza de presión de radiación que es uno de los principios de funcionamiento del desacelerador [6, 46].

### 2.2.1.1. Fuerza de Presión de Radiación

Es importante entender el mecanismo físico de enfriamiento atómico que ocurre gracias a la interacción entre la luz, de los láseres y los átomos de la muestra. Cuando la frecuencia de la luz láser es cercana a la frecuencia de resonancia de alguna transición atómica, ésta puede inducir transiciones electrónicas en los átomos. Particularmente el átomo puede absorber luz que proviene de una misma dirección dando lugar a la fuerza de presión de radiación.

Pensemos en un modelo simple de un átomo con dos niveles, un nivel base y un nivel excitado. Al absorber un fotón el átomo sufre un cambio en su momento lineal y se posiciona en el estado excitado. Después de que ha transcurrido cierto tiempo  $\tau$  (el tiempo de vida del nivel excitado), el electrón decae del estado excitado al estado base y vuelve a ocurrir un cambio en el momento lineal del átomo. Al instante de decaer el átomo emite un fotón cuya dirección de propagación es completamente aleatoria, por eso a este proceso se le conoce como emisión espontánea. Matemáticamente el cambio de momento neto debido a la absorción de un único fotón que tiene momento  $\hbar\vec{k}$  es  $\langle\Delta\vec{p}\rangle = \hbar\vec{k}$ .

Ahora al considerar que incidimos un haz continuo en una única dirección tenemos la repetición cíclica de este proceso. Por lo tanto, incidirán en el átomo una enorme cantidad de fotones provenientes del haz láser, que podemos ver como  $\langle \Delta \vec{p}_{abs} \rangle = N \hbar \vec{k}$ . Sin embargo, la aleatoriedad de la dirección de los fotones al ser emitidos ahora jugará un papel importante, pues como salen en todas direcciones, si sumamos el cambio de momento provocado por cada uno de ellos dicha suma será igual a cero,  $\langle \Delta \vec{p}_{emt} \rangle = 0$ . Finalmente, el átomo será desacelerado en dirección opuesta al haz que lo incide provocando que la muestra se enfríe [46, 47], podemos ver este proceso en la Figura (2.5).

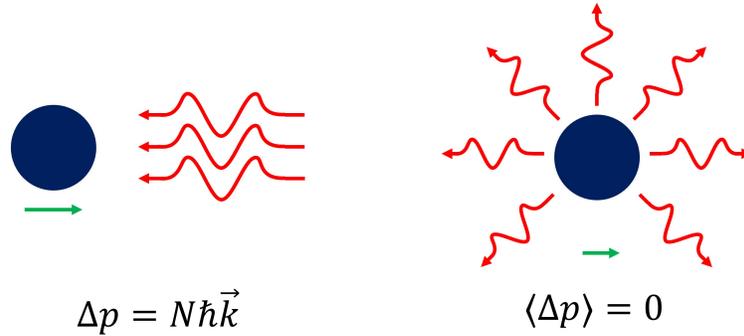


Figura 2.5: Esquema de la fuerza de presión de radiación. Del lado izquierdo tenemos el proceso de absorción donde la luz viene en una única dirección, tal que el cambio de momento es distinto de cero. La emisión espontánea ocurre en direcciones aleatorias por lo que la contribución al momento promediada es igual a cero. Consecuentemente, el átomo comienza a moverse en dirección opuesta y su velocidad, disminuye.

Lo descrito anteriormente funciona en un modelo atómico de dos niveles, pero en un modelo más real el átomo puede decaer a alguna de las componentes hiperfinas del estado base al emitir el fotón, en nuestro caso como podemos ver en la Figura (2.2), tenemos dos, por lo que el átomo puede decaer a cualquiera de estas dos componentes. Mas, el haz láser incidente no puede excitar la transición atómica anteriormente descrita desde ambas componentes, únicamente desde una de ellas, tal que si el átomo decae a la otra componente necesitamos regresarlo al ciclo de enfriamiento de alguna forma. La solución a este problema es sencilla pues basta con introducir una segunda frecuencia que llamaremos de *rebombeo* que se encarga de excitar a los átomos de tal forma que los regresa al ciclo de enfriamiento.

Regresando al cambio de momento lineal neto de un átomo en presencia de un haz de luz se genera una fuerza conocida como *fuerza de presión de radiación*, podemos escribir esta fuerza de la siguiente forma:

$$\vec{F}_{rad} = \frac{\langle \Delta \vec{p} \rangle}{\Delta t},$$

como vimos anteriormente el valor del numerador es igual a  $\hbar \vec{k}$ , por otra parte  $\Delta t$  corresponde a la tasa de emisión de fotones  $\gamma_{scat} = 1/\Delta t$ ; sustituyendo estos valores en nuestra expresión para la fuerza de presión de radiación tenemos:

$$\vec{F}_{rad} = \hbar \vec{k} \gamma_{scat},$$

finalmente a la tasa de emisión de fotones la podemos ver como el producto del ancho natural de la transición  $\Gamma$  (este corresponde al inverso del tiempo de vida del estado excitado) con la probabilidad de que el átomo esté en el estado excitado  $\rho_{ee}$ , resultando entonces en la ecuación (2.4) que es válida para un modelo de atómico de dos niveles. [5, 6]

$$\vec{F}_{rad} = \hbar \vec{k} \Gamma \rho_{ee}. \quad (2.4)$$

El término  $\rho_{ee}$  es importante pues depende de la intensidad de la luz y de la frecuencia de ésta. Para un sistema de un átomo de dos niveles en presencia de un campo eléctrico, podemos expresar  $\rho_{ee}$  de la siguiente manera:

$$\rho_{ee} = \frac{1}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + (2\delta/\Gamma)^2}, \quad (2.5)$$

donde

$$s_0 = \frac{I}{I_{sat}}, \quad (2.6)$$

es el parámetro de saturación en resonancia, dicho parámetro será de gran importancia para entender la injerencia y necesidad de un amplificador de potencia en nuestro sistema de enfriamiento. Podemos ver como éste depende de la intensidad del haz y de la intensidad de saturación de la transición:  $I_{sat} = \frac{\pi \hbar c}{3\lambda^3 \tau}$ . Y señalar que:  $\delta = \omega_L - \omega_0$  es la desintonía de la luz. Podemos entonces sustituir este valor en la ecuación (2.4), y obtener:

$$\vec{F}_{rad} = \hbar \vec{k} \Gamma \frac{1}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + (2\delta/\Gamma)^2}. \quad (2.7)$$

Finalmente como hemos mencionado, los átomos tienen una velocidad  $\vec{v}$ , como consecuencia la frecuencia de luz que ellos perciben se ve modificada por el efecto Doppler. Los átomos tendrán un corrimiento, por ello agregamos un factor  $-\vec{k} \cdot \vec{v}$  a la desintonía. Los átomos que se mueven en dirección opuesta a la propagación de la luz serán enfriados. Podemos entonces reescribir la ecuación (2.7) añadiendo este factor:

$$\vec{F}_{rad} = \hbar \vec{k} \Gamma \frac{1}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + (2(\delta - \vec{k} \cdot \vec{v})/\Gamma)^2}. \quad (2.8)$$

Regresando al desacelerador, mientras los átomos recorren el tubo e interactúan con el haz disminuyen su velocidad, decreciendo su corrimiento Doppler y por lo tanto dejan de estar en resonancia con el láser, consecuentemente dejan de absorber y reemitir fotones y salen del ciclo de enfriamiento, si no se hace nada al respecto los átomos dejan de ser enfriados y continuarían su trayecto a velocidad constante. Esto se puede solucionar de la siguiente manera:

- **Desacelerador Zeeman**, este método consiste en aplicar un campo magnético inhomogéneo (puede ser creciente o decreciente) que genere una perturbación en los niveles de energía de los átomos de tal forma que cambie la energía de transición de éstos (gracias al efecto Zeeman), logrando así que la frecuencia del láser sea siempre resonante. Es importante señalar que la velocidad de los

átomos estará dada por el campo magnético, alcanzarán, por lo tanto, su velocidad más baja al salir del desacelerador. Convenientemente ahí se encontrará la MOT, razón por la cuál este mecanismo nos permitirá atrapar una gran cantidad de átomos. Ya que éste es el método que se utiliza en el experimento, se detallará un poco más de él a continuación [6, 46, 47].

Existen diversas configuraciones de bobinas para generar el campo magnético, creando campos crecientes o decrecientes ambos teniendo sus ventajas. Particularmente en el experimento del laboratorio utilizamos la configuración *spin-flip*<sup>4</sup> [46, 48] que consta de ocho bobinas de tamaño decreciente con una novena bobina al final cuya corriente va en dirección opuesta. Este arreglo de campo decreciente compensa significativamente el corrimiento Doppler, reduce en gran medida la velocidad de los átomos y solo pequeñas desintonías son necesarias en el láser; la bobina cuya corriente corre en dirección opuesta crea un pequeño campo de borde, que no es muy grande y decae rápidamente, esto nos permite colocar al desacelerador muy cercano a la MOT. Este campo de borde decae de tal forma que permite a los átomos dejar de estar resonantes con el láser de manera inmediata [47].

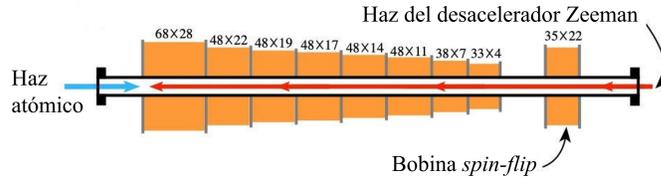


Figura 2.6: Esquema del desacelerador Zeeman

Entonces a partir de la fuerza de presión de radiación, ecuación (2.4), y considerando que  $\rho_{ee}$  tiene un valor máximo de  $\frac{1}{2}$  la fuerza de radiación satura a un valor máximo de  $F_{rad} = \frac{\hbar k \Gamma}{2}$ . Entonces, como sabemos que  $F = ma$ , podemos determinar la aceleración a la cual están siendo frenados los átomos a lo largo del desacelerador, siendo  $a \approx \frac{\hbar k \Gamma}{2m}$ . Y de esta forma podemos calcular la velocidad de los átomos en cada posición del desacelerador  $v(z)$ , teniendo una velocidad inicial  $v_0$  y siendo  $z$  la posición en particular, tenemos:

$$v(z) = \sqrt{v_0^2 - 2az}. \quad (2.9)$$

Ahora como se dijo antes, tenemos un campo magnético que varía dependiendo la posición  $B(z)$ , este varía de acuerdo a la velocidad de los átomos para estar contrarrestando el efecto Doppler constantemente, la variación de este tiene que ver con la frecuencia de transición del átomo en reposo  $\omega_0$ , la frecuencia del láser  $\omega$  y el magnetrón de Bohr  $\mu_B$ , de tal forma que tenemos:  $\omega_0 + \frac{\mu_B}{\hbar} B(z) = \omega + kv(z)$ , finalmente si despejamos al campo magnético y sustituimos por la velocidad descrita en la ecuación (2.9), resulta ser el campo magnético del desacelerador a lo largo de la dirección

<sup>4</sup>El nombre de esta configuración viene de un cambio en el spin de los átomos, al estar inmersos en un campo magnético el spin se encuentra alineado a dicho campo magnético, al invertir el campo magnético con la última bobina cambiamos el valor del número cuántico  $m_s$ .

de propagación ( $z$ ) que podemos ver a continuación:

$$B(z) = \frac{\hbar}{\mu_B} \left( \delta_z + k\sqrt{v_0^2 - 2az} \right). \quad (2.10)$$

## 2.2.2. MOT, confinamiento atómico

### 2.2.2.1. Melaza Óptica

Habíamos considerado hasta este momento que los átomos únicamente interactuaban con un láser que se propagaba en dirección opuesta a éstos. Mas, una configuración que es esencial en el experimento es la que se conoce como *melaza óptica*, que consiste en colocar dos haces contrapropagantes consiguiendo que el átomo sienta fuerzas que dependen de la velocidad en ambas direcciones, generando así una región espacial donde el átomo es efectivamente frenado. En el caso de una dimensión, la fuerza que sentirá el átomo será entonces la suma de las dos fuerzas, generadas por los haces contrapropagantes. Dichas fuerzas llamadas  $\vec{F}_{rad+}$  y  $\vec{F}_{rad-}$  producen vectores de onda que llamamos  $\vec{k}_+$  y  $\vec{k}_-$  respectivamente, y son tales que  $\vec{k}_+ \cdot \vec{v} = |\vec{k} \cdot \vec{v}|$  y para  $\vec{k}_-$ , simplemente será de la misma magnitud pero con signo opuesto como podemos ver:  $\vec{k}_- \cdot \vec{v} = -|\vec{k} \cdot \vec{v}|$ . Tenemos entonces una fuerza total resultante de la suma de estas dos fuerzas que podemos ver a continuación:

$$\vec{F}_{total} = \vec{F}_{rad+} + \vec{F}_{rad-} \quad (2.11)$$

$$= \hbar\vec{k}_+\Gamma \frac{1}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + (2\delta - \vec{k}_+ \cdot \vec{v}/\Gamma)^2} + \hbar\vec{k}_-\Gamma \frac{1}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + (2\delta - \vec{k}_- \cdot \vec{v}/\Gamma)^2}, \quad (2.12)$$

como queremos que sea una fuerza viscosa, es decir que se vea como  $\vec{F} = -\alpha\vec{v}$ , con  $\alpha > 0$  debemos prestar atención a una única condición: la desintonía de la luz debe ser negativa, es decir debemos tener una desintonía al rojo.

Sin embargo, con esta técnica únicamente podemos llegar a la temperatura Doppler, que vimos en la ecuación 2.2, que podemos pensarlo como el momento en el que los átomos están en equilibrio térmico con la luz. Como tenemos dos haces, los átomos seguirán absorbiendo fotones evitando que enfriar más allá de ésta temperatura [49].

Ahora, aunque pensemos en un arreglo tridimensional de melazas ópticas que frene a los átomos en todos los ejes, éstos serán frenados pero no serán confinados espacialmente, ya que la fuerza no tiene una dependencia espacial. La solución a dicho problema llegó con la creación de la MOT, trampa magneto-óptica por sus siglas en inglés. Ideada en 1985 por J. Dalibard [50] y creada experimentalmente por el grupo de D. Pritchard [51], la MOT se basa en la operación de un gradiente de campo magnético con un cero en el centro de la trampa y utilizar un arreglo de melazas ópticas con polarización circular<sup>5</sup>, dicha melaza se crea a partir de seis láseres contrapropagantes, cada par sobre un eje [52].

<sup>5</sup>Esto para excitar las transiciones hiperfinas, esto por las reglas de selección sobre el número cuántico  $m$ , en presencia de un campo magnético.

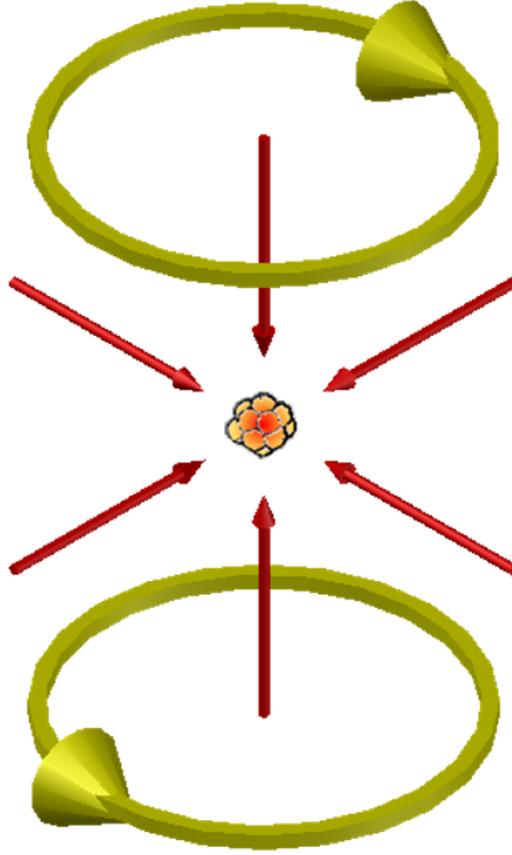


Figura 2.7: Diagrama de una MOT, con una melaza óptica, en la cual tenemos seis láseres ortogonales entre sí interactuando con los átomos provocando así que se no se mueva en ninguna dirección. Se ilustran además las bobinas de campos magnéticos en configuración anti-Helmholtz.

A continuación se presentará una breve explicación del funcionamiento físico de la MOT. Comencemos con dos haces, es decir en una única dimensión, éstos se encuentran desintonizados al rojo y cuentan con polarización circular  $\sigma_{\pm}$ , además hay un campo magnético lineal a lo largo del mismo eje, sea  $z$ , este campo tiene un cero en el centro de la trampa  $z = 0$  y en la componente  $z$  es de la forma  $\vec{B}(0, 0, z) = \frac{\partial B}{\partial z} \vec{z} = b\vec{z}$ , tal que crece linealmente y genera subestados magnéticos en el estado excitado del átomo, estos están dados por el número cuántico  $m$ . Nuevamente aparece el efecto Zeeman, éste provoca un desdoblamiento en los niveles de energía que podemos expresarlo de la siguiente manera:

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -m_j g_j \mu_B B(z), \quad (2.13)$$

aquí  $m_j$  representa la proyección total del momento angular del electrón  $j$ , podrá tomar los valores  $m_j = [-j, j]$  y  $g_j$  son los factores de Landé. Entonces la separación entre los dos niveles atómicos es:

$$\Delta E_{j \rightarrow j'} = -(m_{j'} g_{j'} - m_j g_j) \mu_B B(z). \quad (2.14)$$

Es importante notar que el corrimiento Zeeman introduce ahora una nueva desintonía:

$$\delta_z = \frac{1}{\hbar}(m_{j'}g_{j'} - m_jg_j)\mu_B B(z) = -\frac{\Delta\mu B(z)}{\hbar}. \quad (2.15)$$

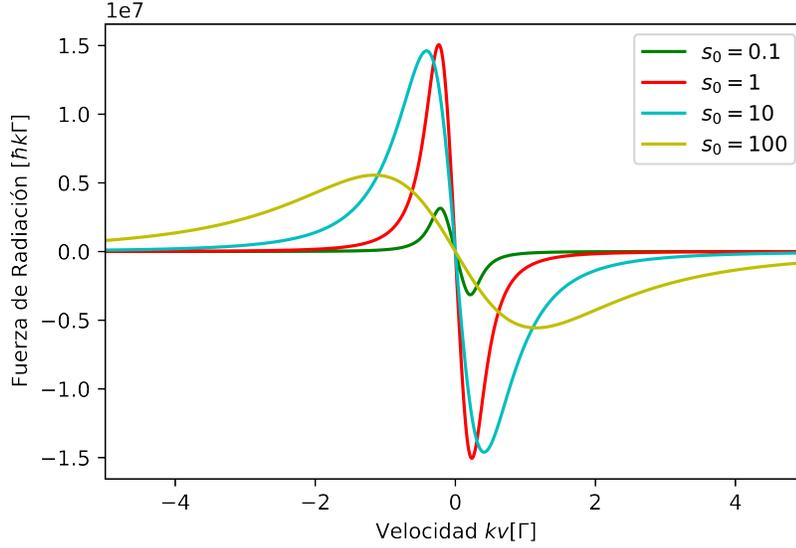


Figura 2.8: Comportamiento de la fuerza producida por la melaza óptica, con distintos valores del parámetro  $s_0$ . Con  $\delta_0 = -\frac{1}{2}\Gamma$ .

Así la fuerza en la MOT es:

$$\vec{F}_{MOT} = \frac{1}{2}\hbar\vec{k}\Gamma s_0 \left( \frac{1}{1 + s_0 + (2\delta_+/\Gamma)^2} - \frac{1}{1 + s_0 + (2\delta_-/\Gamma)^2} \right), \quad (2.16)$$

en donde la desintonía total incluyendo la desintonía del haz y los corrimientos Doppler y Zeeman es:

$$\delta_{\pm} = \delta_0 \pm \left( \vec{k} \cdot \vec{v} + \frac{\Delta\mu b z}{\hbar} \right). \quad (2.17)$$

Regresando a los haces contrapropagantes, estos tienen polarización circular en sentido de las manecillas del reloj, de acuerdo a su dirección de propagación, esto quiere decir que son opuestas las polarizaciones. El haz que va hacia la derecha tiene polarización  $\sigma_+$  e induce transiciones del estado base al subestado excitado  $m = +1$ ; mientras que el haz que va hacia la izquierda tiene polarización  $\sigma_-$  e induce transiciones del estado base al subestado excitado  $m = -1$ . En  $z = 0$  el átomo absorbe de igual manera ambos haces de tal forma que la fuerza de presión de radiación es igual a cero, pues siente fuerzas iguales en direcciones opuestas. Sin embargo, cuando el átomo es desplazado a la derecha, o sea a valores positivos para  $z$  se tiene un incremento en la tasa de absorción de fotones  $\sigma_-$  y una reducción en la tasa de absorción de fotones  $\sigma_+$ , generando así una fuerza hacia el origen o centro de la trampa, donde ambas transiciones tienen la misma frecuencia; esto ocurre ya que al

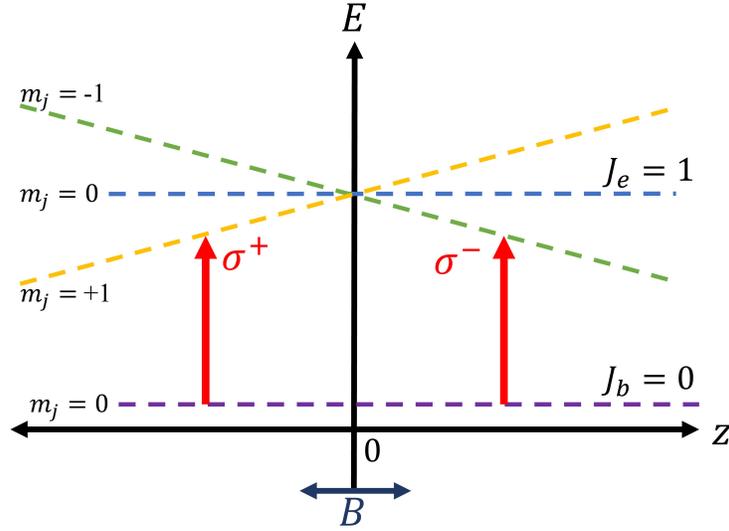


Figura 2.9: Esquema de una MOT teórica en una dimensión. Se ilustra la transición del estado base  $J_b = 0$  al estado excitado  $J_e = 1$ . Se ilustra el desdoblamiento Zeeman  $\Delta E = -m_j g_j \mu_B B(z)$  con las líneas punteadas de colores. El campo magnético es lineal y va en la dirección de  $z$ . Los haces contrapropagantes con polarización circular  $\sigma^\pm$  están ilustrados con las flechas rojas que parten del estado base hacia el estado excitado.

moverse a la derecha la frecuencia de la transición al subestado  $m = -1$  se reduce y se aproxima más a la frecuencia del láser y simultáneamente se aleja de la frecuencia para la transición al subestado  $m = +1$ . Debido a que esto ocurre, inversamente, a los átomos que son desplazados a la izquierda, tenemos una trampa que empuja a los átomos al origen de la trampa. En la Figura (2.9) se presenta un esquema con estos fenómenos.

Finalmente, para generar el campo magnético cuadrupolar se utiliza un conjunto de bobinas en configuración anti-Helmoltz. Además se tiene un arreglo de seis haces láser contrapropagantes que llegan a través de tres fibras ópticas, en cada haz vienen las dos frecuencias necesarias para el ciclo de enfriamiento: enfriamiento y rebombeo. Generando así nuestra trampa magneto-óptica que nos permite confinar espacialmente a los átomos y además en simultáneo enfriarlos. Podemos ver, una fotografía de esta trampa producida en el Laboratorio de Materia Ultrafría en la Figura (2.10).

### 2.2.3. ¿Por qué necesitamos un amplificador de potencia?

Ahora que hemos explicado los distintos procesos de enfriamiento láser la pregunta que nombra ésta sección cobra mayor importancia, pues no mencionamos cuando entran en operación los amplificadores de potencia láser, o el motivo por el que los utilizamos.

Particularmente, utilizamos en el experimento dentro del Laboratorio de Materia Ultrafría amplificadores de potencia láser, como el que se diseñó y construyó a lo largo de esta tesis, en etapas de enfriamiento tales como el desacelerador Zeeman, en la producción de la trampa magneto-óptica y en las técnicas de melaza gris.

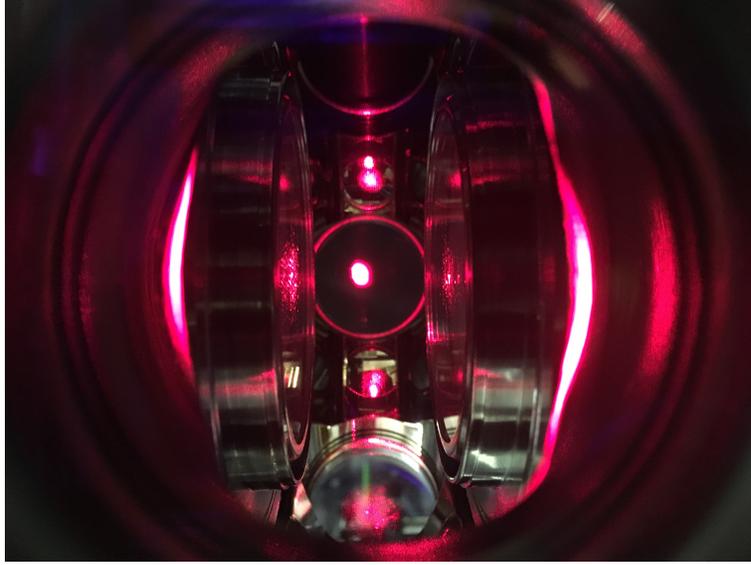


Figura 2.10: MOT producida en el LMU

Un concepto importante que debemos tener en mente es la **intensidad óptica**, que entendemos como la potencia óptica por área, transmitida en una superficie perpendicular a la dirección de propagación. Tiene unidades de  $\frac{[Potencia]}{[Area]} \rightarrow \frac{W}{mm^2}$  [53]. Ahora debemos recordar que en los procesos de enfriamiento láser los átomos sienten a la fuerza de presión de radiación, por ejemplo al encontrarse dentro de la trampa magneto-óptica. Como vimos en la Figura (2.8), dicha fuerza cambia en función del parámetro  $s_0$ , que a su vez se encuentra en función de la intensidad de la luz y la intensidad de saturación. La segunda es conocida y podemos calcularla para nuestro caso en particular, es decir para las transiciones D1 y D2 del  ${}^6Li$  (datos tomados de la referencia [54]):

$$I_{sat}^{D1} = 7.59 \frac{mW}{cm^2}$$

$$I_{sat}^{D2} = 2.54 \frac{mW}{cm^2}$$

Sabemos, al ver la Figura (2.8), que a mayor intensidad de la luz respecto a la intensidad de saturación ( $I > I_{sat}$ ) la fuerza es mayor. Por lo que buscaremos tener estas condiciones, es decir tener un  $s_0$  mayor a 1 y que sea cercano a 10.

Para un haz gaussiano con potencia óptica  $P$  y un radio  $w$  la intensidad máxima será:

$$I = \frac{2P}{\pi w^2}, \quad (2.18)$$

utilizando esta expresión para los láseres en el laboratorio, en particular para los haces láser que conforman la MOT sabemos que miden una pulgada de diámetro y tienen una potencia promedio de 25mW, lo que resulta en una intensidad de:

$$I_{MOT} = 9.86 \frac{mW}{cm^2}. \quad (2.19)$$

Entonces tenemos los siguientes parámetros  $s_0$ :

$$\begin{aligned}s_0^{D1} &= 1.30 \\ s_0^{D2} &= 3.88\end{aligned}$$

Sin embargo, hay algo más que debemos tomar en cuenta. Entre el láser y la MOT hay decenas de componentes ópticos que merman la potencia a medida que se propagan los láseres, es decir que necesitamos amplificar mucho la potencia para que al llegar a su destino preserven aún una potencia considerable. Por ello, los MOPAs en el arreglo experimental amplifican la potencia de los láseres en más de diez veces, es decir que mientras tenemos láseres con una potencia de salida de 20mW, a la salida de los MOPAs la potencia de estos es mayor a los 300mW. Y finalmente para dimensionar la potencia perdida a lo largo del camino, al llegar a la MOT tenemos un poco más de 30mW.

Particularmente, el MOPA construido a lo largo de esta tesis ha sido montado a la salida del láser utilizado para la transición D1 para amplificar la potencia de éste, y se han alcanzado los valores de potencia necesarios para tener la intensidad deseada. Mas, dadas sus características es posible montarlo en la otra transición D2, o en otro segmento del experimento como lo es el láser utilizado para el desacelerador de Zeeman.

En el siguiente capítulo se presentará una breve introducción teórica a los amplificadores de potencia y se discutirá particularmente las características del MOPA y los principales componentes que lo conforman. Y así en el Capítulo 4 se mostrará el diseño propuesto para construir el MOPA del cual trata esta tesis.

# Capítulo 3

## Amplificadores de Potencia de Láseres

*“El tiempo, en realidad, sólo nos aleja de la perfección original”  
La región más transparente, Carlos Fuentes*

Recientemente el uso de láseres para distintos experimentos desde docencia hasta laboratorios de investigación ha aumentado en gran medida y que como hemos visto en el capítulo anterior, existen distintos mecanismos y configuraciones que nos permiten enfriar y confinar átomos mediante el uso de éstos. Sin embargo, muchos de estos experimentos y mecanismos requieren de una alta potencia, que lamentablemente los láseres de diodo convencionales no pueden ofrecer, siendo los más comunes en operación los láseres de diodo con cavidad extendida (ECDLs por sus siglas en inglés). Al manipular los haces de estos láseres terminamos con una potencia menor a 100mW, siendo el deseo obtener potencias cercanas a  $\sim 0.5 - 1$  W.

Además al amplificar la potencia de salida de un láser se pierde estabilidad y diversas características que son fundamentales para los mecanismos y métodos que se han presentado, aunado a ello los sistemas que pueden aumentar la potencia y mantener las propiedades del láser de uso comercial tienen costos muy elevados. Por ello se ha tenido la necesidad de idear sistemas novedosos y de menor costo que nos permitan ampliar la potencia y conservar las propiedades que nos interesan. Uno de los sistemas más utilizados son los conocidos MOPAs (*Master Oscillator Power Amplifier*, por sus siglas en inglés) o MOAs que utilizan aparatos semiconductores como los amplificadores cónicos llamados en inglés *tapered amplifiers*, junto con un sistema óptico.

Siendo el propósito de esta tesis el desarrollo y construcción de un MOPA, en el presente capítulo se explicará el funcionamiento teórico y los componentes que lo conforman.

### 3.1. MOPA

Entendemos al MOPA como un láser con un amplificador de potencia cónico que amplifica la luz proveniente de un láser de diodo con cavidad externa, que es el os-

cilador maestro [55]. Se añade un conjunto de componentes ópticos y mecánicos que garantizan el óptimo y más eficiente funcionamiento del amplificador de potencia. Particularmente, el amplificador de potencia cónico, **TA** por sus siglas en inglés (tapered amplifier), empleado en esta tesis está fabricado para láseres de  $670nm$ , como los que utilizamos en el experimento. A continuación se detallará el funcionamiento teórico y las características del modelo empleado [55–57].

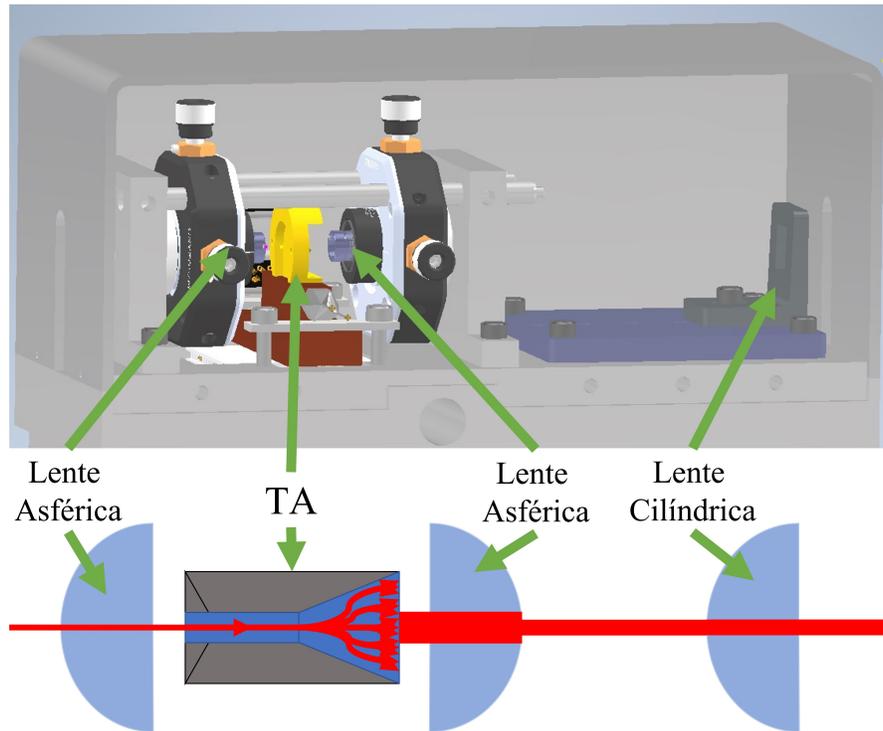


Figura 3.1: Diagrama esquemático y modelo 3D de un MOPA, con los componentes ópticos y el TA. Este esquema no es a escala.

### 3.1.1. TA

Un amplificador cónico TA, es entonces un semiconductor con dos secciones esenciales para su funcionamiento: una guía para el haz del láser y una sección cónica de ganancia.

El láser cuya potencia queremos amplificar es llamado *láser semilla*, éste ingresa al amplificador a través de una faceta con cubierta anti reflejos y entonces recorre completamente la primera sección del TA que es la guía, se dice que llena la guía pues hay una saturación de luz proveniente del láser en esta sección. Después de esto el haz se moverá hasta la región de ganancia donde se le provee de una corriente eléctrica con la que es capaz de amplificar la potencia del láser. Más adelante se presentará este proceso con mayor detalle [38, 55].

Enseguida se presentará una breve descripción sobre el proceso de amplificación de potencia que ocurre en la sección cónica de ganancia. Consideramos entonces al medio de ganancia, la segunda sección de nuestro TA, como un sistema de cuatro

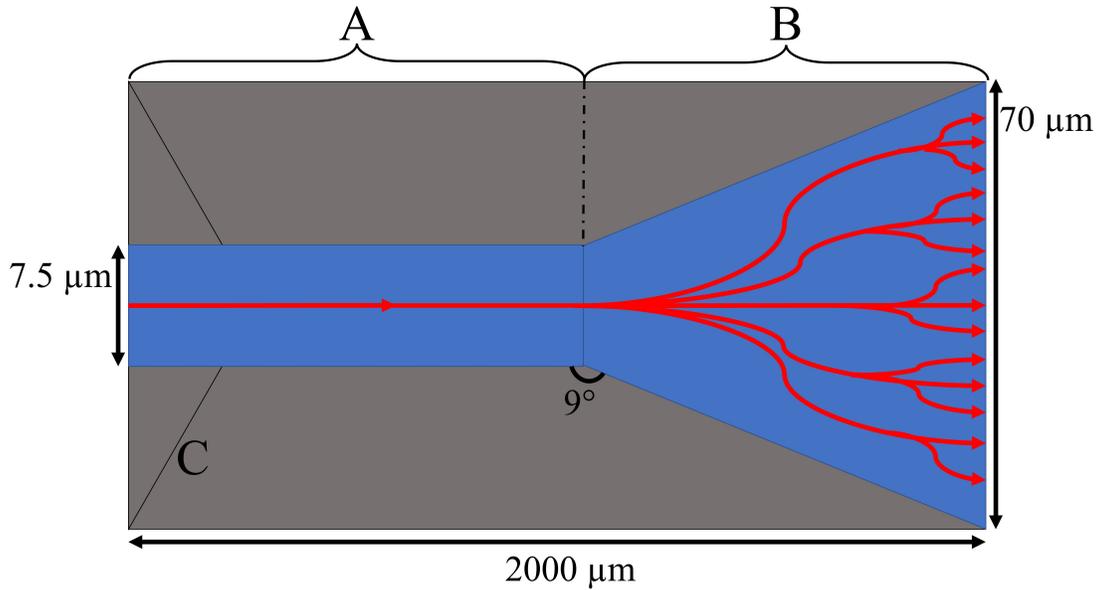


Figura 3.2: Diagrama del TA. Las secciones en azul corresponden a: A) Guía, a través de la cual entra el haz del láser semilla, B) Región de Ganancia cónica, donde se amplifica la luz. C) Surcos anti efectos de cavidad.

Las dimensiones que se presentan corresponden al modelo *EYP-TPA-0670-00500-2003-CMT02-0000* de Eagleyard, que es el modelo que se utiliza en este trabajo.

niveles: *base*, *reservorio* y dos estados que llamaremos  $|A\rangle$  y  $|B\rangle$ . Se inyecta una alta corriente eléctrica en esta sección con la cual se excitan los electrones en el estado base que pasan entonces al reservorio, aquí ocurre una inversión de población que nos deja con un mayor número de electrones en el reservorio que en el estado base, la mayoría de estos electrones decaen al estado  $|B\rangle$ . Ya en este estado hay dos mecanismos con los cuales pueden decaer los electrones al estado  $|A\rangle$ , por emisión espontánea o por emisión estimulada; al decaer mediante el primer mecanismo emiten fotones, sin embargo, los fotones emitidos no necesariamente tendrán el mismo modo que los fotones del láser semilla, ya que los emitidos no están directamente relacionados a los provenientes del láser. Al encender al TA sin inyectar luz a ser amplificada, vemos un haz que nace de esta emisión espontánea.

Mediante la emisión estimulada, son los fotones provenientes del láser semilla los que provocan el decaimiento, de tal forma que al decaer el electrón emite un fotón con el mismo modo que de los provenientes del láser semilla. Esto nos garantiza que la frecuencia, dirección de propagación y la polarización de ambos fotones es idéntica, finalmente el resultado de este proceso es la creación de dos fotones con las mismas características a partir de un único fotón proveniente del láser semilla. El proceso no se detiene ahí ya que los fotones continúan su movimiento a través de la región de ganancia provocando así nuevas interacciones, debemos recordar que sólo los fotones obtenidos mediante emisión estimulada (siendo estos los que decaen del estado  $|B\rangle$  al  $|A\rangle$ ) nos serán útiles pues comparten modo con el láser semilla; así estos fotones

crean una *avalancha* de fotones idénticos que comparten modo. Esta avalancha es la responsable de amplificar la luz del láser incidente.

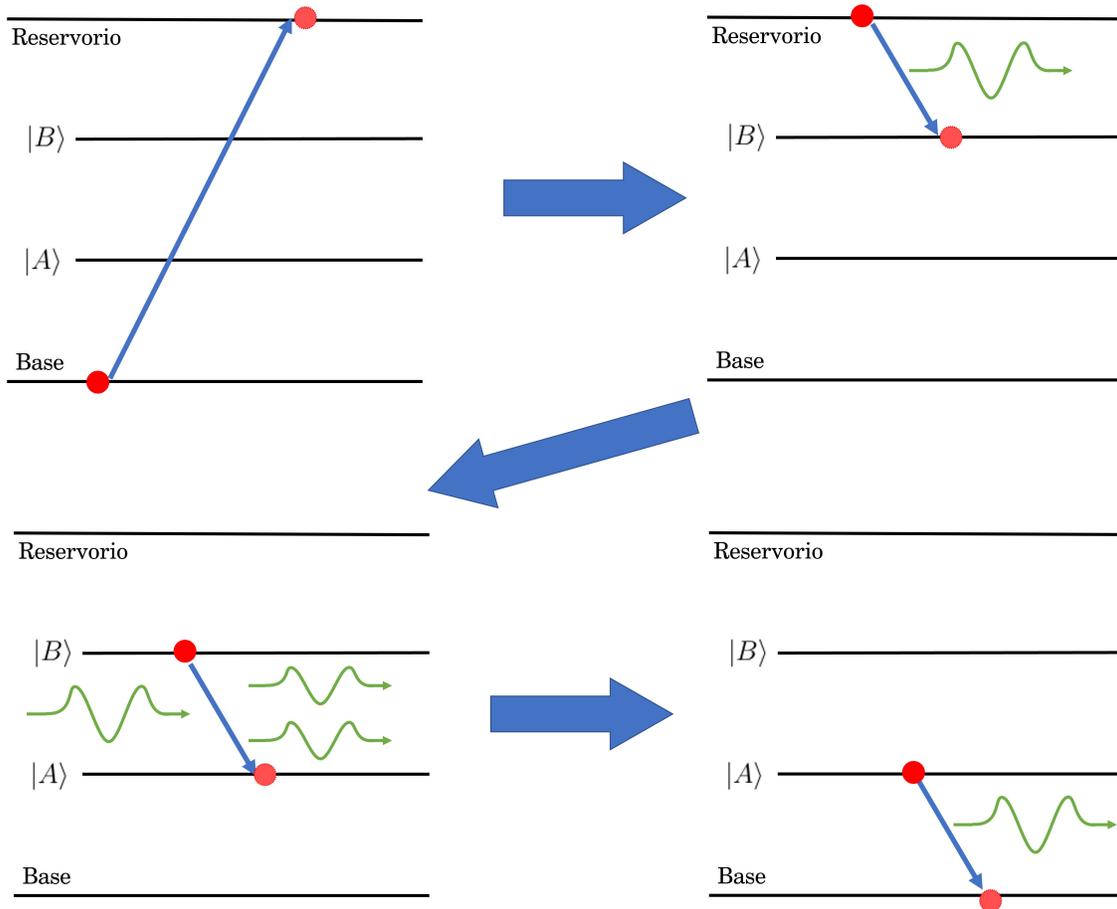


Figura 3.3: Diagrama del funcionamiento del mecanismo de amplificación del TA. Los electrones están representados por los puntos rojos, los fotones son las líneas verdes onduladas. Podemos ver los cuatro estados: *reservorio*, *base*  $|A\rangle$ ,  $|B\rangle$ . Para pasar del reservorio al estado  $|B\rangle$  y del estado  $|A\rangle$  al base es mediante emisión espontánea.

Finalmente los electrones en el estado  $|A\rangle$  decaen al estado base en el cual pueden volver a ser excitados de vuelta al estado del reservorio y continuar el ciclo. Podemos ver los pasos de este proceso en la Figura (3.3). Es necesario aclarar que el tiempo de vida es mucho mayor en el estado  $|B\rangle$  que en el  $|A\rangle$ , esto nos garantiza la inversión de población y reduce la cantidad de emisiones relacionadas con un “emparejamiento de modos” [58, 59].

Regresando al funcionamiento del TA, visto de forma externa. Todo comienza enfocando el láser semilla en la apertura de entrada, que mide  $7.5\mu m$ , así este atraviesa toda la guía y llega al medio de ganancia donde se difracta con el ángulo de este,  $\approx 9^\circ$ , llenando así el medio de ganancia. Si, el medio de ganancia es suficientemente largo la emisión espontánea será pequeña comparada a la emisión estimulada provocada por el haz del láser semilla. Si queremos que el amplificador funcione con la mayor eficiencia debemos asegurarnos que tenemos la cantidad suficiente de luz proveniente

del láser semilla, dicho de otra forma: que la potencia de entrada debe mantenerse lo más alta posible en todo el dispositivo, de tal forma que siempre tengamos una mayor emisión estimulada en comparación con una emisión espontánea.

Además, el contacto eléctrico al TA se da al metalizar las capas superior e inferior lo que nos garantiza que suministramos una densidad de corriente espacialmente homogénea, por lo que la ganancia a lo largo del eje de propagación es uniforme. Mas, lateralmente no es uniforme debido a que la ganancia varía con el inverso de la densidad de la potencia óptica local. Esto significa que de entrar un haz gaussiano tendrá una menor amplificación en el centro que en las regiones externas, por que primero saturan intensidades más grandes, es decir que se puede aproximar mediante la distribución de sombrero de mago, que podemos ver en la Figura (3.4). Como el haz

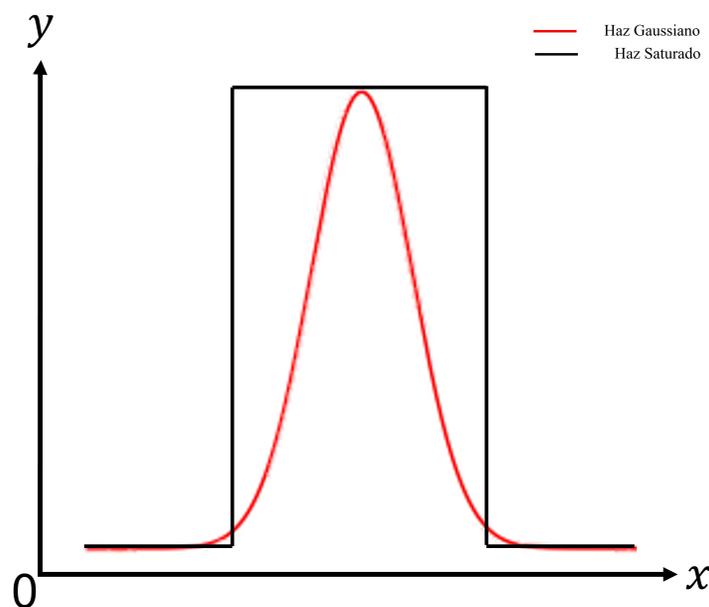


Figura 3.4: Perfiles gaussiano, de color rojo, y perfil de sombrero de mago (o plano), de color negro. Cuando aumentamos la potencia del láser, comienza a saturarse su perfil a la salida provocando el perfil de sombrero de mago, en el cual se pierden las propiedades de perfil gaussiano.

expande desde la guía y se difracta conforme al ángulo cónico, la amplitud y la fase serán uniformes a lo largo de los frentes de onda curvos que salen desde la apertura.

Finalmente, como el perfil perpendicular del haz es difractado por un ángulo<sup>1</sup> alrededor de  $51^\circ$ , provoca el astigmatismo en el haz que se puede ver como si éste tuviera dos puntos focales distintos [38, 55].

En la siguiente sección se presentarán algunas de las particularidades de operación, instalación y manejo del TA, así como de algunas de las características del modelo que fue utilizado en la realización de esta tesis.

<sup>1</sup>Ángulo provisto por el fabricante, se puede ver en el Data Sheet del TA, que se encuentra en el Anexo D.

### 3.1.2. Particularidades del TA

Físicamente, el diseño del TA cuenta con ciertas características diseñadas para evitar posibles fallos. Como se mencionó, el chip cuenta con una faceta con cubierta anti-reflejos a la entrada y salida de la luz, pues es peligroso que el láser entre por la sección equivocada o que regrese ya amplificado, pues podría quemarse. También a la entrada del TA tenemos surcos grabados encargados de suprimir cualquier elemento proveniente de una cavidad, dichos surcos están angulados de tal forma que son capaces de desviar y dispersar cualquier radiación no deseada fuera de la zona de ganancia. Algunos de estos efectos de cavidad que se presentan son por ejemplo los modos de cavidad Fabry-Pérot que son modos con frentes de onda paralelos a las dos facetas, de entrada y salida [55].

Para la realización del MOPA que es el propósito de esta tesis se utilizó el modelo de Eagleyard *EYP-TPA-0670-00500-2003-CMT02-0000*, que es amplificador cónico para un láser de  $670nm$ . Este modelo particularmente ya incluye una montura *C*, que funge como el primer mecanismo de disipación de calor y además facilita las conexiones eléctricas. Dicha montura es un pequeño cuerpo cúbico que sostiene al TA, y que podemos ver en la Figura (3.5) de color amarillo, sin embargo, dicha montura *C* junto con el TA vienen a su vez montados en una estructura metálica con forma de herradura, de color arena, que también ayuda a disipar el calor y principalmente nos facilita las conexiones eléctricas. Consecuentemente a lo largo de este trabajo al referirnos a la montura *C* nos referiremos a todo este arreglo que contiene las tres piezas.

Las condiciones de operación recomendadas son:

- Potencia del láser semilla:  $10mW - 50mW$
- Temperatura de funcionamiento:  $20^{\circ}C$
- Corriente máxima de funcionamiento:  $1A$
- Longitud de onda:  $670nm$
- Ancho de ganancia (FWHM):  $\Delta 10nm$ ,

sobre la información de este dispositivo, se pueden leer más detalles en el manual del mismo que se encuentra en el Anexo D.

### 3.1.3. Componentes del MOPA

Constituyen al MOPA distintos componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y ópticos que cumplen distintas funciones, a través de las cuales podemos tener un funcionamiento óptimo. En la presente sección se describirán estos componentes, su funcionamiento y su ubicación dentro del MOPA.

Como vimos en la sección pasada la geometría del TA es particularmente pequeña y delicada, la entrada para el haz es de unos cuantos micrómetros, es por ello que el primer conjunto de componentes que presentaremos serán los ópticos, pues son los

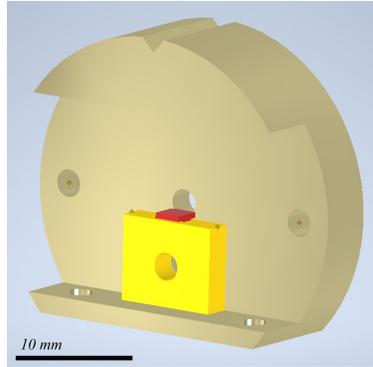


Figura 3.5: Esquema 3D del TA en la Montura C, creado a partir de las dimensiones y de la pieza física que se tenía en el laboratorio. La montura C corresponde únicamente al cuadrado amarillo y el TA es el pequeño cuerpo rojo sobre esta montura. A lo largo de este trabajo al referirnos a la montura C, hacemos referencia a ésta y a la estructura dorada, semi-circular, que la acompaña.

encargados de llevar el haz del láser semilla al TA y de entregar un haz a la salida que podamos utilizar. Serán descritos en el orden en el que el haz del láser semilla los atraviesa a lo largo del MOPA.

- Primer lente esférica, ya que la entrada del TA es muy pequeña respecto al tamaño del haz del láser cuya potencia deseamos amplificar, necesitamos una lente que nos enfoque el haz en la entrada del chip.

Particularmente se utilizará el modelo de *Thorlabs* **C171TMD-A** que tiene un foco de  $f = 6.20mm$ .

- Segunda lente esférica, el propósito de esta segunda lente es colimar la luz de salida que sale del TA, ya que la luz que sale diverge completamente.

Se utiliza una lente del mismo modelo que la anterior. Ambas lentes esféricas se colocan sobre monturas que nos permiten ajustar su posición sobre los tres ejes con gran precisión. Se detallará más sobre su montaje en el siguiente capítulo.

- Lente cilíndrica, una tercera lente se utiliza para corregir el astigmatismo que se genera con la amplificación de la potencia, además esta lente nos permite tener un haz aproximadamente circular a la salida del MOPA. Se coloca respecto a su distancia focal, por lo tanto se utiliza un soporte móvil que nos permite cambiar su posición en el eje del haz.

Se utilizará el modelo **LJ1477L1-B** de *Thorlabs* es plano convexa, cuenta con una cubierta anti reflexiones, tiene un foco de  $f = 69.99mm$  y geoméricamente el lado plano es casi cuadrado.

- Aislador óptico, conocidos también como “aisladores de Faraday” tiene como función impedir que haces de luz o reflexiones que se dirigen en la dirección opuesta regresen al TA, pues únicamente permite el tránsito de la luz en una dirección. Utiliza el efecto de Faraday, creando un campo magnético a lo largo

del aislador [60, 61]. Debido a la alta potencia de salida no se puede utilizar cualquier aislador, deberán ocuparse de alta intensidad.

El aislador es instalado después de la segunda lente esférica y justo antes de la lente cilíndrica. El modelo empleado es **04-650-000126** de la marca *EOT*, que funciona con altas intensidades.

Enseguida se presentarán los componentes que están directamente relacionados con la operación del TA y se encargan de mantener las condiciones de temperatura adecuadas para su correcto y óptimo funcionamiento.

- *Heat Sink*, o disipador térmico, debido a la alta corriente de operación que utiliza el TA, éste tiende a calentarse y alcanzar temperaturas que no son óptimas para su funcionamiento y que podrían terminar por dañarlo de forma permanente. Diseñado para tener la mayor área de contacto con la montura del TA y el mayor volumen posible esta pieza de cobre, material elegido por sus propiedades como buen conductor térmico, se encarga de disipar el calor generado por el TA.
- Peltier, un dispositivo electrónico que a través de diferencias de potencial puede calentarse o enfriarse para mantener constante la temperatura en alguna pieza, en este caso en el *heat sink*. La superficie del Peltier es aislante eléctrica. La mitad de este se enfría, mientras que la otra mitad se calienta, por ello requiere un controlador externo que pueda determinar cuanto debe calentarse o enfriarse dependiendo de la medida de temperatura del *heat sink*. Se utilizará un controlador de MOGLABS modelo LDD605, que nos permite además ajustar los parámetros PID para tener la temperatura de operación lo más pronto posible y con menos fluctuaciones de temperatura durante su operación. Más adelante se hablará con detalle sobre la optimización de estos parámetros.
- Termistor, marca *Epcos* modelo **B57045K**, es el encargado de medir la temperatura en el *heat sink*, se debe colocar lo más cercano al TA para asegurarnos que la lectura de temperatura sea lo más cercana a la que tiene el TA.
- Controlador de temperatura y fuente de corriente, se utilizará el modelo de *MOGLABS LDD605*. Su función es controlar tanto la corriente eléctrica suministrada al TA así como al Peltier. Recibe la información sobre la temperatura en el *heat sink* a través del termistor y controla el *Peltier* para mantener la temperatura de operación del TA.
- Base, finalmente todos estos dispositivos y partes deben juntarse y posicionarse de acuerdo a su funcionamiento, de tal manera que se utiliza una base en la cual se pueden fijar estos.

En el siguiente capítulo se presentarán los diseños para armar y ensamblar todos estos componentes y que funcionen correctamente.

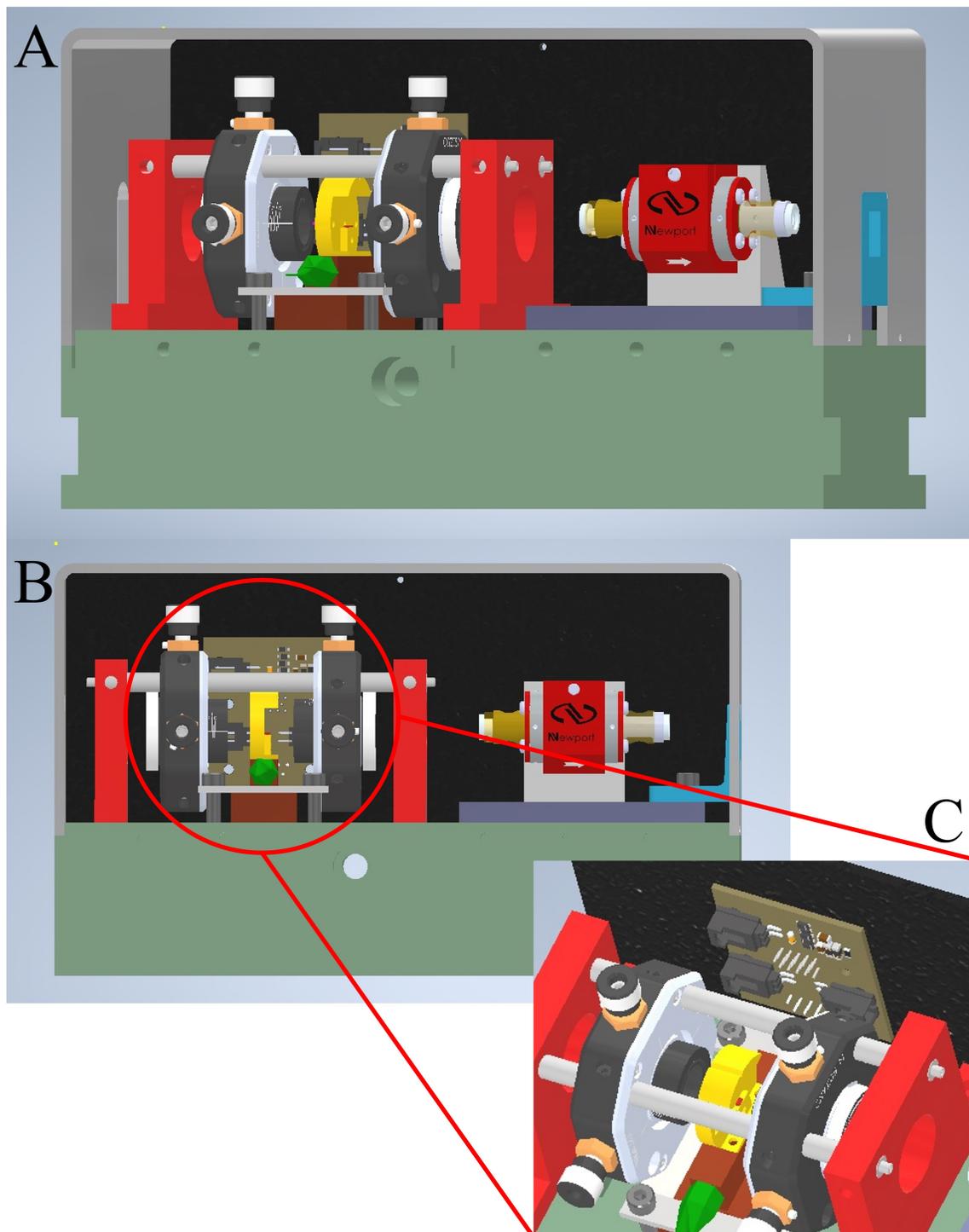


Figura 3.6: Esquema 3D del MOPA. En ambas partes las piezas que podemos ver son la siguientes: la base, color verde claro; los soportes para las monturas de las lentes esféricas, de color rojo; la base de la lente cilíndrica, de color morado; la lente cilíndrica, de azul turquesa; el dissipador térmico, de color cobre; las tapas: lateral, negra y superior, gris oscuro; el termistor, verde; el TA en la montura C, de color amarillo y rojo; el Peltier, color blanco y el aislador óptico es color rojo a un lado de la lente cilíndrica. El detalle C) es para mostrar el circuito de protección y como se ve desde arriba los componentes que rodean al TA.

# Capítulo 4

## Diseño

*“I’m one with the force, the force is with me.”*

**Ahsoka Tano**

En el presente capítulo se presentará el desarrollo de múltiples objetivos planteados para esta tesis, el diseño y procedimientos de montaje para las piezas que conforman al MOPA. Se enunciarán las características que deben cumplir las distintas piezas desde su diseño hasta la forma en que deben ser montadas y como es que fueron satisfechas dichas necesidades.

Se tratará el diseño de las piezas que fueron ideadas a partir de los requerimientos del TA y del laboratorio en particular, además haré mención de otros diseños que se pueden encontrar en la literatura y que sirvieron para el diseño de éste.

### 4.1. Diseño

Al presentarse la idea de crear un amplificador de potencia casero cuyo costo fuese menor al que tienen los dispositivos comerciales, sabíamos que era indispensable que el diseño de éste fuera apropiado para el laboratorio de Materia Ultrafría. Teniendo ciertos requisitos que cubrir, éramos conscientes que no podíamos replicar idénticamente algunos de los diseños que existen en la literatura. Sin embargo se pensó en un diseño que nos permitiera un alto nivel de ajuste en algunos de los parámetros, como la distancia de las lentes. Además se incorporaron diversos mecanismos adicionales que protegen al MOPA, aseguran su funcionamiento y prolongan su vida.

Sabiendo que quizá este diseño quiera ser utilizado en otros grupos de investigación, se muestran los planos de las piezas diseñadas, conteniendo toda la información necesaria para ajustarlas a las necesidades de cualquier otro experimento. Estos se pueden ver en el Anexo A.

Antes de comenzar, es importante señalar los requisitos más importantes que debía cubrir el diseño.

- **Línea de óptica**, todos los componentes ópticos que se utilizan en el experimento tienen una altura en común de  $75mm$  respecto a la mesa óptica. Esto quiere decir que los haces láser siempre se encuentran a dicha altura y que el TA deberá ser situado en una posición que lo coloque a dicha altura.

- **TA**, los amplificadores de potencia pueden venir en distintas monturas y tener distintos parámetros de funcionamiento. Particularmente el TA que se tiene en el laboratorio, tiene tres parámetros importantes: viene en una montura C (del cual no puede ser separado), funciona a  $20^{\circ}C$  y amplifica luz láser con longitud de onda  $670nm$ .
- **Lentes**, las lentes esféricas cuentan con distancia focal pequeña y además son pequeñas, por ello es que deben ser montadas en monturas especiales para ellas. Asimismo la lente cilíndrica ya cuenta con su propia montura y el diseño debe incorporar ésta lente sin sacarla de su montura.
- **Tornillos**, si bien se pueden comprar tornillos específicos, como fue el caso en unas piezas, lo ideal es que los tornillos planteados en el diseño concuerden con los tornillos que se encuentran en el laboratorio, es decir que sean en su mayoría de estándar métrico.

Finalmente, todo el diseño de las piezas está basado en el diagrama de funcionamiento de las lentes respecto a el TA que se muestra en la Figura (4.1). Ya que son los componentes centrales del MOPA y los que mayor precisión respecto a su posición requieren para el funcionamiento del MOPA.

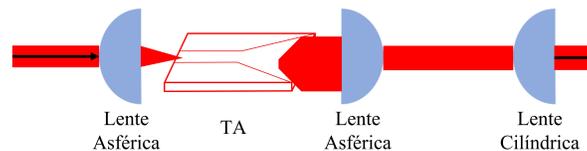


Figura 4.1: Diagrama de posiciones de las lentes respecto al TA. También se representa el láser y su comportamiento antes y después de cada lente. La dirección de propagación del láser se indica con las flechas color negro.

### 4.1.1. Componentes del TA

Comenzaremos con el diseño de las piezas encargadas de brindar las condiciones ideales para el funcionamiento del TA, disipar el calor generado por la corriente y mantener la temperatura ideal para su funcionamiento. Además deben asegurarse que el TA se encuentra en la posición correcta para ser inyectado por el láser semilla y poder utilizar el haz de salida ya amplificado.

#### 4.1.1.1. Disipador Térmico

Debido a la alta corriente que ocupa el TA al operar, éste puede llegar a calentarse hasta altas temperaturas en las cuales deja de funcionar (como se probará más adelante) y se corre el riesgo de dañarlo permanentemente. El disipador térmico, o *heat sink*, se encarga de absorber y disipar el calor que se genera en el TA, redirigir este calor hacia la base y estar siempre en contacto con el Peltier, que es el encargado

de regular la temperatura. Se propone que la pieza sea de cobre pues es un excelente conductor térmico.

Ya que debe absorber mucho calor y durante mucho tiempo el diseño busca maximizar el volumen y las superficies de contacto de la pieza. En lo que es la parte superior será montada la Montura C con el TA con dos tornillos  $M2.5$ , mientras que la parte inferior estará en completo contacto con el Peltier y evitando cualquier contacto directo con la base que pueda provocar un corto circuito, ya que no debe haber contacto entre la montura del TA y la base. El volumen del disipador deberá ser el máximo posible para asegurarnos la mejor disipación, dejando espacio suficiente para las monturas de las lentes esféricas.

Como se mencionó en la sección pasada conocemos la temperatura a la que se encuentra el TA mediante un termistor, éste debe instalarse en el disipador térmico lo más cercano posible al TA, para garantizar una medición precisa. Debido a la geometría del termistor, que ya cuenta con un tornillo  $M3$ , se plantean dos posibles posiciones, una en cada lateral del disipador, lo más cercano a la parte superior.

Siendo que el disipador térmico sostiene en su totalidad al TA, debe ser sujetado con firmeza, es por ello que existen dos métodos para fijarlo a la base. El primero, que garantiza su posición, son cuatro tornillos de nylon que pasan a través del disipador y se atornillan directamente a la base, son de plástico para evitar la conducción eléctrica. El segundo son dos sujetadores en las laterales, estos se encargan de mantenerlo en su posición y empujarlo contra el peltier generando así el máximo contacto, los sujetadores son cubiertos con cinta adhesiva tipo *Kapton* nuevamente para evitar la conducción eléctrica, estos si se fijan con tornillos metálicos  $M4$ . Aunado a ello el diseño deja cierta holgura entre el heat sink, la base y cualquier otra pieza que pueda entrar en contacto, evitando que el calor caliente dichas partes y provoqué un mal funcionamiento en alguna de estas.

La geometría del disipador se puede ver con claridad en el plano que se muestra más adelante en esta sección, y en las Figura (4.2). Las medidas del Heat Sink son 60mm al ancho (el ancho que será la dirección ortogonal a la propagación del láser), 20mm de largo (el largo ésta va en la dirección de propagación del láser) y una altura máxima de 19.50mm, las dimensiones completas de esta pieza se encuentran en el plano que se puede ver en el apéndice A.

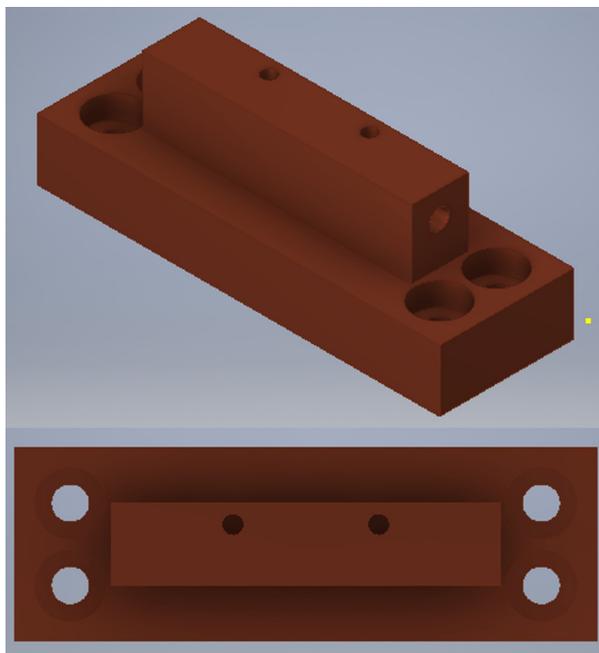


Figura 4.2: Diagrama 3D del Heat Sink. Se pueden ver los distintos orificios para fijarlo a la base y para atornillar el TA y el termistor. El TA se atornilla junto con su montura C a la parte superior, en tanto que el termistor se puede atornillar en la lateral que sea más conveniente.

#### 4.1.1.2. Circuito de Protección

Para proteger al TA de cualquier pico de voltaje o corriente que pudiese llegar a dañarlo, se diseñó y construyó un circuito de protección propuesto por la empresa MO-GLABS, que aparece en la referencia [38]. Podemos ver su diseño en la Figura (4.3). En el siguiente capítulo se detalla más sobre la operación de este circuito.

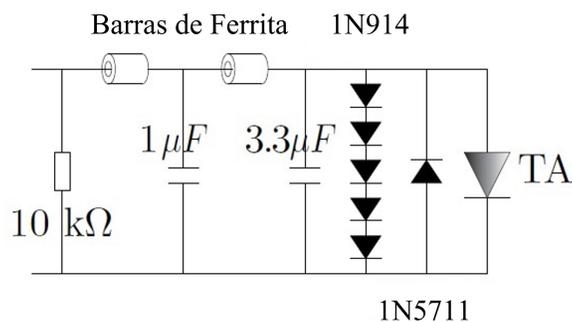


Figura 4.3: Circuito de protección propuesto en la Referencia [38]. Los diodos protegen al TA de corrientes no deseadas.

### 4.1.2. Componentes Ópticos

El MOPA requiere de tres lentes para su funcionamiento, como se mencionó en la sección 3.1, estas deben colocarse en la posición correcta respetando las leyes de la óptica y deben permanecer en dichas posiciones durante el uso del MOPA.

Tenemos dos lentes esféricas cuya distancia focal es de unos pocos milímetros, además son físicamente pequeñas y vienen ya montadas en monturas cilíndricas, por lo que deben de manejarse con gran cuidado. Por ello, se utilizarán dos adaptadores de lente del mismo fabricante, *Thorlabs*, modelo **S05TM08**, que a su vez se colocarán en dos monturas trasladadoras que nos permiten cambiar la posición de las lentes en tres dimensiones con gran precisión. Estos son también de *Thorlabs*, y sus modelos son **CXYZ05/M**. Podemos ver el montaje de estas lentes en la Figura (4.4).

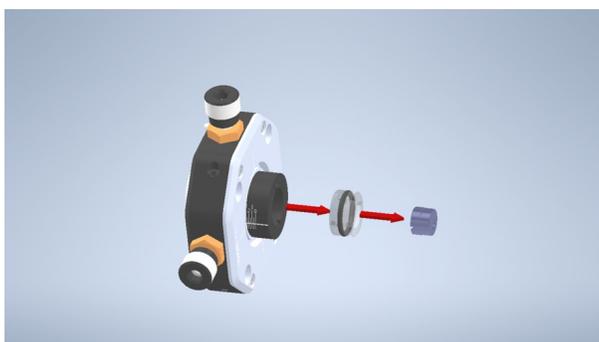


Figura 4.4: Esquema sobre el montaje de las lentes esféricas en los adaptadores de lente y en las monturas trasladadoras. De izquierda a derecha, el primer objeto es la montura de las lentes, la siguiente pieza es el adaptador para las lentes cilíndricas y finalmente la última pieza son las lentes cilíndricas.

Para todos estos componentes anteriormente descritos se diseñó un conjunto de piezas que nos ayudarán a colocarlos en sus respectivas posiciones, con las distancias exactas para su funcionamiento respecto al TA y también sin que hubiera algún posible obstáculo en el camino del haz láser. Para las dos monturas trasladadoras, se utilizaron dos soportes, que se colocan alejados del *heat sink*, estos sujetan a su vez dos pequeños tubos metálicos que soportan las monturas. Podemos ver el procedimiento de armado de esta estructura en la Figura (4.5).

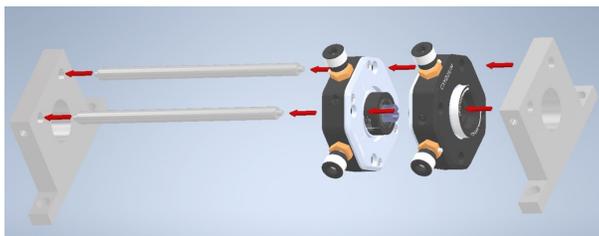


Figura 4.5: Esquema que muestra las monturas de las lentes esféricas en sus respectivos soportes.

Estos soportes tienen una altura de 50mm y una base de 80mm × 10mm, se fijan

a la base con tornillos y nos permiten movilidad total, pues también están diseñadas para permitir la operación de las monturas de los lentes. El material propuesto es aluminio. El largo de los tubos de metal de *Thorlabs* es de 4in, poco más de 12cm.

Para la lente cilíndrica, debido a que su foco es mucho más grande que el foco de las lentes esféricas, se propuso una pequeña base de aluminio de  $\frac{1}{4}$ in de grosor que se sujeta mediante cuatro tornillos *M3* a la base del MOPA y que cuenta con cinco orificios con cuerda para tornillos *M4* en los cuales se puede fijar la lente que ya viene en su propia montura, teniendo cierta libertad para moverse en la dirección de propagación del láser y un muy pequeño juego para ajustar en la dirección ortogonal.

### 4.1.3. Base

Los componentes anteriores están todos sujetos a una base que mantiene las piezas en su posición, a su vez ésta se fija a la mesa óptica, mediante *clamps* (prensas de sujeción), donde yace el experimento. El diseño planteó que las dimensiones de la base coincidieran con las que ya tienen otros MOPAs que ya existen en el experimento, algunos de estos son de la empresa *Moglabs*, modelo **MOA002**, esto para facilitar su instalación y operación en el experimento. La base debía cumplir con el requisito de la línea óptica, por ello debía darnos una altura específica para los componentes que irían sobre ella.

En lo que llamaremos la superficie de la base, hay un surco en forma cuadrangular que alberga el *Peltier*, dejando espacio suficiente para la entrada de los cables que lo conectan a su controlador. Además cuenta con los hoyos con cuerda para cada uno de los soportes de las lentes esféricas, para los tornillos de nylon del disipador térmico, así como para los sujetadores y también para fijar la base de la lente cilíndrica. El diseño pretende que haya espacio suficiente para todos los componentes así como para los correspondientes cables que van a algunas de las piezas.

Finalmente cuenta en los bordes con surcos y orificios que permiten la colocación y fijación de tapas metálicas. En total son tres, propuestas de la siguiente manera: una tapa lateral siempre fija que incluye los espacios correspondientes para los conectores de nueve y quince pins que requieren el *Peltier*, el termistor y el TA; una segunda tapa lateral sin perforaciones y finalmente una tapa vertical que incluye los orificios para la entrada y salida del láser. Esta última tapa se propone a partir de una hoja metálica de aluminio doblada. Los planos de estas piezas se encuentran en el Apéndice A.

Además se pensó en un sistema adicional de enfriamiento, cuya operación es opcional. Este sistema funciona mediante circulación de agua, está conformado por un hoyo que atraviesa a la base por debajo del peltier a través del cual circularía agua, por lo que cuenta con dos conectores de manguera de 8mm, la perforación se encuentra casi debajo del disipador térmico e inmediatamente debajo del Peltier, buscando que la primer pieza siempre se encuentre a las temperaturas adecuadas. De conectarse agua, se utilizaría el sistema de circulación de agua refrigerada que ya existe en el laboratorio. Como veremos más adelante, esta medida preventiva resultó no ser necesaria pues el Peltier y el heatsink, resultaron ser suficientes para disipar eficientemente el calor del TA.

# Capítulo 5

## Montaje y procedimientos previos

*“I was late for this, late for that, late for the love of my life”*

**Cleopatra, The Lumineers**

A lo largo de este capítulo se presentará la metodología propuesta para el montaje de las piezas y los procedimientos previos que requieren cada una de ellas ya sea antes o durante el armado. También se incluirán los procedimientos de uso de las piezas compradas comercialmente y se describirán los mecanismos de sintonización y optimización realizados en esta etapa. Asimismo, se incluirán detalles a tener en cuenta con el manejo de las distintas componentes. Sin embargo, la primer sección de este capítulo busca presentar brevemente la construcción o maquinado de las piezas.

### 5.1. Construcción

En la presente sección se describen los procesos llevados a cabo para la construcción de las piezas que se describieron en el capítulo anterior. Se anotarán además algunas de las precauciones que deben tenerse durante su fabricación. El maquinado de las piezas se recomienda llevarse a cabo en un taller mecánico que cuente con torno y fresadora.

Las piezas utilizadas en esta tesis fueron maquinadas por la empresa Seman Baker S.A. de C.V., quienes realizaron un trabajo de alta calidad y con quienes estamos altamente agradecidos.

Los materiales propuestos, como puede leerse en los planos, son aluminio y cobre. Por la facilidad para manejarlos y trabajarlos que tienen ambos materiales se pueden realizar algunas modificaciones posteriores a su fabricación. Particularmente la base para la lente cilíndrica se construyó en el laboratorio, únicamente se necesitaron brocas de 4mm y 1/8' de diámetro, una lámina de aluminio de 1/4' de ancho y el machuelo para la cuerda de los hoyos en el centro de la pieza.

Los componentes electrónicos, como el circuito de protección y todas las conexiones eléctricas también fueron realizadas en el laboratorio.

## 5.2. Ensamblado del MOPA

Comenzaremos con una descripción del montaje y ensamblado de todas las piezas que conforman al MOPA, hay ilustraciones para la mayoría de los pasos. Algunos de estos pasos van acompañados de procedimientos que se describen más adelante en este capítulo. Consideramos que para este momento, todas las piezas han sido maquinadas o adquiridas y están listas para ser utilizadas. También se han llevado a cabo pruebas como la correcta circulación de agua por el mecanismo de enfriamiento adicional, se describe más adelante este procedimiento a detalle.

El primer paso es de los más difíciles y que mayor precaución conllevan durante su realización, este primer paso consiste en la colocación del TA. Iniciamos fijando el TA al disipador térmico, para ello se utilizan dos tornillos que entran por debajo del disipador y fijan el TA en su posición, hemos ya colocado pasta térmica en la unión de ambas partes. A continuación atornillamos el termistor al disipador, a este también le hemos colocado pasta térmica en el tornillo y en el área de contacto con el disipador térmico, se recomienda que se coloque al lado contrario al que se plantea colocar la tapa con los circuitos. Podemos ver estos dos pasos en la Figura (5.1).

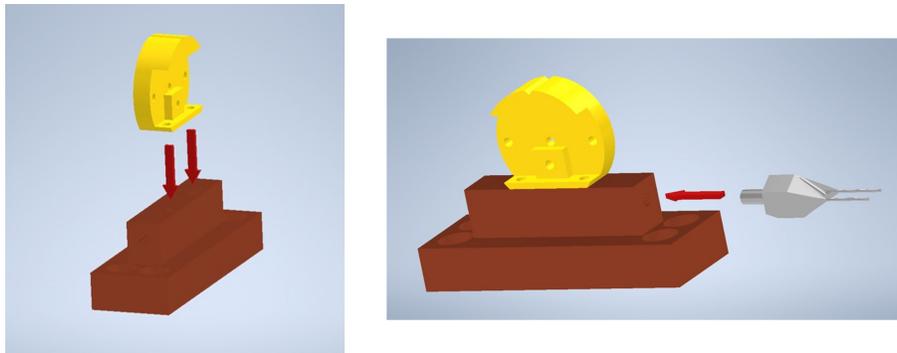


Figura 5.1: Esquema que muestra el armado del TA junto con el Heat Sink y el termistor. En ambas imágenes el disipador térmico es de color cobre, la montura C es de color amarillo y el termistor es plateado.

A continuación debemos montar estas piezas a la base, para ello primero colocamos el Peltier en la base. Identificamos el lado que enfría y el lado que calienta, y nos aseguramos de colocar pasta térmica en el lado que calienta para entonces posicionar el Peltier en el surco cuadrangular de la base, teniendo cuidado con los cables. Ya en esta posición, montamos el disipador térmico sobre el Peltier y fijamos con tornillos de nylon. Se utilizan tornillos de nylon para evitar la conducción eléctrica entre la base y el TA, que como mencionamos antes el Peltier también es aislante e impide dicha conducción entre la base y el disipador térmico, consecuentemente separamos eléctricamente al TA de la base y el resto de componentes; teniendo esto en cuenta debemos asegurarnos que no haya contacto alguno entre el disipador térmico y la base. Atornillamos en cruz, y cuidando la fuerza ejercida pues son frágiles estos tornillos y no aguantan mucho torque. Este procedimiento se muestra en la Figura (5.2).

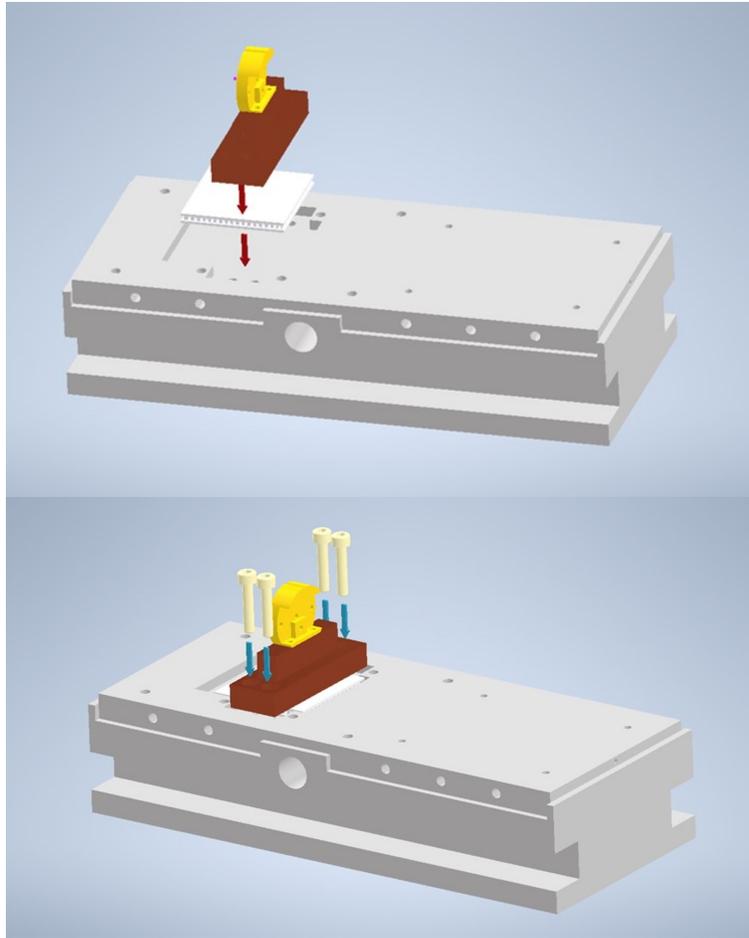


Figura 5.2: Procedimiento de armado del heat sink con el Peltier a la base. En esta secuencia tenemos cinco elementos: la base de color gris, el Peltier de color blanco, el heat sink de color cobre, el TA en la montura C de color amarillo y finalmente los tornillos de nylon de color hueso.

Enseguida debemos realizar las conexiones hacía el controlador de corriente y temperatura, ciertamente, las características específicas de estas conexiones dependerán del controlador que se utilice y deberán modificarse si se utiliza otro tipo de controlador. Como ya se mencionó, nosotros utilizamos un controlador comercial, marca **Moglabs** modelo **LDD605**, y los conectores que aquí presentamos corresponden a las especificaciones de éste. En particular, se utiliza un conector DB9 de 9 pins para la parte de temperatura y un conector tipo DB15 de 15 pins para la parte de corriente en el TA, se anexa el datasheet de nuestro controlador en el Apéndice D, su manual puede encontrarse en la referencia [63].

En este paso se considera que ya se realizaron las pruebas previas que se describen en este capítulo. Ya se sintonizó el Peltier, se realizaron las pruebas de temperatura y se instaló el circuito de protección. Todo esto se describirá con mayor detalle en las siguientes secciones de este capítulo. Entonces, fijamos los conectores de nueve y quince pins en la tapa lateral con sus respectivos cables y realizamos las conexiones hacía el termistor, el heat sink y el Peltier. El ensamble de la tapa lateral junto con

los conectores se encuentra en la Figura (5.3). Después de estas acciones, es cuando ya podemos colocar el MOPA en el lugar que ocupará en la mesa óptica para su operación en el experimento. Conectamos los cables hacia el controlador y revisamos que funcione correctamente el TA.

Es importante mencionar que las conexiones que aquí se ilustran y enlistan son únicas para el controlador **LDD605** de la marca *Moglabs*. Como podemos ver en la Figura (5.3), los dos conectores para 9 y 15 pins, llevan consigo las conexiones necesarias para la lectura de temperatura y corriente, así como las conexiones para llevar y controlar la corriente en el TA y la temperatura en el Peltier. También es importante señalar que el circuito de protección recibe estas conexiones y se conecta directamente con los pines respectivos.

El controlador que utilizamos en esta tesis nos sirve para controlar láseres de diodo o amplificadores a alta potencia, con muy poco ruido durante la inyección de corriente y cuenta además con el control de temperatura mediante un Peltier externa. De no contar con este controlador se necesitan dos componentes o controladores que deberán comprarse o construirse, estos son un controlador de corriente que nos permita inyectar corrientes hasta 1.5A, teniendo un error de 0.5 %, dicha fuente debe tener una alta estabilidad para reducir las variaciones en la amplificación del láser y un controlador de temperatura que mantenga siempre la temperatura ideal para el funcionamiento del TA, es decir estabilice el láser, en nuestro caso es de 20°C, con una estabilidad de  $\pm 5\text{mK}/^\circ\text{C}$ . Para más información sobre como realizar estos circuitos recomendamos la referencia [64].

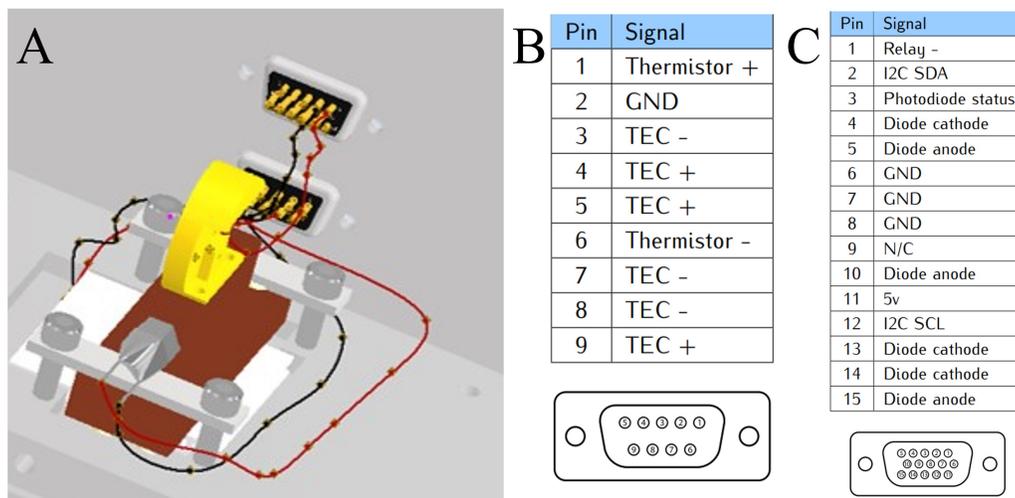


Figura 5.3: A) Diagrama simplificado de la montura de los conectores junto con la tapa lateral y las correspondientes conexiones de cables que llevan. Se muestran dos conectores, uno de 9 pins y otro de 15, ambos hembras. Estos dos conectores se utilizan para los dos cables que utiliza el controlador *LDD605*, el de 9 Pins lleva el control de temperatura y el de 15 lleva el control de corriente, ambos con sus respectivas lecturas. B) y C) Esquemas de las conexiones para cada pin. Tomados de la referencia [63].

Hacia el final del montaje llega el momento de colocar las lentes, tanto la cilíndrica como las esféricas, empezaremos con las segundas, que ya las hemos montado pre-

viamente en sus monturas trasladadoras como se mostró en la Sección 4.1.2 y en las respectivas Figuras (4.4) y (4.5). Recomendamos dejar las monturas lo más pegadas a los soportes durante este proceso, para evitar cualquier contacto no deseado con el TA. Entonces se fijan los soportes en su lugar con tornillos, tal como se muestra en la Figura (5.4). El siguiente paso consiste en posicionar las lentes en la mejor posición, es decir garantizar que la luz entra al TA y que a la salida la segunda lente esférica está enfocando la luz correctamente, la descripción de este proceso se describe en el siguiente capítulo, en la Sección 6.1.

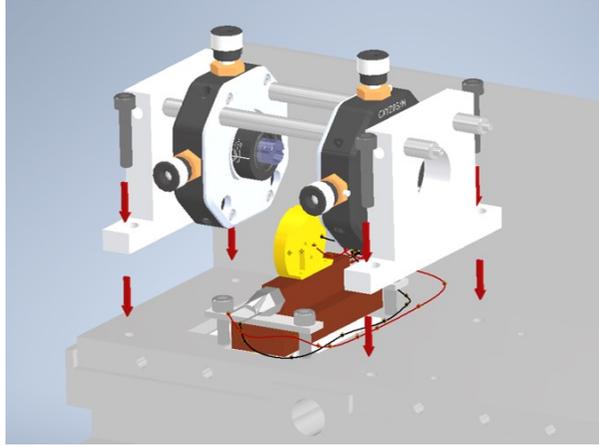


Figura 5.4: Ensamble de las monturas de las lentes esféricas, se debe tener cuidado con los cables.

Ahora, debemos colocar la lente cilíndrica. Comenzamos colocando su base y fijándola con tornillos, entonces, colocamos la lente cilíndrica en su posición y la fijamos con un tornillo a uno de los distintos agujeros con cuerda con los que cuenta su base. Estos dos pasos los podemos ver en la Figura (5.5), la posición de la lente cilíndrica depende de su foco.

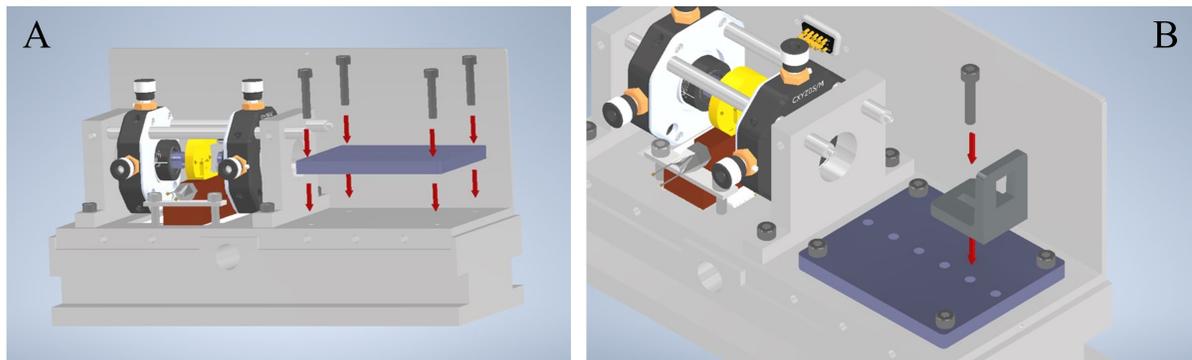


Figura 5.5: Montaje de la base y lente cilíndrica. La Figura A, muestra como debe montarse la base. La B muestra la forma de colocar la lente cilíndrica, para su buen funcionamiento.

Finalmente, colocamos las tapas para cerrar el MOPA, impedir que entren partículas no deseadas y proteger al usuario de los haces láser. Entonces estamos listos para

utilizar nuestro MOPA. Sin embargo, como se mencionó al inicio de este capítulo, se deben llevar a cabo una serie de procedimientos previos que nos asegurarán un óptimo funcionamiento, éstos se muestran en la siguiente sección del presente capítulo.

### 5.3. Procedimientos Previos

En la presente sección se describirán cuatro procedimientos previos que deben realizarse antes de montar el MOPA. Estos procedimientos son los siguientes: *sintonización PID del Peltier, pruebas de temperatura, circuito de protección y montaje del TA y circulación de agua.*

Es importante señalar que el mecanismo de enfriamiento mediante circulación de agua, es una medida de precaución adicional y no es indispensable para el funcionamiento del MOPA.

Debido a que involucra manejar agua, el primero en realizarse es el último de la lista, una vez que se comprueba que el mecanismo de enfriamiento no presenta fugas y puede ser utilizado es momento de preparar el MOPA, por ello debemos sintonizar el controlador PID del Peltier para el mejor funcionamiento de ésta. A continuación, se realizaron pruebas de temperatura para conocer los límites de funcionamiento del MOPA. Después de realizar estos dos procedimientos previos se puede saber si será necesario utilizar el mecanismo de enfriamiento mediante circulación de agua, como en nuestro caso la respuesta fue negativa, todos los resultados que se muestran en el siguiente capítulo fueron llevados a cabo sin que este mecanismo estuviera en operación. Finalmente, debe instalarse el circuito de protección del TA y se monta éste para llevar a cabo las medidas de caracterización.

#### 5.3.1. Sintonización PID del Peltier

El primer procedimiento previo consiste en sintonizar el Peltier con el controlador de corriente y temperatura para optimizar los parámetros de su controlador PID y que nos brinde el mejor funcionamiento durante su operación.

Para realizar estas pruebas debemos montar el Peltier, el disipador térmico con el termistor y una montura C (que tenemos sin TA para realizar pruebas) en sus lugares en la base y preparar las conexiones del control de temperatura. Éste último paso consiste en conectar los cables del Peltier y las terminales del termistor al conector DB9 que previamente se fija a una de las tapas laterales. Al montar estas piezas en su lugar también es necesario aplicar las correspondientes pastas térmicas en las uniones del Peltier con el disipador, del disipador con la montura y en la cuerda del tornillo del termistor.

El sistema de control de temperatura en el MOPA funciona de la siguiente manera: el termistor lee la temperatura del TA, al controlador se le indica a qué temperatura se necesita el sistema y este envía la diferencia de voltaje necesaria para que el Peltier se caliente o se enfríe dependiendo el caso.

Se utilizará el controlador de **Moglabs** modelo *LDD 605*, este modelo nos permite manejar tanto el control de temperatura del MOPA como la corriente suministrada

al TA. Esto nos da grandes ventajas y acelera el proceso de sintonización, pues el controlador puede conectarse a la red de internet del laboratorio y recibir indicaciones desde una computadora en la misma red, método que se utilizó para este proceso.

Al conectar ambas a la misma red, se podía utilizar la aplicación de Moglabs diseñada para encontrar y comandar al controlador o a través de programas en *Python*. Debido al gran apoyo que brindó el Dr. Asaf Mandoki al compartir con nosotros los programas que él había creado para este mismo modelo de controlador que él utiliza en su experimento, decidimos optar por el uso de estos programas en Python a través de los cuales se ajustaron los parámetros PID del controlador de temperatura. Estos programas se encuentran en su totalidad en el Apéndice B.

Haré una breve descripción de qué es un controlador PID. Un controlador PID, (*Controlador Proporcional, Integral y Derivativo*), es un mecanismo de control que a través de un proceso de retroalimentación permite regular una variable de un proceso en general; minimizando la diferencia entre el parámetro de la variable que deseamos y el parámetro de dicha variable que medimos, a esta diferencia se le conoce como señal de error. Particularmente, nuestro controlador se encarga de regular la diferencia de voltaje en el Peltier para obtener de ésta la temperatura deseada. Como su nombre lo indica hay tres parámetros que se pueden cambiar, uno proporcional que depende del error actual, uno integral que depende de los errores pasados y finalmente uno derivativo que predice los errores en el futuro [62].

Buscamos ajustar estos parámetros para llegar lo más rápido y de forma estable a la temperatura deseada. Para ello hemos decidido aplicar el *método de Ziegler-Nichols* [35], que a partir de un ensayo del sistema, es decir después de correr el sistema podemos calcular los parámetros necesarios, éste método es también muy útil cuando no se conoce el modelo matemático que rige el comportamiento del sistema. Existen dos métodos, conocidos como reglas de sintonía de Ziegler-Nichols, que dependen del comportamiento que tenga el sistema. Por ello, después de correr el sistema y ver el comportamiento podemos ver que tipo de curva nos arroja.

Entonces como podemos ver en la Figura (5.6), el comportamiento inicial del sistema es el que se tiene en la parte A, donde el control del PID empieza en  $15^{\circ}\text{C}$  y mandamos el cambio a la temperatura de operación  $20^{\circ}\text{C}$ . Tal que, podemos ver las oscilaciones que presenta el sistema por si mismo. Sabíamos entonces que lo que buscamos era un comportamiento como el que se muestra en la parte B, con cambios inmediatos y sin oscilaciones, para cualquier temperatura. Identificamos entonces dos comportamientos importantes para sintonizar nuestro controlador PID. El primero de ellos es la curva en forma de S que podemos ver en la parte C, que utilizando el método de sintonía de Ziegler-Nichols podemos cambiar hasta llegar a un comportamiento lo más cercano a la parte B. Y finalmente, tenemos el overshoot inicial que al mandar el cambio de temperatura se eleva alrededor de dos grados más de lo esperado y de ahí comienza a oscilar hasta llegar al valor deseado, como podemos ver en la parte D. Dicho overshoot no es deseado y necesitamos eliminarlo.

Comenzamos entonces con la sintonización del PID, que nos dejará un comportamiento en el sistema como podemos ver en la Figura (5.6) parte B. Sabemos que el TA funciona a  $20^{\circ}\text{C}$ , por lo que decidimos hacer la sintonización moviéndonos entre dos valores cercanos a este, siendo:  $20.5^{\circ}\text{C} \rightarrow 19.5^{\circ}\text{C}$ . Al saber que tipo de curva

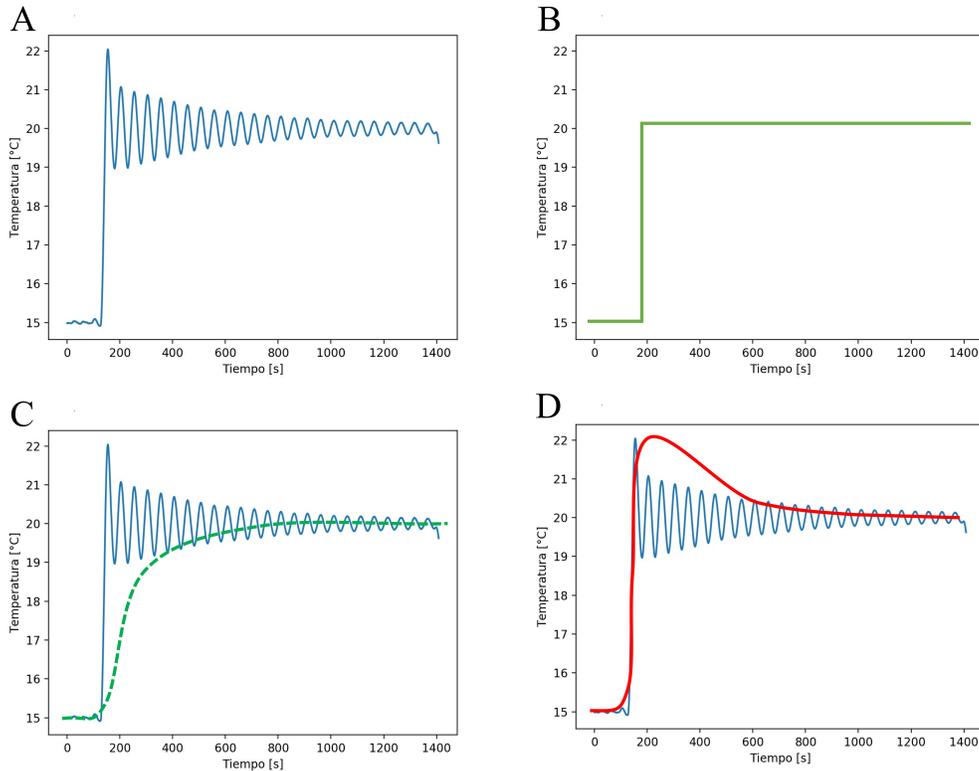


Figura 5.6: A) Comportamiento inicial del sistema, los valores de PID son los que trae el controlador por default:  $P = 125$ ,  $I = 500$ ,  $D = 400$ . Además manda una temperatura inicial de  $15^\circ$  B) Es el comportamiento deseado, siendo entonces la curva que mandaremos al sistema. C) Tenemos el comportamiento de escalón  $S$  que podemos ver en la Figura (5.7). D) La curva roja nos muestra el overshoot que tiene el sistema, pues enviamos una temperatura de  $20^\circ$  y al inicio tenemos una temperatura mucho mayor.

tenemos basta con mirar la Figura (5.7) y medir los valores de las variables  $L$  y  $T$ .

Encontramos que los valores para  $T$  y  $L$  son 55 y 4 respectivamente.

Para determinar estos valores debemos trazar una línea tangente al punto de inflexión de la curva, está línea cruzará al cero en el eje de las abscisas tal que la distancia que exista del eje de las ordenadas a este punto será el valor  $L$ . Ahora vemos en que valor se estabiliza (el valor deseado) nuestro escalón, trazamos una recta paralela al eje horizontal que cruce este valor, y entonces vemos donde cruza la línea tangente con esta recta. El valor de  $T$  será la distancia del cero anterior con este nuevo cruce.

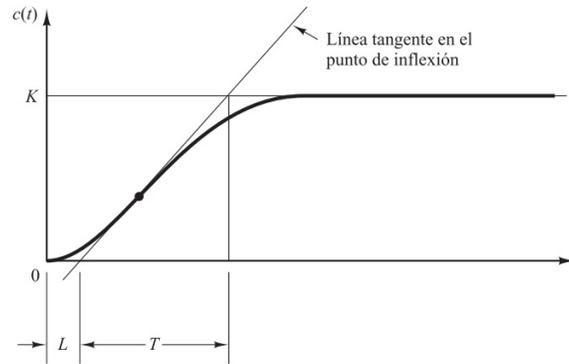


Figura 5.7: Curva de respuesta del sistema en forma de S, respuesta escalón. Nos indica los valores que debemos medir para poder calcular los valores numéricos que debemos dar a los parámetros. Tomada de la referencia [62]

Mirando las ecuaciones de la Tabla (5.1), podemos calcular los mejores valores para los parámetros P, I y D. Aunque, una vez que aplicamos esos valores siempre es bueno moverse un poco y variar ligeramente los valores buscando mejorar los resultados.

Tabla 5.1: Ecuaciones para determinar los valores de los parámetros P, I y D, según el método de Ziegler-Nichols.

Parámetro a Controlar	P	I	D
Ecuación	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Después de cambiar los parámetros PID aplicando estas ecuaciones, y utilizando los programas que se encuentran en el apéndice B, llegamos a los valores finales que debían tener siendo estos:  $P = 32$ ,  $I = 4$ ,  $D = 200$ , estos valores son adimensionales y únicos de éste sistema, cualquier otro sistema presentará distintos valores para las variables del controlador PID. Teniendo así el mejor comportamiento después de realizar más de treinta corridas del sistema con distintos valores.

Es importante observarla escala en la Figura (5.8), pues es importante para notar que oscila muy poco y que además llega rápidamente y sin *overshoots* que la eleven de golpe al llegar ahí. Al dejar fijos estos parámetros, continuamos con las siguientes pruebas que veremos en la siguiente sección.

### 5.3.2. Pruebas de Temperatura

Como sabemos al estar en funcionamiento el TA, se genera mucho calor debido a la corriente que circula, por ello, antes de instalar al TA, nos aseguramos de que el sistema soportase las altas temperaturas y lograrse mantener la temperatura propuesta. Para ello, realizamos una prueba utilizando una resistencia capaz de llegar a más  $100^{\circ}C$ , colocándola en una montura C sin TA (que existía en el laboratorio) y corriendo el sistema de control de temperatura anteriormente optimizado.

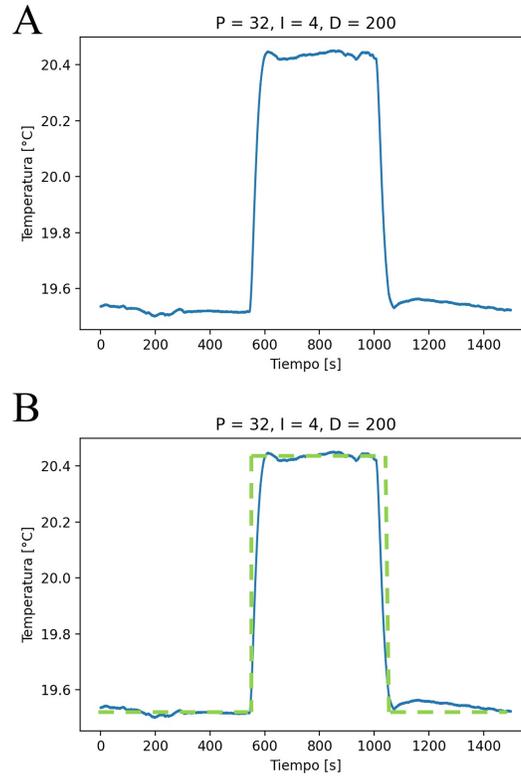


Figura 5.8: A) Comportamiento final del sistema, los valores de PID son los:  $P = 32$ ,  $I = 4$ ,  $D = 200$ . B) Mostramos la curva que enviamos al sistema. Primero mandamos condiciones iniciales a  $19.5^{\circ}\text{C}$ , después aumentamos la temperatura en un grado y lo dejamos en dicha temperatura por unos 400s, para ver su comportamiento, finalmente regresamos a la temperatura inicial para observar el comportamiento debido al cambio de temperaturas.

Para tener un mayor control del experimento, medimos a distintas temperaturas generadas por la resistencia y observamos la lectura de temperatura provista por el termistor. Para cada una de las temperaturas dejamos correr el sistema un poco más de cinco minutos, para observar si el control de temperatura fallaba. Este intervalo temporal fue elegido pues es el tiempo que se usó para sintonizar el PID. A continuación en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Temperatura en la Montura C, al calentarla con una resistencia y manteniendo el control de temperatura encendido. \*La incertidumbre asociada a estas dos medidas corresponde a  $\pm 0.1^{\circ}C$  ya que es la mínima escala del termistor. \*\*La incertidumbre corresponde a la mínima escala de la fuente de corriente

Temperatura en la Resistencia* $^{\circ}C$	Corriente en la Resistencia** $A$	Temperatura del Controlador $^{\circ}C$	Temperatura Máxima en la Montura* $^{\circ}C$
55.4	0.61	20.0	22.6
66	0.72	20.0	22.8
80.4	0.75	20.0	22.8
90.2	0.80	20.0	23.5

Es importante notar que aunque la temperatura subió en la montura, no fue por mucho, con lo que podemos concluir que el sistema completo incluido el disipador de calor y la base del MOPA funcionan de buena manera. Concluida esta prueba, fue momento de terminar el armado del MOPA, esto se describirá en la siguiente sección.

### 5.3.3. Circuito de Protección y montaje del TA

Después de comprobar que el control de temperatura funciona correctamente es momento de montar el TA, esto incluye los siguientes pasos que a continuación describiré detalladamente.

El primero de estos, y que se realizó en simultáneo con otras actividades, fue el diseño y construcción de un circuito de protección para el TA, que lo protege de fluctuaciones en la corriente, el diseño se basó en el que se presenta en el trabajo de Matthias Fuchs [38], el esquema del circuito diseñado para este MOPA se puede ver en la Figura (5.11), que se encuentra al final del capítulo. En dicho esquema se muestran los componentes utilizados junto con el diagrama del circuito electrónico que puede ser replicado tal como se presenta.

El circuito se diseñó y construyó para poder ser instalado en la tapa lateral donde van los conectores del controlador. Esto se puede ver en la Figura (5.9).



- Posicionar el disipador sobre el Peltier, ya con la montura fija, y asegurar su posición con tornillos de nylon en los cuatro hoyos que tiene la pieza.

Al momento de atornillar los tornillos de nylon se debe hacer con cuidado pues estos pueden llegar a romperse. Se recomienda atornillar en cruz y contar las vueltas en cada uno.

- Una vez fijo deben soldarse los dos cables que llevan la corriente al TA. Este proceso debe realizarse con soldadura con la menor concentración de plomo o sin éste. Colocamos un extractor pues el humo resultante de la soldadura no debe llegar de ninguna manera al TA. Se soldó en el lado opuesto de la montura al que tiene el TA.

El proceso de soldadura debe ser rápido.

- Atornillar el termistor en su posición, ya con sus cables soldados.

Una vez montado el TA y con todas las conexiones aseguradas, es momento de alimentar de corriente el TA y ponerlo en funcionamiento. Este momento es conocido como *primera luz*, será descrito en el siguiente capítulo.

A continuación, en la Figura 5.10 mostramos una fotografía del MOPA ya armado y con todos los componentes montados y probados para su óptimo desempeño, que podemos comparar directamente con el modelo 3D del diseño que se observa en la Figura 3.6. Y finalmente se agrega un diagrama completo del circuito de protección, donde se observan todos los componentes en sus respectivas posiciones, podemos verlo en la Figura 5.11.

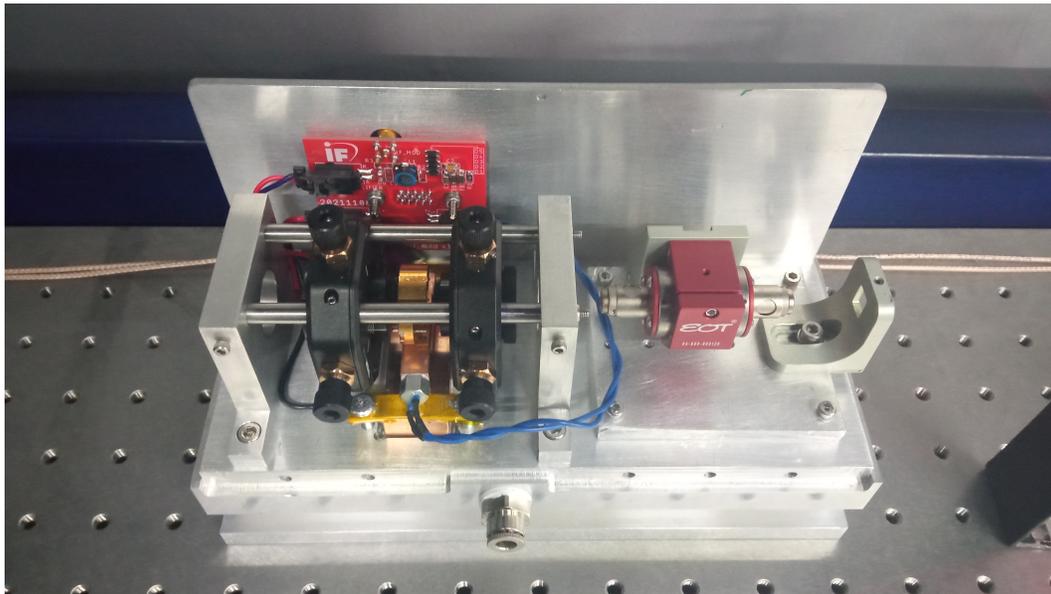


Figura 5.10: Fotografía del MOPA completamente armado y listo para ser operado. Se omiten la tapa superior y una de las laterales para que se puedan observar todos los componentes.

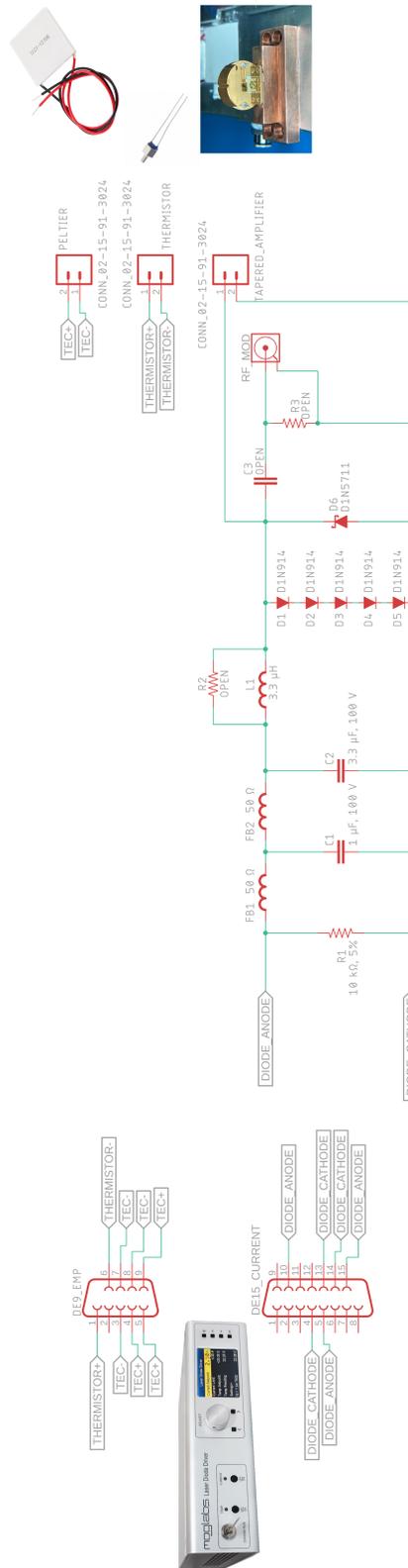


Figura 5.11: Diagrama esquemático del circuito de protección para el TA, diseñado y construido en el IF. Se etiquetan todos los componentes utilizados y se ilustran los dispositivos a los que se conecta el circuito. El diseño puede cambiarse para atender necesidades de distintos modelos y diseños.

# Capítulo 6

## Resultados, caracterización del MOPA

*“...Nature does nothing in vain, and more is in vain when less will serve; for Nature is pleased with simplicity, and affects not the pomp of superfluous causes.”*

**Isaac Newton**

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos al término de la construcción del MOPA, estos resultados incluyen la caracterización del MOPA en su totalidad. Comenzaremos con el momento llamado *primera luz*, enseguida se presentará la montura de las lentes esféricas y el arreglo óptico para realizar las pruebas de caracterización. Finalmente se presentarán los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas.

### 6.1. Primer inyección

Sin duda alguna uno de los momentos de mayor tensión y de gran importancia fue la conexión exitosa del TA al controlador y la emisión de la primera luz, ya que nos indicó que los procedimientos descritos en la sección anterior fueron realizados con éxito. Esta primera emisión de luz nos indicó que estábamos listos para la primera inyección, que consiste en inyectar el láser semilla en el TA y comprobar que funciona correctamente.

Para que el TA emitiera la primera luz, correspondiente a emisión espontánea, se conectaron los cables que se dirigen al controlador y se comprobó que no hubiera continuidad eléctrica entre la montura y la base que pudiese causar un corto, entonces se envió una pequeña corriente desde este. Esta primera luz la podemos ver en la Figura (6.1) y corresponde a la emisión espontánea. Notamos que desde que se prende el controlador, una pequeña corriente de  $\sim 3\text{mA}$  comienza a circular por el aparato, al ser una corriente tan pequeña es despreciable y no debe preocupar a quien este operando un MOPA.

Enseguida comenzó el procedimiento para llevar a cabo la primera inyección. Por ello, se definió el siguiente procedimiento para el encendido y apagado del MOPA, que se siguió para todas las medidas y todos los días en los cuales se llevaron a

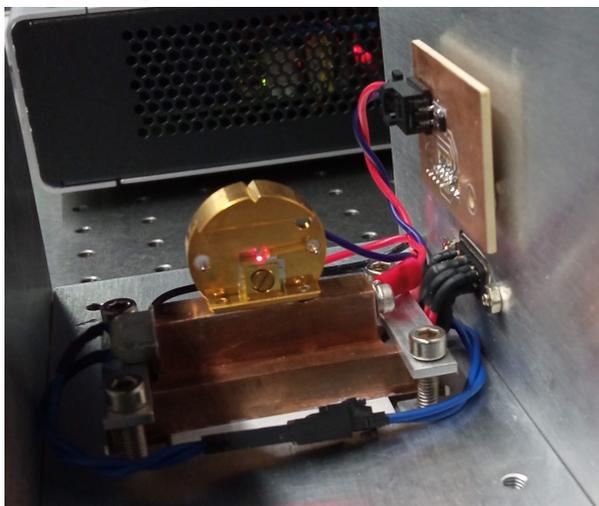


Figura 6.1: Fotografía del momento en que el TA emitió la primera luz. En la presente fotografía se omitieron las lentes para mostrar con claridad el funcionamiento del TA.

cabo mediciones. Este procedimiento está basado en los pasos que se siguen en el laboratorio para encender y apagar los MOPAs del experimento.

#### **Procedimiento de Encendido**

- Encender el control de temperatura, y esperar a que llegue a  $T_{set}$
- Encender la corriente, menor a 400mA
- Esperar a la emisión espontánea, que como se mencionó es la luz que emitirá el amplificador cónico sin estar siendo inyectado por el láser semilla. Podemos ver esta luz en la Figura (6.1)
- Abrir la entrada, o dejar entrar el láser semilla y asegurarse que el acoplamiento es bueno
- Subir la corriente al valor deseado (o iniciar pruebas)

#### **Procedimiento de Apagado**

- Bajar corriente, menor a 400mA
- Cerrar la entrada, o impedir el paso del láser semilla
- Apagar la corriente
- Apagar el control de temperatura

Para poder inyectar la luz del láser semilla, se armó un pequeño arreglo óptico que se encarga de entregarnos la luz colimada e incluso con una polarización favorable a la entrada del MOPA, este arreglo se puede ver en la Figura (6.2).

Este arreglo nos permite gran control para la posición del láser a la entrada del MOPA con los dos espejos anteriores a éste. Pues con cada uno podemos alinear el

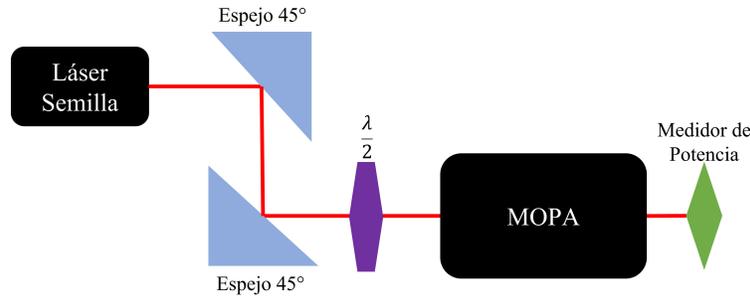


Figura 6.2: Diagrama correspondiente al arreglo óptico para la inyección del láser prueba al MOPA. Con los dos espejos se alinea el haz del láser semilla para que entre adecuadamente en el TA.

láser de prueba respecto al MOPA y el láser del MOPA (provocado por la emisión espontánea) respecto al láser semilla. El arreglo experimental se puede ver en la Figura (6.3).

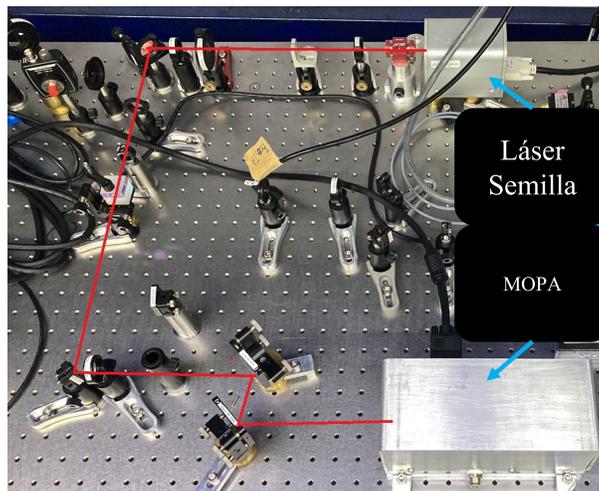


Figura 6.3: Arreglo óptico para la inyección del láser semilla al MOPA

Sin embargo, antes de realizar la primera inyección se montaron las lentes esféricas para poder focalizar el láser semilla en el TA, recordando que la entrada del chip es realmente pequeña, para tener un haz colimado a la salida del MOPA y porque el diseño de las monturas del MOPA nos obliga a montarlas en simultáneo. Las lentes esféricas se montan en un adaptador cilíndrico que luego se fija en las monturas, como ya se mostró en las Figuras (4.4) y (4.5). Después de realizar la montura de las lentes esféricas y colocarlas en su posición, teniendo mucho cuidado de no dañar el TA durante el proceso, es momento de inyectar el láser semilla.

El primer paso para inyectar el láser en el TA es colocar las lentes esféricas lo más cercanas a la posición en la cual focalizan en el TA. Este primer paso se realiza al darle una corriente de 400mA al TA, que deje la emisión espontánea con una intensidad suficiente para que sea visible ( $\sim 2\text{mW}$  de potencia a la salida) y así buscar que el haz colime en ambas salidas, el láser provocado por la emisión espontánea sale tanto

por la entrada como por la salida del TA. Las monturas de las lentes dan un control micrométrico XYZ que nos permiten ajustar completamente la posición de las lentes respecto al TA.

Como ya tenemos al TA encendido y las lentes en una primera buena posición es momento de inyectar, esto consiste en encender el láser semilla y dejarlo entrar al TA. Al hacerlo notamos que tenemos que alinear el haz para que entre al MOPA, este proceso debe realizarse cautelosamente y tratar de hacerlo únicamente moviendo los dos espejos previos a la entrada del MOPA y únicamente trasladarlos con los tornillos micrométricos de sus monturas.

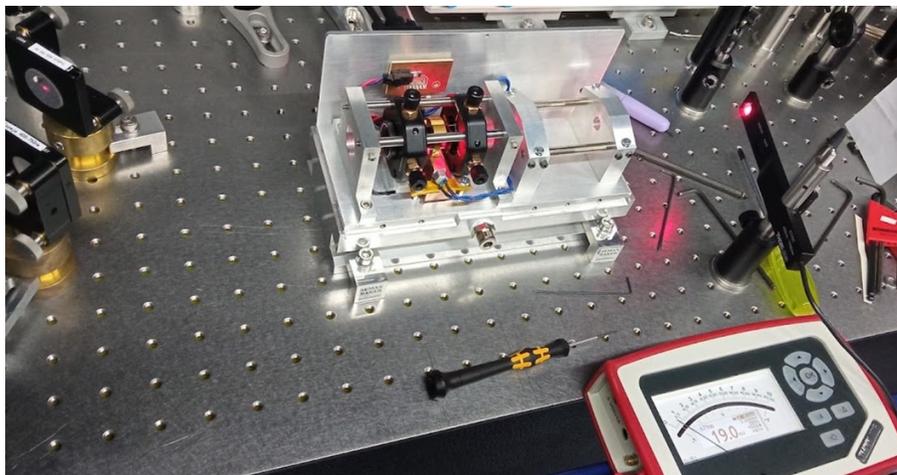


Figura 6.4: Fotografía de la primera inyección, antes del ajuste previo. Se puede ver en el medidor de potencia, dispositivo rojo con blanco en la parte inferior de la imagen que la potencia a la salida del MOPA es mayor a los 2mW correspondientes a la emisión espontánea, lo que nos indica que está teniendo lugar el proceso de amplificación de luz.

Al ver que la intensidad del haz aumenta a la salida, se puede ver a simple vista y midiendo con el medidor de potencia como se ve en la Figura (6.4), sabemos que es momento de ajustar las posiciones de las lentes y los espejos para tener el ajuste óptimo. Para conseguir esto nos basamos en el *data sheet*<sup>1</sup> del TA, que nos dice que cuando el láser inyectado viene con 10mW de potencia, debemos tener  $\sim 70\text{mW}$  a la salida si es que suministramos 400mA de corriente al TA.

## 6.2. Caracterización del MOPA

Es necesario caracterizar el MOPA bajo todas las circunstancias en las que será utilizado, por lo que utilizaremos este capítulo para mostrar dichas medidas de caracterización que se hicieron.

Las medidas que se mostrarán con mayor detalle a continuación incluyen aquellas que responden a la pregunta: *¿cómo varía la potencia de salida en función de...?* Tal

<sup>1</sup>Este data sheet, y otros necesarios para la realización de este trabajo, se encuentran en el Anexo D.

que se mostrará como varía ésta dependiendo de la potencia de entrada, la corriente del TA, el ángulo de polarización del haz semilla y la temperatura del TA. Finalmente se mostrarán mediciones de cómo es que cambia el modo espacial del haz a la salida del MOPA dependiendo de la distancia a la que lo observemos, la potencia de entrada y el desalineamiento de alguno de los componentes ópticos.

Es importante señalar el comportamiento del TA al ser inyectado con corriente eléctrica; como sabemos al llevar a cabo esta acción el amplificador cónico comenzará la emisión espontánea proveniente de la región de ganancia, esto sin ser inyectado por el láser semilla. Al ser inyectado por el láser semilla ocurre lo siguiente: conforme sea mayor la corriente suministrada al TA mayor será la emisión estimulada producida por éste. Sin embargo, de no ser inyectado, el TA no será capaz de convertir toda la corriente eléctrica en emisión espontánea, en su lugar transformará la corriente eléctrica por calor, que terminará por dañar al TA. Por ello debemos prestar atención a cuando tenemos corriente inyectada, pues de ser muy alta y no estar siendo bombeado por el láser semilla, el TA puede quemarse.

Durante los procesos de alineamiento la eficiencia de bombeo no será óptima, por ello es importante utilizar corrientes de inyección bajas para evitar que el TA se queme. Una vez que el alineamiento del TA ha sido optimizado podemos aumentar la corriente al valor de operación deseado sin riesgo de dañarlo.

Tenemos entonces dos condiciones de operación delimitadas por la corriente suministrada al TA. Éstas son a *baja* y *alta* corriente, es decir suministramos 400mA y 900mA de corriente al TA respectivamente.

- **Baja corriente**, utilizamos esta condición para alinear los haces y realizar pruebas de optimización, esto debido a que durante estos procesos se interrumpe constantemente la inyección de láser semilla al TA.
- **Alta corriente**, se utiliza esta condición cuando todo se ha alineado y el experimento se encuentra funcionando. Es la corriente necesaria para producir la potencia suficiente en los láseres al final de todo el recorrido a través de los componentes ópticos. Es importante no interrumpir la inyección de láser semilla al TA bajo esta condición pues podríamos dañarlo permanentemente.

Debemos mencionar las fuentes de error asociadas a las medidas, ahora se presentarán algunas de las que se muestran en casi todas las medidas de caracterización, sin embargo, también tenemos fuentes de error únicas. Principalmente existen errores aleatorios, relacionados a variaciones en los equipos, que se pueden prevenir simplemente asegurándonos que los valores que esperamos de cada uno de ellos exista al momento de realizar las mediciones.

Sabemos también la incertidumbre asociada a los aparatos de medición que empleamos. El Medidor de Potencia utilizado, fue de la marca *Thorlabs* modelo **PM100A** y está reportado que tiene una exactitud de  $\pm 3\%$ . El controlador de corriente, de la marca *Moglabs* modelo **LDD 605**, nos reporta que el display varía  $\pm 1\text{mA}$  del valor real. Mientras que el control de temperatura, provisto por el mismo controlador de corriente, varía en  $0.01^\circ\text{C}$  respecto a la lectura del display y el valor real [63, 65].

### 6.2.1. Potencia de salida para distintos valores de corriente en el TA

La primer medida que se llevó a cabo consiste en dejar fija la potencia de entrada proporcionada por el láser semilla e ir variando la corriente en el TA para ver como cambia la potencia de salida. Se fijaron distintas potencias de entrada y se ajustaban levemente los componentes ópticos para optimizar cada potencia de entrada.

Las potencias de entrada exploradas fueron: 10mW, 15mW, 20mW, 25mW y 30mW. El comportamiento de la potencia medida a la salida del MOPA se puede ver en la Figura (6.5).

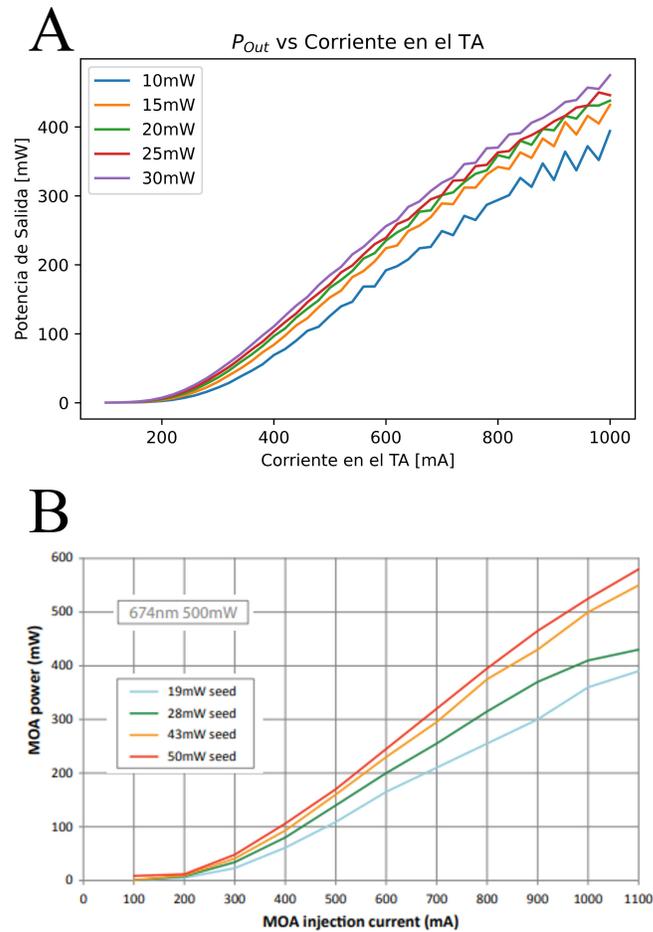


Figura 6.5: A) Potencia de salida en función de la corriente en el TA, para distintos valores de potencia de entrada. La incertidumbre para estas mediciones es del 3% para la medición en la potencia de salida, no se muestra para evitar una saturación gráfica. B) Potencia de salida en función de la corriente para un MOPA comercial.

Como podemos ver, el crecimiento de la potencia de salida es rápido y tenemos

valores muy cercanos a los reportados en el *data sheet*<sup>2</sup>, que además mostramos aquí en la Figura (6.5) B. Podemos decir que únicamente tenemos emisión espontánea hasta los 200mA de corriente en el TA, después de este punto tendremos también emisión estimulada.

Un fenómeno interesante que no se aprecia en los datos provistos por el fabricante es la aparición de picos. Nos dicen que podemos tener más potencia con menos corriente, por ejemplo, cercano a los 900mA de operación, que es el valor al que operan los MOPAs del experimento, tenemos un poco más de potencia si bajamos la corriente a 880mA o si subimos a 920mA, y este fenómeno se puede ver en muchas de las potencias de entrada, aunque vemos que es mucho más claro en potencias bajas. Particularmente este fenómeno no se encuentra reportado en ninguna referencia, pero podemos verlo en los otros MOPAs que ya se encuentran en el laboratorio.

La curva que nos resulta más interesante e importante para el experimento, es la que corresponde a 20mW de potencia de entrada, ya que los láseres que se utilizan en los esquemas de enfriamiento del experimento emiten a una potencia que se encuentra alrededor de este valor. Por lo tanto conocer como opera este MOPA para esos valores es importante, ya que de ser integrado a la salida de estos láseres sabemos que valores podemos esperar al optimizar.

### 6.2.2. Potencia de salida en función de la potencia de entrada

El siguiente resultado corresponde a la potencia de salida manteniendo fija la corriente en el TA y variando la potencia de entrada. Para variar la potencia de entrada necesitamos cambiar la corriente suministrada al láser semilla, se hizo en el intervalo de 10mW a 30mW, en pasos de 5mW.

Para altas potencias, 800mA y 900mA, se revisaron menos valores, ya que sabemos que es inseguro tener el TA funcionando con altas corrientes sin un haz inyectado. Sin embargo, como podemos ver en la Figura (6.6), el comportamiento se mantiene casi igual. Podemos ver que el valor de la potencia a la salida es constante.

---

<sup>2</sup>Este data sheet también se muestra en el Anexo D.

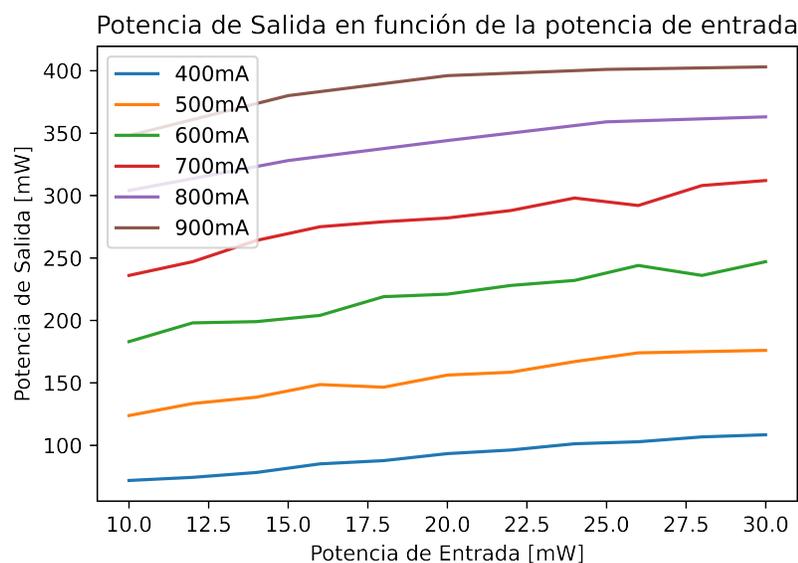


Figura 6.6: Potencia de salida en función de la potencia de entrada para distintos valores de corriente en el TA. No se muestra la incertidumbre pues es pequeña respecto a la escala de la gráfica.

Para asegurarnos que las condiciones del láser eran las mismas para cada medida, buscábamos colocar la corriente del láser prueba en el mismo valor para cada una de las iteraciones. Es importante notar que la potencia sube conforme subimos la potencia de entrada, pero es de manera lineal.

### 6.2.3. Potencia de salida en función de la temperatura

Como sabíamos desde que comenzamos con el diseño del MOPA, la temperatura de operación del TA es de suma importancia. Sabemos que si se encuentra a altas temperaturas puede llegar a descomponerse, mas, estamos interesados en conocer como es el desempeño de éste a distintas temperaturas. Como veremos se exploraron valores de temperatura cercanos a la temperatura de operación,  $20^{\circ}\text{C}$ , pues sabemos que de alejarnos mucho podemos dañar el TA.

Los valores escogidos de temperatura para ser probados fueron en un intervalo de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , se escogieron tres valores de potencia de entrada 10mW, 20mW y 30mW y se llevaron a cabo estas medidas en tres valores distintos de corriente en el TA: 400mW, 600mW y 800mW, esto para explorar el comportamiento en los distintos regímenes de operación que solemos tener en el laboratorio. Con un valor intermedio que es el correspondiente a 600mW.

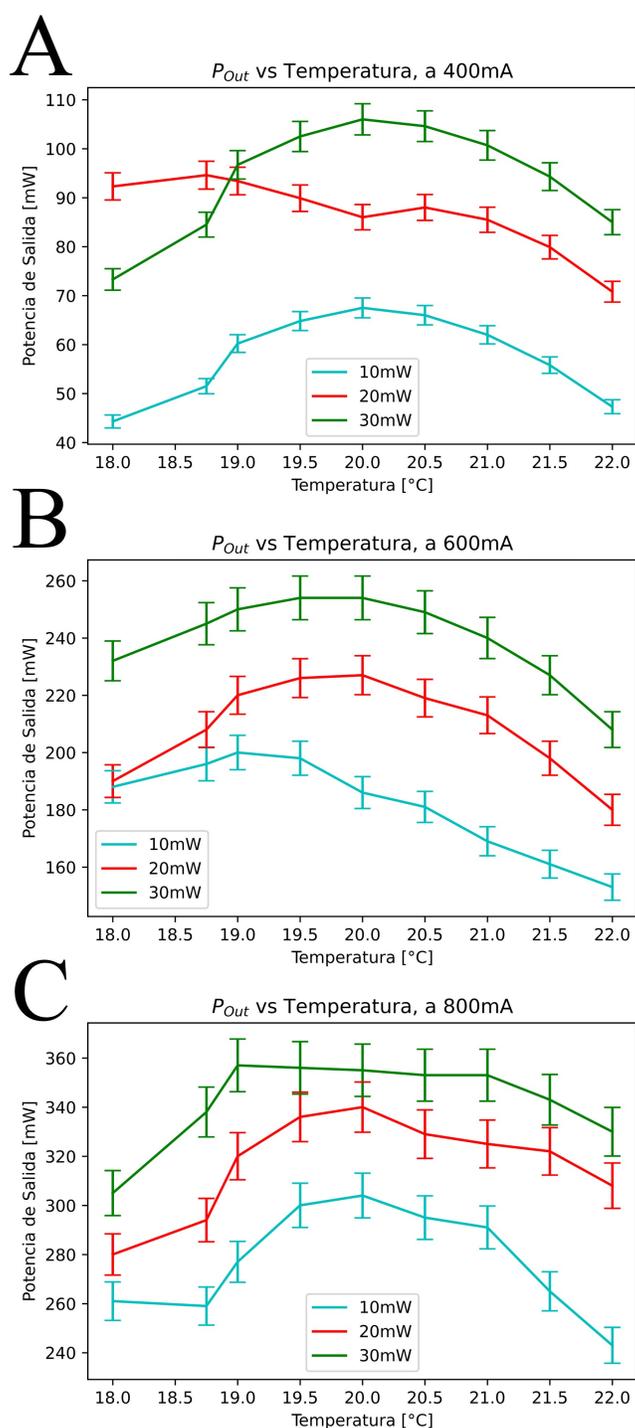


Figura 6.7: Potencia de salida en función de la temperatura del TA. A) con 400mA de corriente en el TA, B) con 600mA de corriente en el TA, C) con 800mA de corriente en el TA. La incertidumbre respecto a la temperatura es muy pequeña, por lo que no se muestra.

Podemos ver el desempeño del sistema para los tres valores de corriente en la Figura (6.7) y para cada valor de potencia. En los tres regímenes se puede apreciar

que el mejor rendimiento se da estando a  $20^{\circ}\text{C}$ , y que decae considerablemente si es que la temperatura en el TA aumenta.

En el régimen de alta corriente, Figura (6.7), imagen C, se tiene incluso un funcionamiento estable bajando la temperatura en la montura medio grado, lo que también se puede apreciar en el régimen intermedio, Figura (6.7), imagen B, aunque éste nos otorga un grado completo hacia abajo para operar.

Nuevamente la curva que tiene mucho interés para nosotros es la curva que nos representa el comportamiento del TA con una potencia de entrada alrededor de los 20mW, y podemos ver que en los regímenes de alta corriente el mejor valor es sin dudas a  $20^{\circ}\text{C}$ . En baja corriente tenemos un comportamiento distinto a los demás, mas no es nada que afecte el funcionamiento del MOPA.

En general, podemos notar que al aumentar la temperatura en el TA el comportamiento decae estrepitosamente. Y en la mayoría de los casos al reducir la temperatura lo suficiente también tenemos este mal funcionamiento.

#### 6.2.4. Potencia de salida en función del ángulo de polarización

La última medida en torno a la potencia de salida fue en función del ángulo de la polarización del haz a la entrada del MOPA. La polarización del haz del láser semilla es lineal, y lo que se hace es variar el ángulo de polarización con el que éste entra al TA. Para llevar a cabo esta medida, se utilizó un arreglo experimental que nos permitiera conocer el ángulo de polarización del haz.

Para conocer el ángulo de polarización del haz del láser prueba, se utilizaron dos componentes: una lámina retardadora de media onda, que de ahora en adelante abreviaremos y utilizaremos como:  $\frac{\lambda}{2}$  que se encarga de rotar un cierto ángulo la polarización de la luz que la atraviesa y un cubo cuya función es separar a la luz dependiendo su polarización, es decir separa a la polarización lineal en una componente horizontal y otra vertical (en relación a la orientación del cubo), la primera es transmitida por el cubo, mientras que la segunda es reflejada.

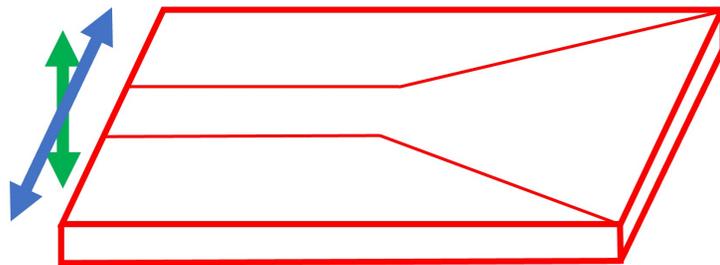


Figura 6.8: Convención que utilizamos para definir el ángulo de polarización del haz que entra al TA en función de la orientación respecto a éste, es decir la polarización que va con la flecha azul, corresponde a polarización horizontal, en tanto que la polarización de la flecha verde corresponde a la polarización vertical.

A continuación definimos entonces, como se puede ver en la Figura (6.8), como será la polarización horizontal y vertical respecto al TA. Y entonces calibramos la  $\frac{\lambda}{2}$ ,

para dicha convención. Finalmente utilizamos el arreglo experimental que se puede ver en la Figura (6.9), para medir como se comporta la potencia a la salida del MOPA en función del ángulo de polarización que tiene el haz del láser semilla.

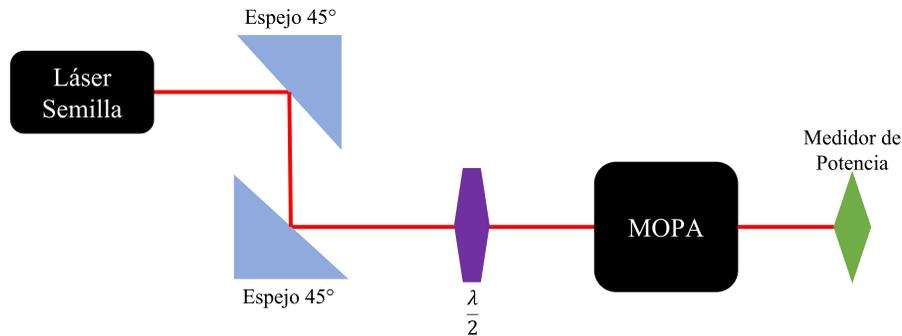


Figura 6.9: Diagrama del arreglo experimental utilizado para medir la potencia de salida en función del ángulo de polarización del haz proveniente del láser semilla.

Para estas medidas se trabajó a baja corriente, es decir  $400mA$ , ya que algunos ángulos de polarización tienen una eficiencia muy baja, lo que puede provocar que el TA se queme al ser inyectado ineficientemente. Podemos ver los resultados en la Figura (6.10).

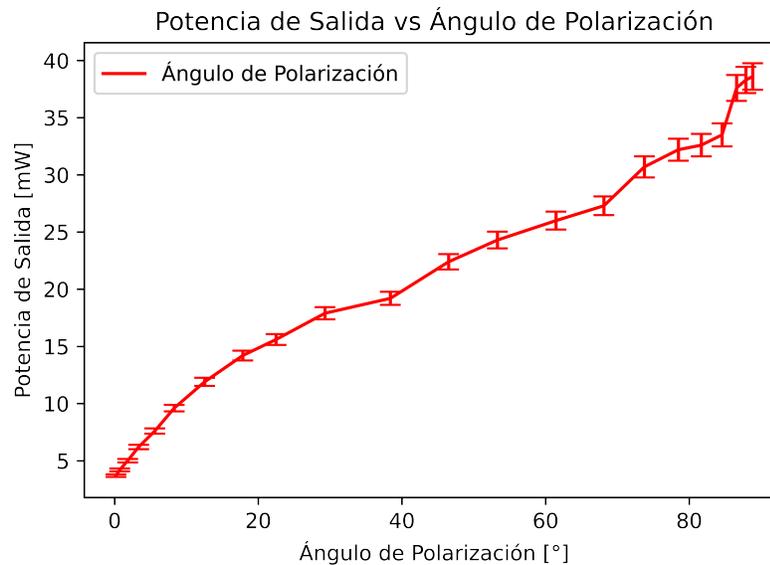


Figura 6.10: Gráfica de la potencia de salida en función del ángulo de polarización del haz del láser prueba. Se considera al ángulo  $0^\circ$  como el ángulo del haz que entra horizontalmente respecto al TA, como se definió en la Figura (6.8) y el ángulo  $\frac{\pi}{2}$  el ángulo del haz cuando entra verticalmente al TA.

Sobre este comportamiento podemos ver como al tener  $90^\circ$  o  $\frac{\pi}{2}$ , dada la convención que definimos en función del TA tenemos un máximo en la potencia lo que significa que nos conviene colocar una  $\frac{\lambda}{2}$  y buscar este ángulo cuando se utilice el MOPA.

Además tenemos un comportamiento lineal y periódico, la potencia disminuirá de los  $90^\circ$  a  $180^\circ$  y repetirá comportamiento en el siguiente intervalo de  $\frac{\pi}{2}$ .

### 6.2.5. Modo espacial

Finalmente una de las propiedades del láser que nos resulta de mucho interés es conocer como cambia el modo espacial de éste a la salida del MOPA bajo distintas circunstancias. Particularmente se caracterizó el modo en función de la distancia, la potencia de entrada y el desalineamiento, a lo largo de esta sección se explicará el arreglo óptico para cada una de las medidas y los procedimientos para llevarlas a cabo.

Definimos a continuación el significado de: *modo transversal/espacial de un láser*. Éste es el perfil del campo electromagnético en el plano ortogonal a la dirección de propagación, existe en el frente de onda electromagnética. Estos modos dependen de las condiciones de frontera que tengan las guías de onda. Estos modos son cuantizados y para un láser están descritos como la combinación de un perfil gaussiano y un polinomio de Laguerre. Representamos a los modos como  $TEM_{pl}$ , donde  $p$  y  $l$  indican los órdenes radial y angular del polinomio [29, 66].

Típicamente en un diodo láser como nuestro TA, el modo espacial suele ser uno de estos modos TEM que podemos aproximar mediante funciones matemáticas. Como los modos espaciales involucran funciones gaussianas podemos utilizar éstas para su estudio y descripción [29].

Para ver como varía el modo respecto a las distintas condiciones, se dispuso de un nuevo arreglo óptico, ahora a la salida del MOPA. Dicho arreglo consta de una componente de baja reflectividad que atenúa la luz que llega a la cámara CCD, con el fin de no saturarla. Este arreglo se puede ver en la Figura (6.11). Utilizamos una cámara CCD de **Thorlabs** modelo *DCC1545M*, sin embargo, esta cámara puede ser dañada fácilmente por lo que debemos asegurarnos que siempre le llegue luz con poca intensidad<sup>3</sup>, la componente reflejada, utiliza un filtro modelo *ND30A* que reduce la intensidad de la luz que llega a la cámara.

Con este arreglo se tomaron distintas fotografías que después fueron analizadas mediante el programa que se encuentra en el Apéndice B. Este programa ajusta distintas curvas al perfil fotográfico, lo que nos permite caracterizar la forma y el tamaño del haz.

Como pudimos ver al analizar las imágenes y como era esperado, el haz no es gaussiano<sup>4</sup>. Esto se puede ver en la Figura (6.12), donde podemos ver que en lo que llamamos modo horizontal el haz es un poco menos ancho y está más focalizado, en tanto que en el modo vertical tenemos varios puntos de alta densidad de luz y en general un modo alargado y poco puntual. Esto se ve en general para todas las medidas, como se puede apreciar en el Apéndice C.

---

<sup>3</sup>Dicha intensidad puede variar de modelo en modelo, y la información particular se encuentra en el datasheet de la cámara [67]. Para nosotros conocer la intensidad de la luz que tenemos basta con medir la potencia del haz, medir el área de éste y realizar el cálculo pertinente.

<sup>4</sup>A pesar de los arreglos ópticos que hicimos para tener un haz lo más cercano a esta distribución.

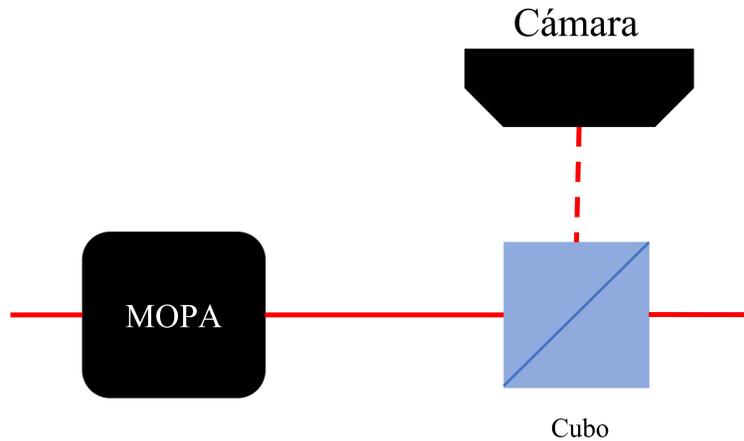


Figura 6.11: Diagrama del arreglo óptico necesario para fotografiar el haz a la salida del MOPA y poder estudiar el modo.

Para llevar a cabo el análisis ajustamos una curva gaussiana, al ser el perfil deseado queremos saber que tanto se acerca o difiere nuestro haz de dicha curva, y calculamos la anchura a media altura, *FWHM* por sus siglas en inglés, que es un parámetro que nos proporciona una medida del ancho del haz a lo largo de cada dirección y al calcular los anchos en ambas direcciones tenemos el área del modo que podemos comparar bajo diversos parámetros. Los resultados se presentan en las siguientes secciones, donde además se detallarán los resultados obtenidos.

Las imágenes capturadas por la cámara son como la que se puede ver en la Figura (6.12), definimos dos componentes de análisis: la componente vertical del modo y la componente horizontal del modo, estos fueron definidos respecto al arreglo óptico. La componente horizontal corresponde al modo en la dirección de la flecha roja, en tanto que la vertical al de la flecha azul. También es importante conocer la resolución de la cámara, esta información se encuentra en el manual de la misma y nos dice que: tenemos una resolución de  $1280 \times 1024$  pixeles, el área sensible de la cámara es de  $6.656 \times 5.325 \text{mm}^2$  y por lo tanto un pixel equivale a  $5.20 \mu\text{m}$  por lado. Este valor es vital para el análisis de los resultados mediante el programa, escrito en *Python*, pues se analizan las imágenes en función de los pixeles y la intensidad de colores que estos tengan [67].

Cuando tomamos una fotografía, los sensores generan una señal de voltaje proporcional a la luz que los impacta, esta señal se traduce a una escala de grises, además es continua, sin embargo, al digitalizar la imagen la señal continua, sin pasos, es convertida en un valor numérico. Las cámaras tienen rangos digitales que se cuentan en *bits*, es decir que si nuestro gradiente sin pasos es convertido a una imagen con resolución de 2 bits, para pasar del negro al blanco hay cuatro pasos. El modelo de cámara que utilizamos cuenta con 10bits, es decir para con 1024 niveles o pasos para transitar del negro al blanco.

Finalmente antes de comenzar con cada análisis de las tres pruebas realizadas, explicaré brevemente como es que se tratan las imágenes en los programas escritos,

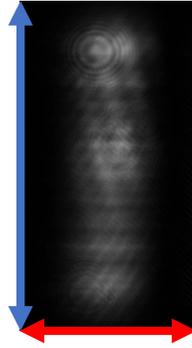


Figura 6.12: En esta imagen se muestra que eje corresponde al modo vertical y cual al eje horizontal.

estos se pueden ver en el Apéndice B. Después de ser tomadas las imágenes, éstas se cargan y transforman en arreglos matriciales, es decir la resolución nos da las dimensiones de la matriz. Por ejemplo, si tenemos una resolución de  $1280 \times 1024$ , tendremos una matriz con 1280 columnas y 1024 filas, lo que significa que cada pixel de la imagen equivale a una entrada en dicha matriz. El valor de dicha entrada se define en función del color y la intensidad que tenga este, siendo 0 un pixel completamente negro y 1024 un pixel blanco, a menor intensidad de blanco el valor es menor hasta llegar a cero. Así podemos tener una matriz de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 512 & 0 & 0 \\ 0 & 256 & 1024 & 64 & 0 \\ 0 & 0 & 512 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 128 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

a continuación sumamos los valores de las entradas por cada fila, y les asignamos un par asociado al número de fila que le corresponde. Algo que matemáticamente se ve así:

$$\begin{aligned} Par &= (\text{Número de Fila}, \sum \text{valores pixeles}) \\ &= (3, 1344) \end{aligned}$$

Graficamos todos los pares y a continuación ajustamos una o más curvas que se ajusten a su comportamiento. Sabemos que el perfil del haz no es gaussiano, pero como hemos mencionado anteriormente los modos espaciales del láser involucran perfiles gaussianos, por lo que podremos ajustar curvas gaussianas para poder caracterizar el comportamiento de nuestro haz. Ajustamos entonces una función gaussiana, como podemos ver en la ecuación 6.1:

$$f(x) = A + B \exp \left[ \frac{-(x - c)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (6.1)$$

donde  $A$  es el offset que tenga la curva,  $B$  es la altura,  $c$  es el centro y finalmente  $\sigma$  es la desviación estándar que utilizaremos más adelante.

De estas curvas con el mismo programa obtenemos el parámetro  $FWHM$ , mediante la expresión 6.2:

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma, \quad (6.2)$$

que de ahora en adelante llamaremos  $\sigma_x$  o  $\sigma_y$  para el ancho horizontal o vertical respectivamente, y este valor es el que comparamos en cada uno de los análisis que a continuación veremos. El resultado de este proceso lo podemos ver en la Figura (6.13), siendo el resultado de analizar las fotografías tomadas experimentalmente con el programa de Python escrito para realizar este proceso, dicho programa se puede ver en el Anexo B.

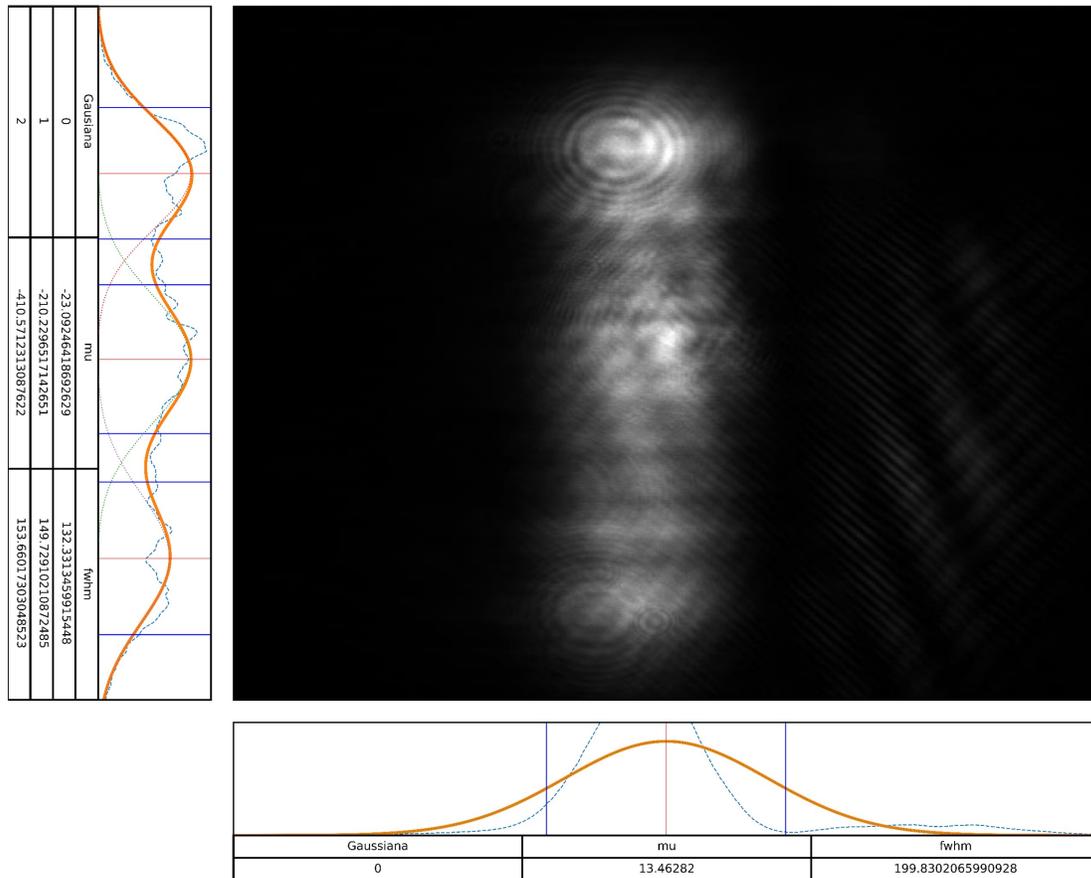


Figura 6.13: Análisis de una fotografía. Se muestra la imagen a ser analizada, el conjunto de datos obtenido y las aproximaciones por curvas que se le hacen. La información que nos muestra el programa es la siguiente: la curva azul punteada con menos opacidad muestra el valor numérico a los datos extraídos de la fotografía, la curva naranja nos muestra el ajuste gaussiano, las líneas rectas azules nos indican la  $FWHM$  de la curva ajustada y en las correspondientes tablas podemos ver su valor, las líneas rojas nos indican el centro indicado en la tabla con las letras mu y finalmente las líneas rojas nos muestran la posición del centro de nuestro ajuste.

Además como podemos ver en las Figuras (6.12) y (6.13), las imágenes que to-

mamos no tienen perfiles gaussianos, mas, les ajustamos gaussianas para caracterizar las dimensiones del haz. Para el eje horizontal ajustamos una única gaussiana, cuyo *FWHM* corresponde a  $\sigma_x$ . Sin embargo, para el eje vertical es un poco más complicado, como podemos ver en la Figura (6.13), el haz está compuesto por distintos lóbulos (tres en casi todas las imágenes), consideramos los tres lóbulos en el análisis, ajustamos tres gaussianas una para cada lóbulo y finalmente realizamos una suma de los tres anchos. Entonces. El programa nos gráfica la suma de las tres gaussianas de color naranja, y de aquí podemos obtener el valor que utilizaremos para  $\sigma_y$ , que será la dicha suma<sup>5</sup>.

Para caracterizar el modo del láser, mediremos el área que tenga el haz y veremos como se cambia este parámetro bajo distintas circunstancias. Dicha área será calculada mediante el producto de las  $\sigma_{x,y}$ , que representan cuanto mide el FWHM para las componentes horizontal y vertical del modo. El producto es  $\sigma_x\sigma_y$  y tiene unidades de área,  $\text{mm}^2$  llevamos a cabo la conversión de pixeles (que es la información que nos proporciona la cámara) a  $\text{mm}$ , de acuerdo a las especificaciones de la cámara, que podemos ver en la referencia [67], aunado a ello el error asociado a estas medidas viene del programa de ajuste que nos da la desviación estándar de los datos.

Es importante conocer como cambia el modo respecto a distintas circunstancias ya que algunos procesos dependen del modo del haz, además como vimos la intensidad del haz láser es una función de la potencia y el área del haz, que sabemos que a mayor área menor será la intensidad, por ello nos interesa que se preserve el área y que no sea muy grande.

### 6.2.5.1. Modo en función de la potencia de entrada

La primer caracterización en torno al modo fue ver qué tanto variaba este respecto a distintas potencias de entrada, es decir a distintas potencias del láser semilla. Esta prueba se realizó bajo las dos condiciones que describimos al inicio de este capítulo, baja y alta corriente.

---

<sup>5</sup>Durante todo este análisis debemos prestar atención al programa y descartar ruido en los datos, como lo pueden ser los *pixeles calientes* [67].

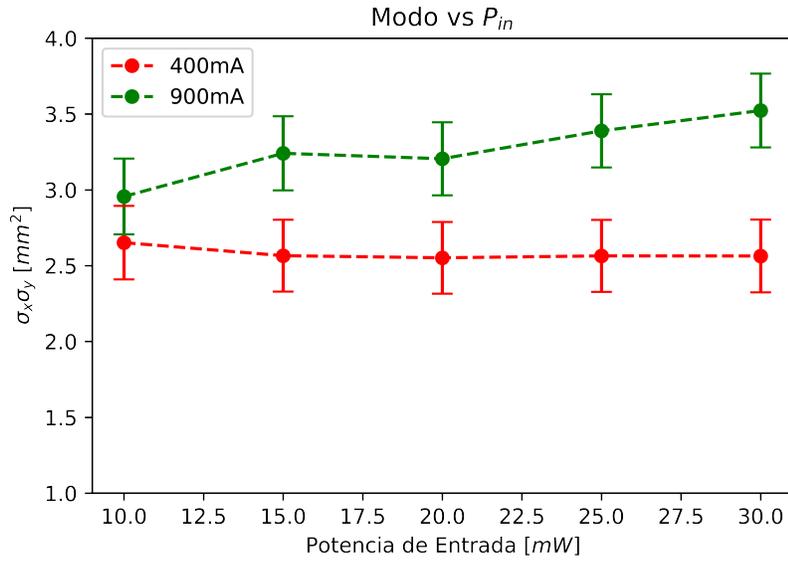


Figura 6.14: Gráfica del modo en función de la potencia de entrada. El error asociado proviene del ajuste del programa que se utilizó para analizar las imágenes.

Como podemos ver en la Figura (6.14), a baja potencia el área que estudiamos es bastante constante, mientras que para alta potencia el área va aumentando conforme aumenta la potencia de entrada, aunque dicho aumento es muy pequeño. Podemos señalar que no cambia más de medio  $mm^2$  el área del modo, a alta potencia.

Ya que el comportamiento es bastante constante a diferentes potencias, sabemos que nuestro MOPA funcionará bien con distintas potencias de entrada. Además podemos ver que el área no aumenta en gran medida a gran potencia, lo que nos dice que nuestro haz es bastante nítido.

También sabemos que al tener altas potencias en el haz del láser semilla, más intensidad se encontrará en el centro y la amplificación de la emisión espontánea será menor<sup>6</sup> y desplazada de dicho centro, lo que nos garantizará que lo que estamos amplificando será la emisión estimulada, que son los fotones que comparten propiedades con los del haz del láser semilla [38].

### 6.2.5.2. Modo en función de la distancia

El siguiente análisis corresponde a cómo varía el modo a distintas distancias, es decir conforme nos alejamos del MOPA cómo cambia el modo, una vez que atraviesa los componentes ópticos como los cubos y lentes cilíndricas. Debemos mencionar que para esta medida se buscó que el haz se viera colimado a una gran distancia de donde se realizó la prueba, y que al atravesar todos los componentes ópticos tuviera

<sup>6</sup>En todo momento tenemos emisión espontánea siendo amplificada por el medio de ganancia del amplificador (TA), sin embargo al aumentar la potencia, provocamos que muchos más fotones de emisión estimulada sean generados, estimulando la amplificación de éstos y que haya mucho menor espacio para la amplificación de la emisión espontánea.

el comportamiento deseado, para así asegurarnos de tener medidas confiables respecto al modo. Podemos ver los resultados en la Figura (6.15).

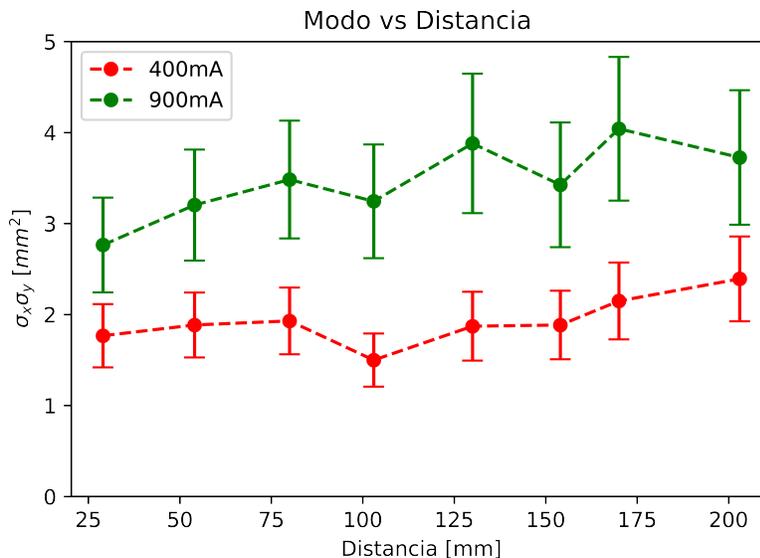


Figura 6.15: Gráfica del modo en función de la distancia. La incertidumbre del instrumento con el que se midió la distancia era de  $\pm 1mm$  por lo que no es significativa para la gráfica.

Este resultado particularmente nos muestra que conforme variamos la distancia el modo a baja potencia no cambia mucho y podemos decir que a grandes distancias se mantiene constante. En cambio a alta corriente, es cuando tenemos un área mucho mayor a menor distancia y un haz mucho más intenso que al alejarnos decrece en tamaño hasta adquirir cierta constancia. Justamente al alejarnos de la salida del MOPA el haz va perdiendo nitidez y comienza a verse más grande, al tener luz más dispersa los ajustes y análisis se vuelven más complicados de realizar, y las curvas que ajustamos se ensanchan lo que provoca barras de error grandes.

### 6.2.5.3. Modo en función del desalineamiento

Finalmente realizamos una caracterización complicada, al querer ver qué tanto cambia el modo debido a qué tan bien acoplado está el láser semilla en el TA. Esta medida es importante pues nos interesa conocer que factores cambian el modo espacial del MOPA, ya que la eficiencia de acoplamiento en las fibras ópticas, que llevan la luz del MOPA a distintas etapas del experimento, depende fuertemente de dicho modo.

El procedimiento experimental que diseñamos para realizar esta prueba, fue el siguiente: primero buscamos tener condiciones óptimas a la salida, es decir tener el máximo de potencia para cierto valor de corriente en el TA y de cierta potencia de entrada, valores que ya habíamos encontrado y que se encuentran reportados en la Sección 6.2.1. Y después, desalineamos el espejo anterior al MOPA de tal forma que tuviéramos distintos porcentajes de desalineamiento, desde 90% hasta 10% de la potencia de salida que teníamos antes, para baja corriente, mientras que para alta

potencia, desalineamos hasta tener una potencia equivalente a un 60% de desalineamiento.

Al desalinear el espejo, mediamos la potencia de salida buscando que correspondiera al valor calculado, al llegar al valor se tomaba la fotografía, que podemos ver en el Apéndice C y se analizaba el modo como se ha explicado anteriormente.

Para alta corriente, no se desalinearon más los espejos por que al estar desalineado el TA podría operar sin ser inyectado adecuadamente y consecuentemente quemarse.

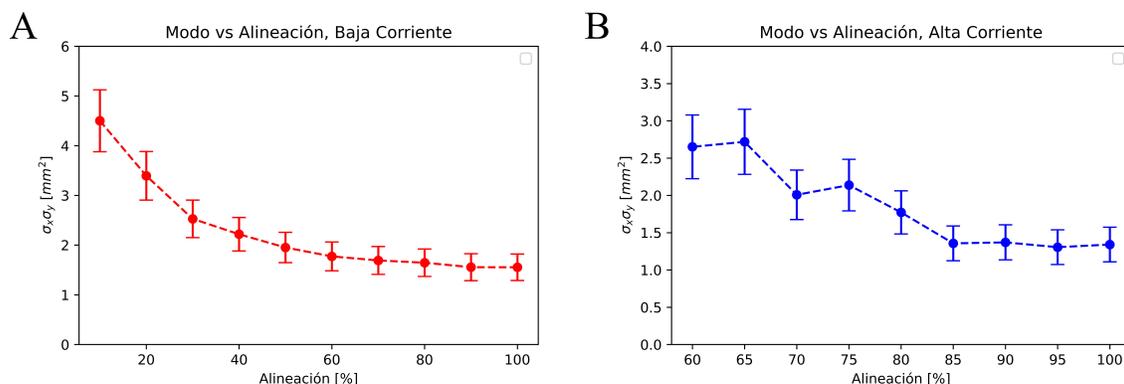


Figura 6.16: Grafica del modo en función del porcentaje de desalineamiento. A) A baja corriente, es decir cuando tenemos 400mA y B) A alta corriente, es decir 900mA

Los resultados se pueden ver en la Figura (6.16) y también en las imágenes presentadas en el Apéndice C.

Para la condición de baja corriente, es decir cuando suministramos una corriente de 400mA al TA, podemos observar como a menor porcentaje de alineación el haz se vuelve mucho más grande lo que nos indica que perdemos intensidad y por lo tanto se vuelve ineficiente para los procesos de enfriamiento atómico. El modo se vuelve cada vez más favorable entre mejor alineados, es decir entre mejor acoplamiento tenga el haz del láser semilla en el TA.

En la parte B de la Figura (6.16), tenemos el comportamiento para alta corriente, que es la condición de operación cuando el experimento está llevándose a cabo. Nuevamente podemos ver como el modo del haz crece a menor porcentaje de alineación, lo que nos lleva a una intensidad menor en el haz, además podemos ver que los cambios son más bruscos. Esto último también se notaba al momento de realizar las pruebas pues con mucho menos movimiento en los espejos se perdía más potencia que en la condición anterior.

Podemos ver que la alineación es importante para tener la potencia deseada a la salida del MOPA, pues los tornillos de ajuste del espejo se movían muy poco para provocar dicha desalineación. Y además entre mejor alineados estén los componentes ópticos que influyen en el MOPA mayor será la intensidad que obtendremos y una mejor eficiencia de acoplamiento en las fibras ópticas.

Estos han sido todos los resultados respecto a la caracterización del MOPA bajo distintas condiciones, a continuación se presentarán comparativas respecto a modelos comerciales.

### 6.3. Otros modelos comerciales

Por ser uno de los propósitos de esta tesis el desarrollar un MOPA cuyo costo fuese menor al de los modelos comerciales que existen en el mercado, a continuación se presentarán las comparativas económicas del MOPA presentado en esta tesis y algunos modelos comerciales.

#### 6.3.1. Costo

Un gran problema que conlleva el trabajar con amplificadores de láser es el elevado costo comercial que tienen, éste asciende a más de quince mil dólares estadounidenses. Como tal se ideó un diseño que redujera los costos. Otro componente del cual se ha hecho poca mención en esta tesis es el aislador óptico de alta potencia que se utiliza a la salida del MOPA y sirve para evitar que haya una retroreflexión que pueda quemar el TA, este componente también es costoso y es necesario para montar el MOPA en el experimento, razón por la cual su costo fue incluido en la siguiente comparativa.

La comparativa entonces será de la siguiente forma, sumaremos los costos de un MOPA de la marca *Toptica* junto con su aislador óptico y compararemos este costo contra la suma de precios de todos los componentes utilizados a lo largo de esta tesis. Todos los precios estarán reportados en dólares estadounidenses.

Tabla 6.1: Costo de un MOPA comercial de la marca *Toptica*, modelo BoosTA, para un láser de  $670nm$ . Todos los precios están en dólares y corresponden a las fechas en las cuales se realizaron las compras.

<b>Costo Mopa</b> <i>Comercial</i>	
<b>Artículo</b>	<b>Costo</b>
MOPA	13,000
Aislador Óptico	4,600
Total	\$17,600

Como podemos ver en las Tablas (6.1) y (6.2), la diferencia de costos es de arriba de \$4000 dólares, lo que corresponde a un costo para el MOPA realizado en esta tesis de tan solo el 76 % del costo de un MOPA comercial. Esto nos dice que nos ahorramos casi una cuarta parte del costo, siendo uno de los objetivos que se tenían en mente.

Sin embargo, dicha diferencia de costos puede reducirse aún más. Una forma de hacerlo es construyendo un controlador de corriente y temperatura, ya que como podemos ver en la Tabla (6.1), el controlador de la marca *Moglabs* utilizado a lo largo de esta tesis corresponde a casi un cuarto del costo total. Y podemos decir que de llevarse a cabo los procedimientos previos de sintonización es posible ajustar otro controlador para ofrecer el mismo funcionamiento que el de *Moglabs*, que es muy preciso.

Tabla 6.2: Lista completa de todos los componentes y piezas que conforman el MOPA

Lista de piezas MOPA						
Óptica						
<i>Pieza</i>	<i>Modelo</i>	<i>Características</i>	<i>Marca</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo Unitario</i>	<i>Costo Total</i>
TA	<b>EYP-TPA-0670-00500 -2003-CMT02-0000</b>	Amplificador cónico para láser con longitud de onda de 670nm	<b>Eagleyard</b>	1	3,667	3,667
Lente Asférica	<b>C171TMD-A</b>	$f = 6.20 \text{ mm}$	<b>Thorlabs</b>	2	84.5	169
Lente Cilíndrica	<b>LJ1477L1-B</b>	$f = 69.99 \text{ mm}$	<b>Thorlabs</b>	1	130	130
Adaptadores Lentes	<b>S05TM08</b>	Rosca de 5mm a 8mm	<b>Thorlabs</b>	2	20.7	41.4
Trasladores Thorlabs	<b>CXYZ05/M</b>	Soportan los adaptadores y nos permiten movernos en las tres dimensiones	<b>Thorlabs</b>	2	362.7	725.4
Aislador óptico	<b>DSR660</b>	Aislador para alta potencia con alta transmisión y alto aislamiento	<b>Toptica</b>	1	4,560	4,560
Control Temperatura y Corriente						
Controlador	<b>LDD605</b>	Especializado en controlar corriente en un láser de diodo o un TA	<b>Moglabs</b>	1	3,168	3,168
Peltier	<b>TEC1-12706</b>	Alcanza a calentar hasta 50C	<b>HB</b>	1	10	10
Termistor	<b>B57045K</b>	Termistor para lectura de altas temperaturas	<b>Epcos</b>	1	2.5	2.5
Circuito de Protección	Diseño Propio	Circuito electrónico que protege al TA de picos de corriente	<b>IF*</b>	1	50	50
Heat Sink	Diseño Propio	Pieza de cobre	<b>Seman Baker**</b>	1	90	90
Mecánica						
Base	Diseño Propio	Pieza de aluminio	<b>Seman Baker**</b>	1	644.5	644.5
Montura Trasladores	Diseño Propio	Piezas de aluminio	<b>Seman Baker**</b>	2	131.65	263.3
Sujetador	Diseño Propio	Piezas de aluminio	<b>Seman Baker**</b>	2	5	10
Tapas	Diseño Propio	Piezas de aluminio, incluye: tapas laterales y superior	<b>Seman Baker**</b>	1	23.25	23.25
Notas:	Todos los precios están en dólares * El costo incluye los componentes electrónicos y la manufactura del PCB ** Es la empresa maquinadora de las piezas				Total	13,554.35

## 6.4. Montaje en el Experimento

Finalmente, el último resultado a presentar es el montaje del MOPA diseñado y construido en esta tesis en el experimento que se lleva a cabo en el Laboratorio de Materia Ultrafría.

Utilizamos el MOPA para amplificar la potencia del láser utilizado en la transición D1. Ya con el láser con condiciones fijas, como la potencia de inyección, a 14.7mW montamos el MOPA después de un cubo que se encarga de enviar cierta porción de la luz hacia la espectroscopia y logramos obtener potencias esperadas arriba de los 300mW a la salida del MOPA en condición de alta corriente.

Podemos ver en las Figuras 6.17 y 6.18 al MOPA ya montado en el experimento.

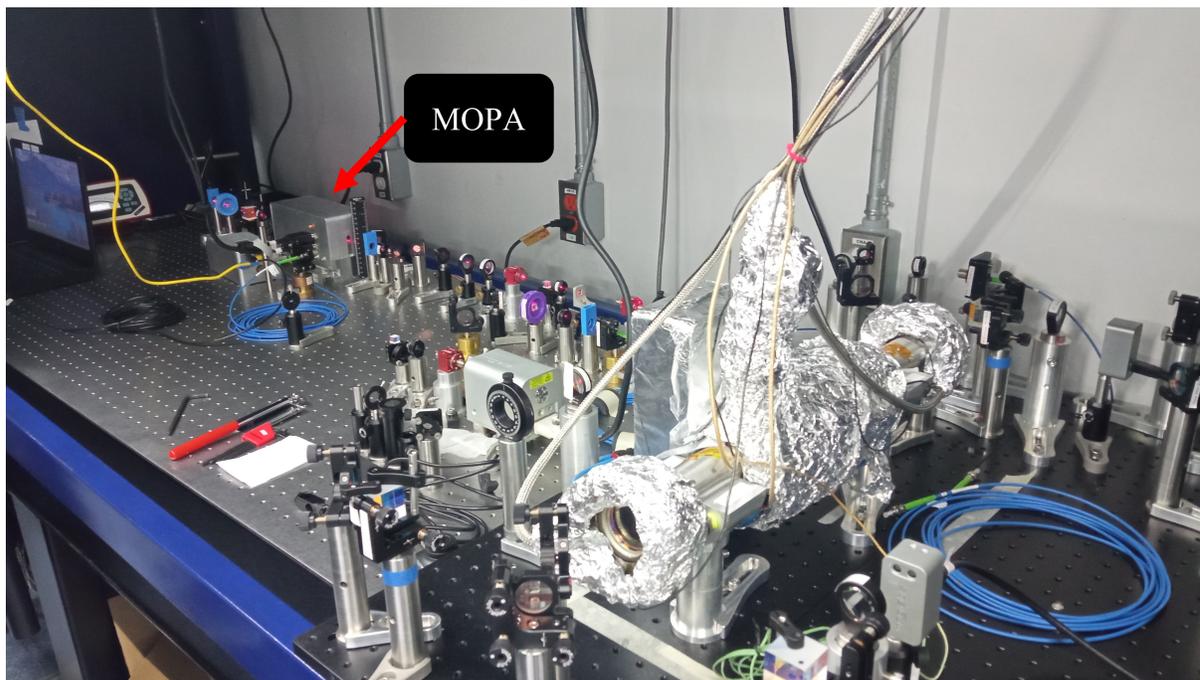


Figura 6.17: Fotografía del Experimento con el MOPA siendo utilizado con el láser para la transición D1. Se observa la espectroscopia y la mesa con los distintos componentes ópticos.

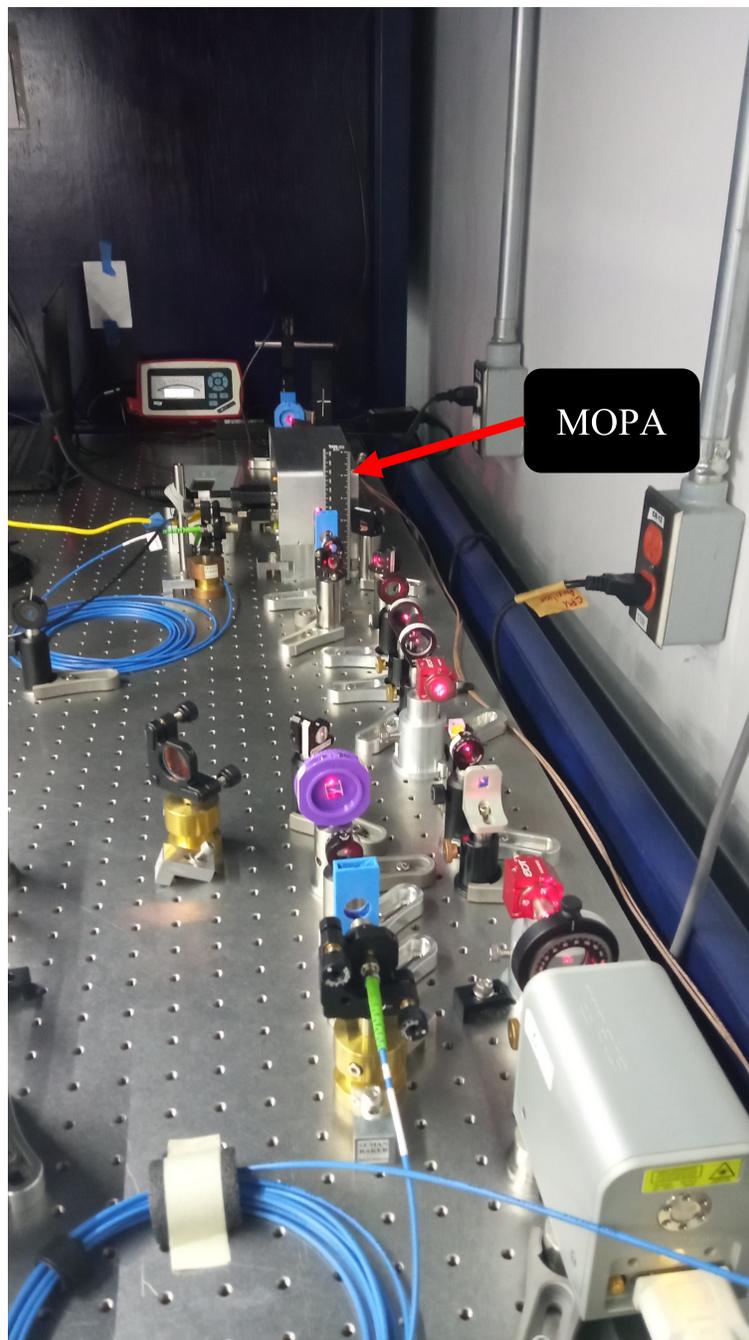


Figura 6.18: Fotografía del camino óptico previo al MOPA y la medida de la potencia a la salida de este.

# Capítulo 7

## Conclusiones

*“Afterlife, oh my God, what an awful word.”*

**Afterlife, Arcade Fire**

A lo largo de este trabajo se presentó el diseño, construcción y caracterización de un amplificador de potencia para láser de longitud de onda  $670nm$ , además se incorporó al experimento, sustituyendo un MOPA comercial dañado, para amplificar la potencia del láser de la transición D1, logrando aumentar la potencia a los valores deseados.

Todo el diseño giró alrededor de dos grandes condiciones iniciales, la primera de ellas fue el TA y la segunda fue el mismo experimento. Respecto al TA sabíamos que este venía montado en una montura C, tal que debíamos trabajar con esa geometría en lugar de con solo el chip. Sobre el experimento la condición a cumplir es que la línea de óptica se encuentra a  $7.5cm$  de altura respecto a la mesa óptica donde se encuentran montados los componentes, por lo que la luz debía entrar y salir del MOPA a esta altura. Ambas condiciones fueron resueltas de manera satisfactoria y con ello nos permitió continuar con el proyecto.

La construcción, montaje y los procedimientos previos de las piezas y el sistema nos arrojaron las siguientes conclusiones, que consideramos deberán tomarse en cuenta al replicar este trabajo:

- Hay que tener cuidado al momento de fijar ciertas piezas, como lo son el disipador térmico pues los tornillos de plástico son frágiles. Recomendamos utilizar tornillos de un material con menor fragilidad, igualmente aislantes, como la bakelita.
- El orden para montar las piezas, cada una con sus respectivos procedimientos es indispensable para no lastimar o romper piezas.
- Para sintonizar el PID que controla la temperatura debe seguirse algún método como el de *Ziegler-Nichols*, esto con la finalidad de precisar y ser más eficientes al realizar este proceso, pues aunque se puede hacer al tanteo conociendo como cambia el comportamiento cambiando que parámetro, siempre es más sencillo si se sigue alguna de las reglas establecidas. Consecuentemente, tener una buena sintonización del PID nos brinda condiciones óptimas en el sistema. Optimizar

los valores PID debe siempre realizarse antes de operar cualquier sistema que tenga un controlador de esta naturaleza.

Después de realizar el montaje y todos los procedimientos previos, de asegurarnos que el sistema está listo para operar y de delimitar como será la caracterización del MOPA se realizó ésta. Podemos decir lo siguiente sobre este proceso:

- El funcionamiento de nuestro sistema es equivalente al de los MOPAs comerciales, lo que nos habla de un diseño exitoso. Las variaciones, por ejemplo, en cuanto a la potencia de salida, pueden deberse a factores relacionados con el láser semilla y también sabemos que están relacionadas con la alineación de los componentes ópticos, dentro y fuera del MOPA.
- Debemos mantener siempre la temperatura de funcionamiento, ya que de otra manera simplemente el MOPA no alcanza los valores de amplificación esperados.
- Tener el ángulo de polarización correcto es indispensable para alcanzar la máxima amplificación.
- Sobre el modo del haz a la salida del MOPA, sabemos que los cambios más notorios se pueden ver cuando el MOPA opera con alta corriente. Vemos que una pequeña desalineación en algún componente óptico puede ser suficiente para que el modo cambie drásticamente, provocando una pérdida de intensidad que afecta directamente al experimento.

## 7.1. Perspectivas

Como presentamos y demostramos a lo largo de esta tesis, el diseño pensado y llevado a cabo de un amplificador de potencia para láser funciona y muestra un funcionamiento similar y comparable al de otros modelos comerciales pero con un costo menor. Sin embargo, a lo largo del desarrollo de este trabajo anotamos pequeñas observaciones que podrían mejorar el diseño de distintas formas, desde reducir el costo un poco más, hasta añadir algún componente o facilitar en ensamblado de algunos. Enunciamos a continuación estas observaciones:

- Sugerimos alargar la base entre cinco y diez centímetros para así poder incorporar lentes cilíndricas con focos más grandes y no depender de lentes cilíndricas con focos pequeños para el funcionamiento, además de facilitar las maniobras de ajuste de dichos componentes. También podemos crecer la base un centímetro en la otra dirección para tener más espacio para el manejo de algunos componentes.
- Una lente cilíndrica con un foco más corto, nos brindaría más espacio para moverla y optimizar mejor la salida del haz.
- Un shutter de protección incorporado a la tapa superior para tener un control mecánico sobre la entrada del láser al sistema.

- Incorporar un espacio en la base para alojar el circuito de protección y así liberar espacio de la tapa.
- Añadir dos hoyos con cuerda para fijar la montura C opuesta a su posición final. Teniendo así un grado más de libertad, pues podemos girar la entrada del TA sin mayores complicaciones.

Otro punto importante al hablar del futuro de este MOPA es su incorporación en otras etapas del experimento. Actualmente se ha montado en el láser de la transición D1, ello remplazando un MOPA comercial dañado. Sin embargo, de crearse otro MOPA con este mismo diseño podemos incorporarlo a la transición D2 o aumentar la potencia del láser utilizado por el desacelerador Zeeman. Hemos visto que funciona bien para ambas etapas, por lo que sabemos que podemos utilizar este u otro dispositivo que se construya en distintas etapas del experimento.

Finalmente, estamos conscientes que este diseño puede ser fácilmente adaptado a otro sistema experimental. Ya que de tener otra montura para el TA, simplemente bastaría con cambiar la geometría del disipador térmico y así poder adaptar el sistema a otro TA con quizás otra longitud de onda. También se puede cambiar la altura de la base para adaptarse a caminos ópticos más o menos elevadas. Por esto creemos que este diseño puede ser replicado y estamos dispuestos brindar a soporte y ayuda a cualquier grupo de investigación que quiera utilizarlo.

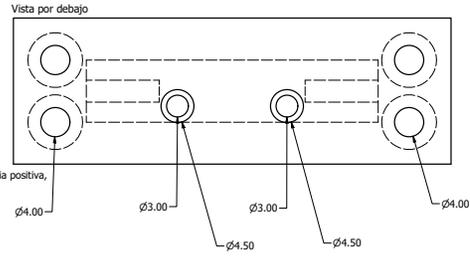
# Apéndice A

## Planos Piezas

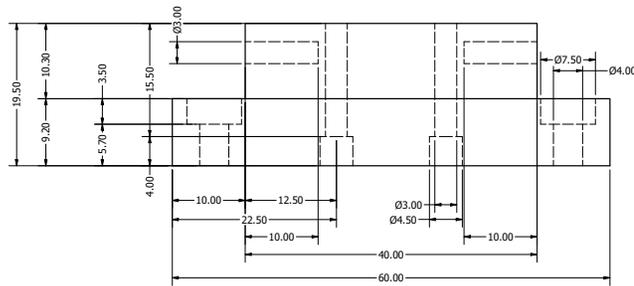
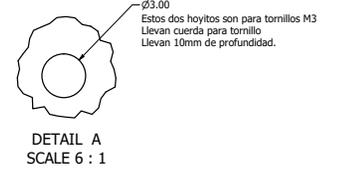
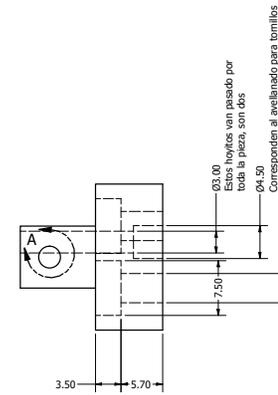
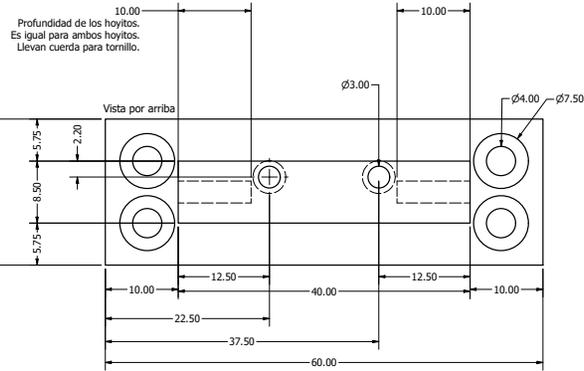
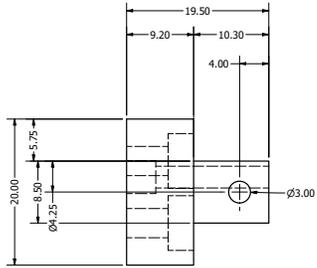
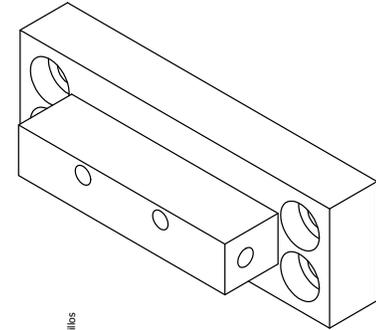
A continuación se muestran todos los planos de las piezas diseñadas para el MOPA. El orden de aparición de estos corresponde al orden que tienen en la siguiente lista.

- Plano del Heat Sink.
- Plano de las monturas para los trasladadores.
- Plano general de la base, con énfasis en las dimensiones.
- Plano de los orificios para los componentes que se instalan en la base.
- Plano de los orificios laterales, incluye la información para el mecanismo de enfriamiento.
- Plano de la tapa lateral con los orificios para los conectores.
- Plano de la tapa lateral sólida.
- Plano de la tapa superior.
- Plano de la base para la lente cilíndrica

Todas las medidas están en mm  
Material: Cobre

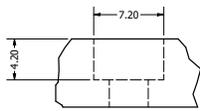
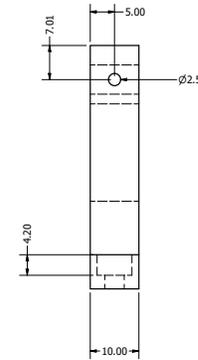
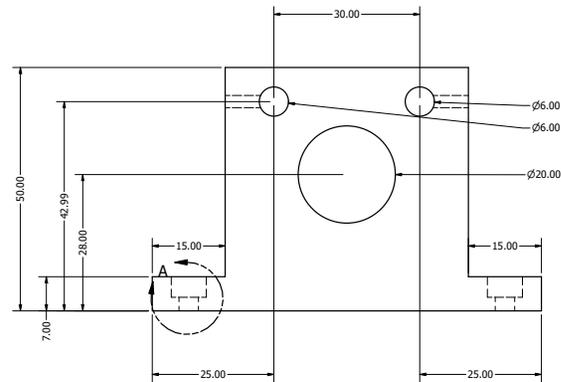
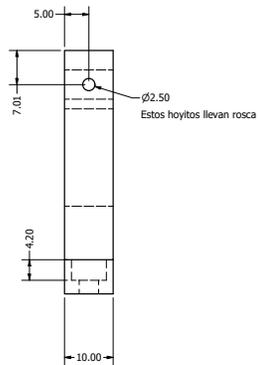
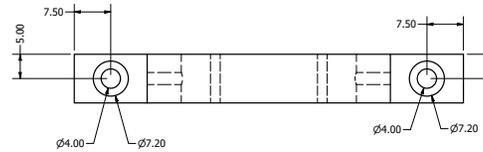
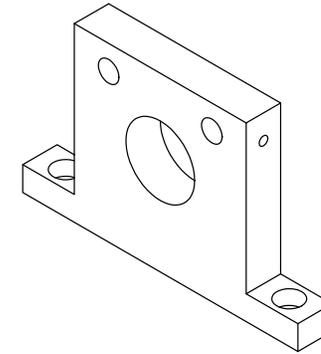


Para los hoyitos de 4.00mm se prefiere una tolerancia positiva, pues son hoyitos pasados para tornillos M4



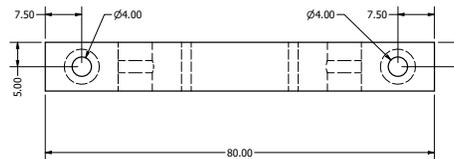
DRAWN	sebas	6/14/2021	Heat Sink	
CHECKED			TITLE	
QA			Toda la pieza es en cobre	
MFG			Todas las medidas son en mm	
APPROVED			SIZE	DWG NO
Cobre			Nueva versión	HeatSink_v5_Modificado
			SCALE	3 : 1
				SHEET 1 OF 1

Todas las medidas están en mm.  
 Material: Aluminio  
 Se necesitan dos piezas de este modelo.



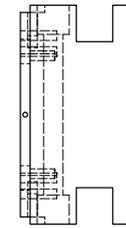
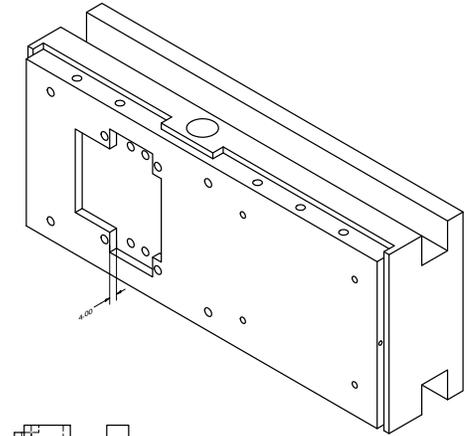
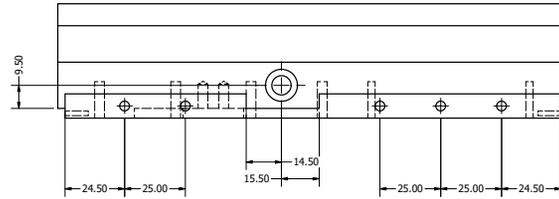
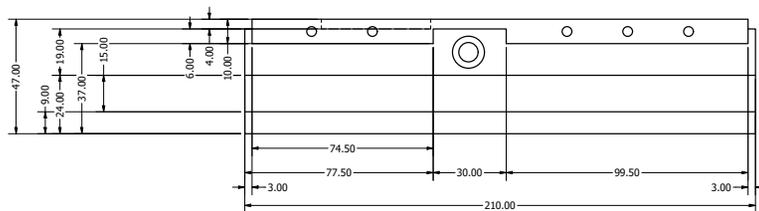
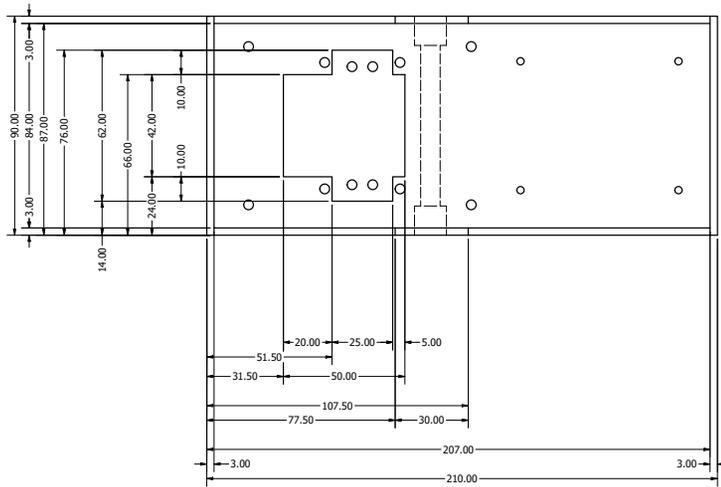
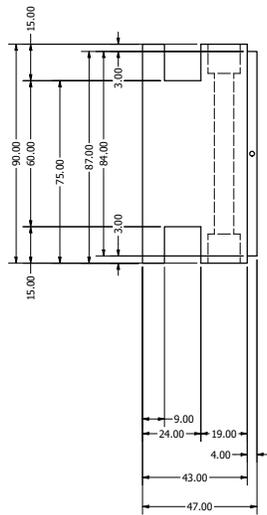
DETAIL A  
 SCALE 4 : 1

Estos detalles sobre las cavidades para los tornillos, son iguales las medidas en todos las cavidades iguales



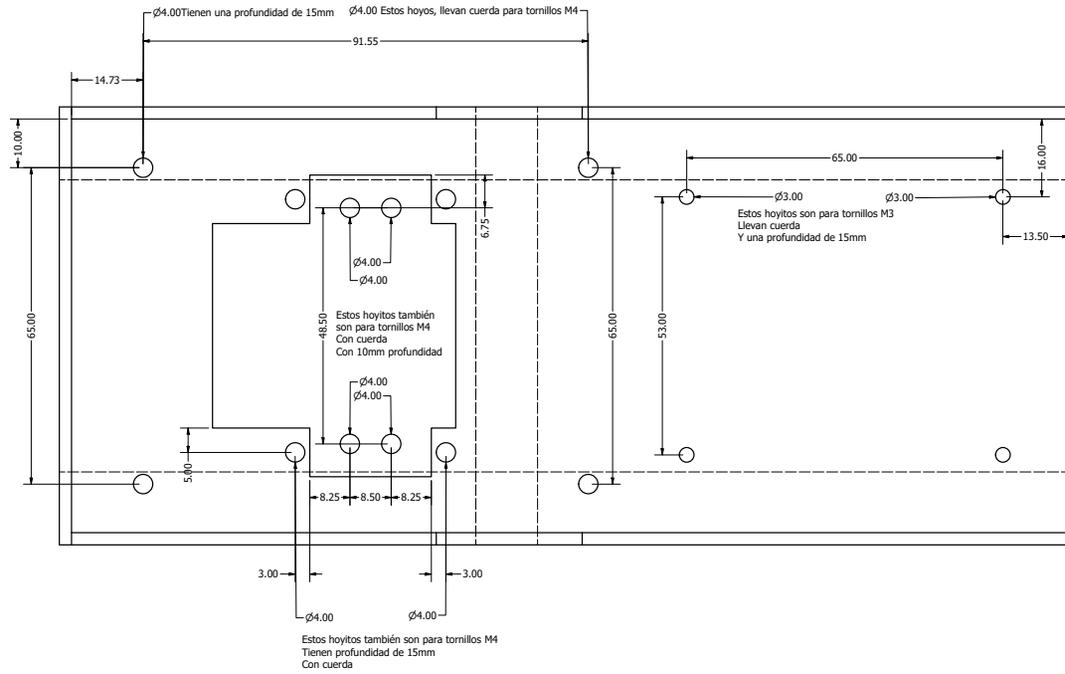
DRAWN	3/5/2020	Monturas	
CHECKED		TITLE	
QA		Todas las medidas están en mm. Se necesitan dos piezas de este modelo.	
MFG			
APPROVED			
ALUMINIO		SIZE	DWG NO
		D	MonturaTrasladores_Planjo
		SCALE	2 : 1
		SHEET 1 OF 1	

Todas las medidas están en mm.  
Material: Aluminio



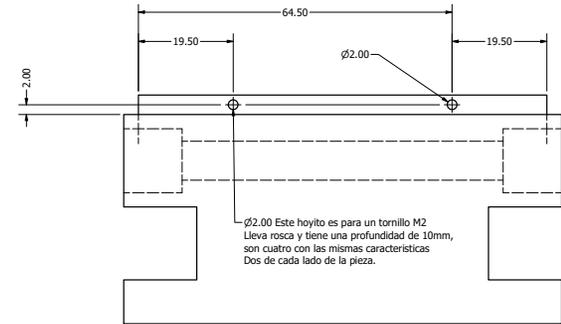
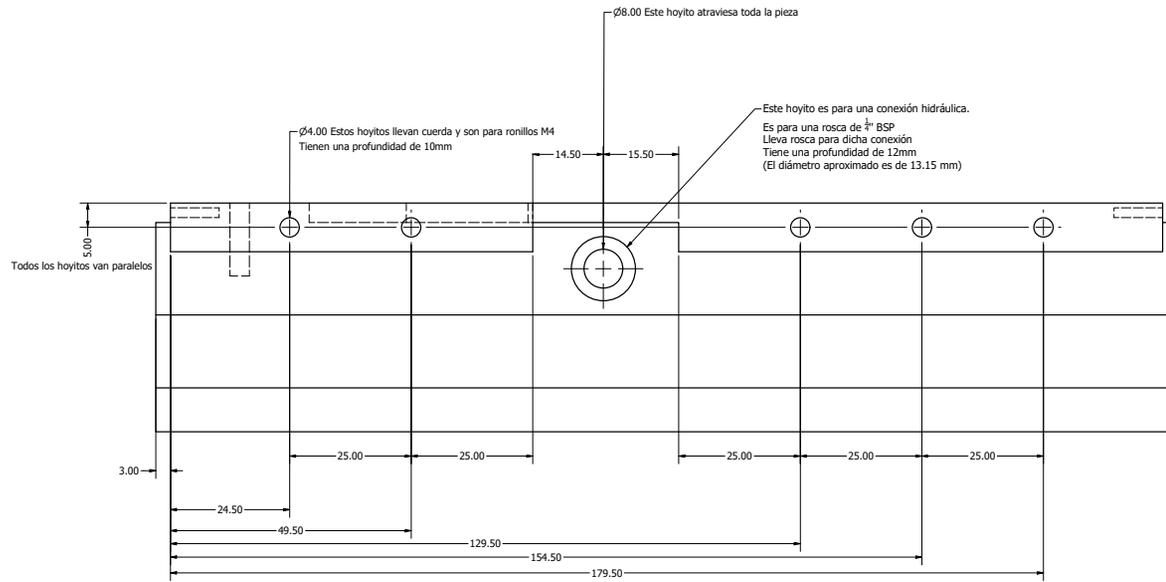
DRAWN sebas	3/22/2020	<b>Base, Dimensiones.</b>	
CHECKED		TITLE	
QA		Este plano sólo contiene las dimensiones de la base, los hoyos se encuentran en otro plano Las medidas están en mm.	
MFG		Excepto por la medida del hoyo de 7/8 pulgada.	
APPROVED		SIZE	DWG NO
ALUMINIO		D	Base Dimensiones Plano
		SCALE	1 : 1
			SHEET 1 OF 1

Todas las medidas están en mm.  
Material: Aluminio



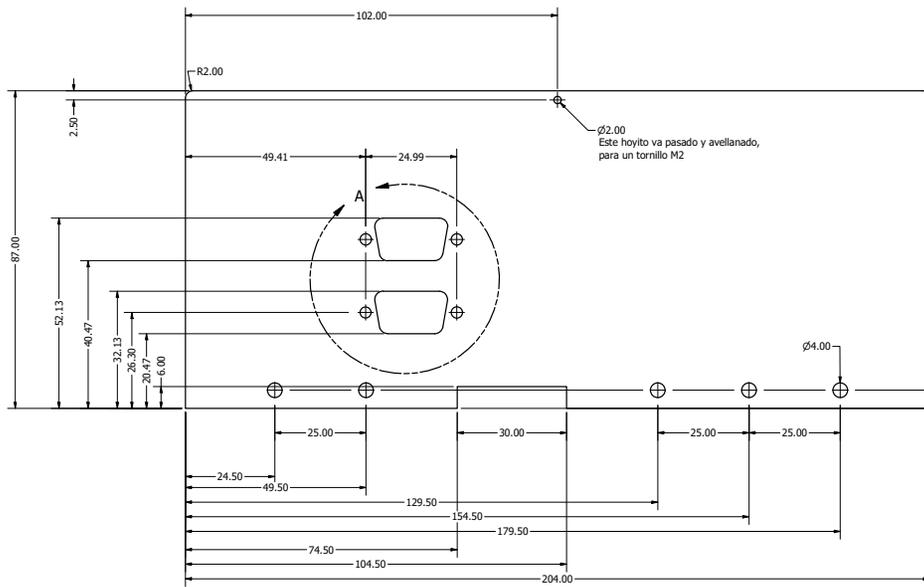
DRAWN	6/22/2020	Base, Hoyos Superiores	
CHECKED		TITLE	
QA		Este plano es únicamente sobre los hoyos de la parte de arriba. Todas las medidas están en mm, excepto donde se indique lo contrario.	
MFG		Material: Aluminio	
APPROVED		SIZE	DWG NO
ALUMINIO		D	Base_Hoyos_Arriba
		SCALE	2 : 1
			SHEET 1 OF 1

Todas las medidas están en mm.  
Material: Aluminio

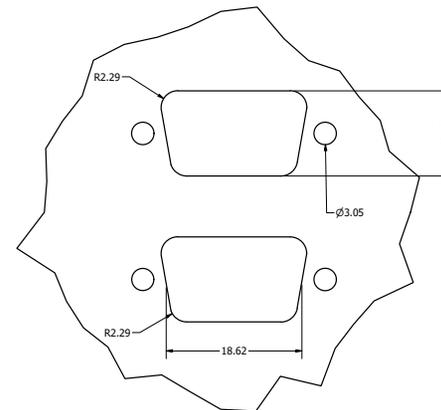
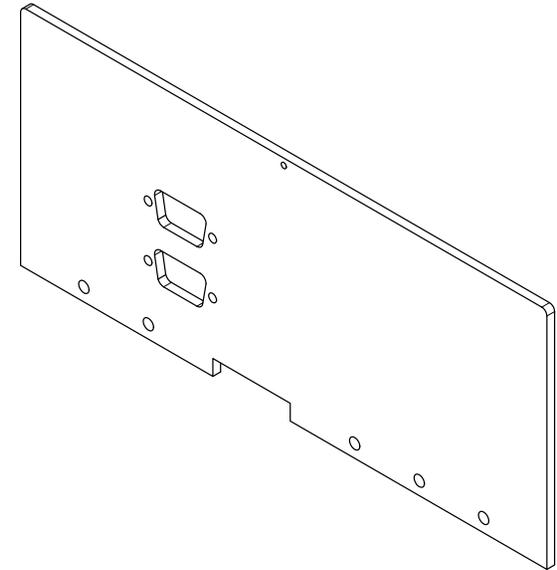
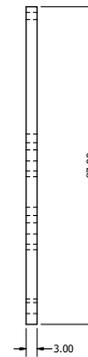


DRAWN	7/30/2020	Base, Hoyos Laterales	
CHECKED		TITLE	
QA		Todas las medidas son en mm, excepto donde se indique lo contrario	
MFG			
APPROVED			
ALUMINIO		SIZE	DWG NO
		D	Base_Hoyos_LateralesC
		SCALE	REV
		2 : 1	
		SHEET 1 OF 1	

Todas las medidas están en mm.  
Material: Aluminio



Todos estos hoyitos van paralelos, van pasados y avellanados, un tornillo M4 debe atravesarlos

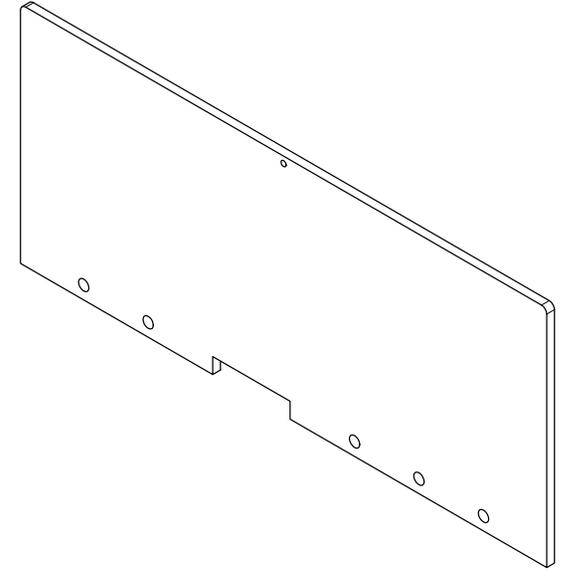
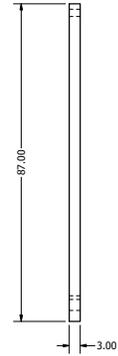
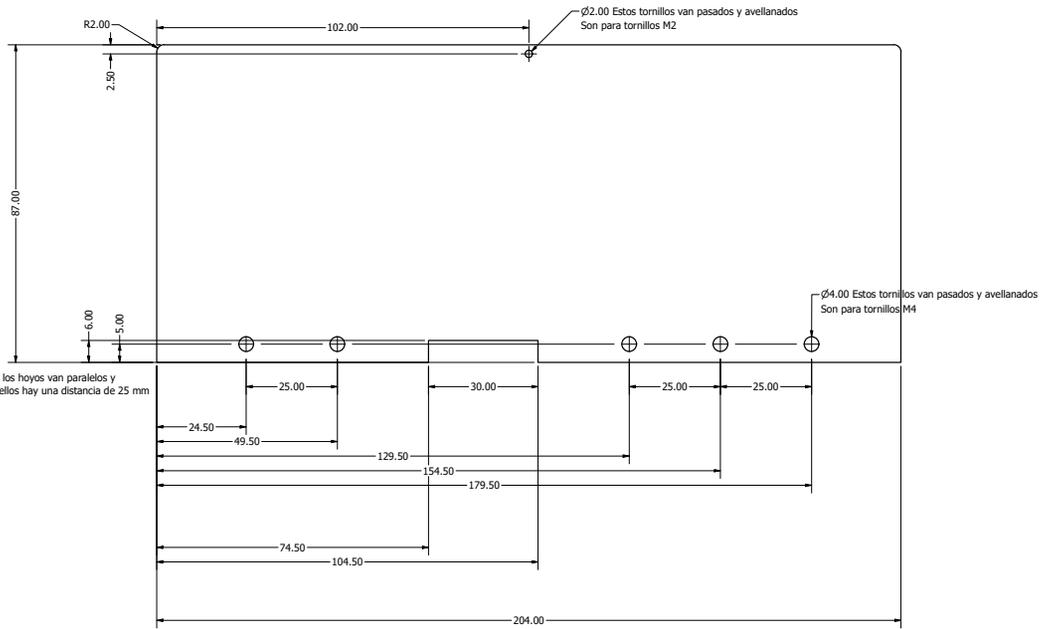


El detalle A, corresponde a los dos hoyos que son para dos conectores.  
Un conector es un conector de 9 pines y otro es de 15 pines  
DB9

DETAIL A  
SCALE 3 : 1

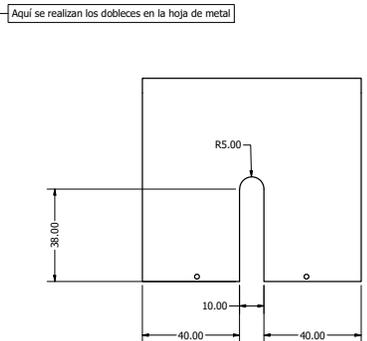
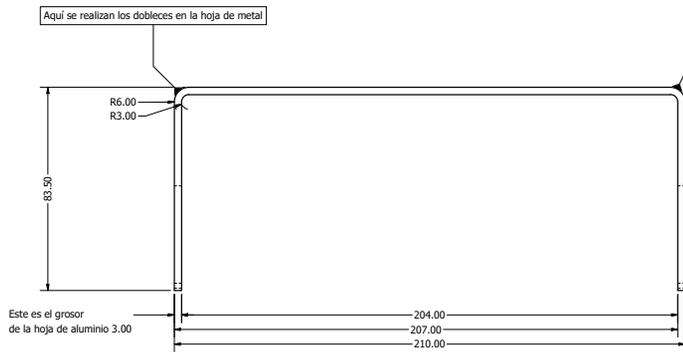
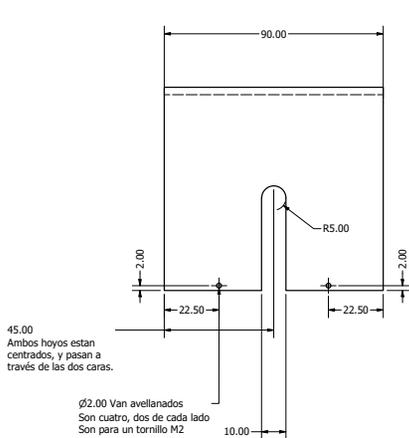
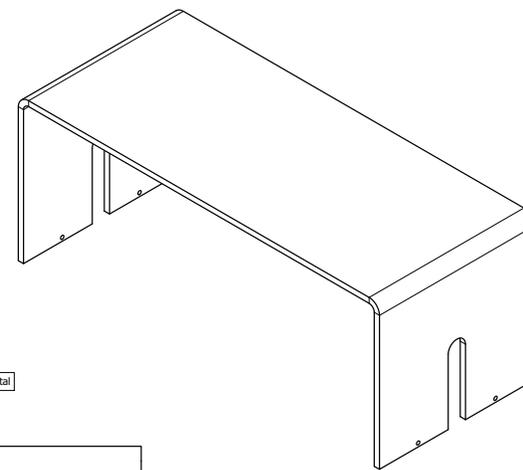
DRAWN	7/30/2020	Tapa Lateral (con conectores)	
CHECKED		TITLE	
QA		Todas las medidas están en mm	
MFG			
APPROVED			
ALUMINIO		SIZE	DWG NO
		D	TapaLateralConectores_Plano
		SCALE	1.5 : 1
			SHEET 1 OF 1

Todas las medidas están en mm.  
Material: Aluminio



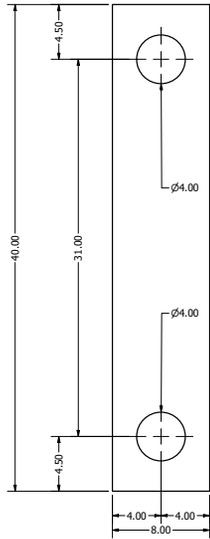
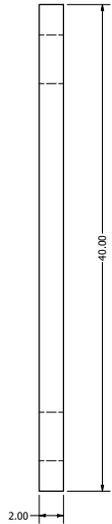
DRAWN	7/30/2020	Tapa Lateral	
CHECKED		TITLE	
QA		Todas las medidas están en mm	
MFG			
APPROVED			
ALUMINIO		SIZE	DWG NO
		D	TapaLateralsC_Plano
		SCALE	REV
		1.5 : 1	
			SHEET 1 OF 1

Todas las medidas están en mm.  
 Material: Hoja de Aluminio  
 Grosor 3.00 mm

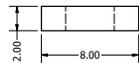
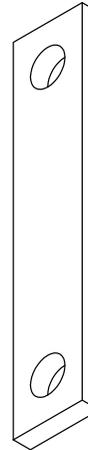


DRAWN	7/30/2020	<b>Tapa Superior</b>	
CHECKED		TITLE	
QA		El material es una hoja de aluminio de grosor 3.00 mm Todas las unidades están en mm	
MFG		SIZE	DWG NO
APPROVED		D	TapaArriba_Metal_Plano
		SCALE	1 : 1
			SHEET 1 OF 1

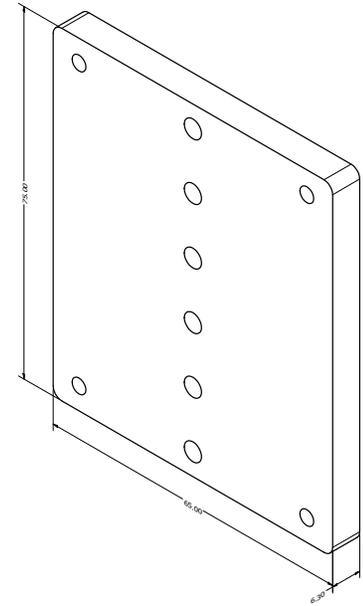
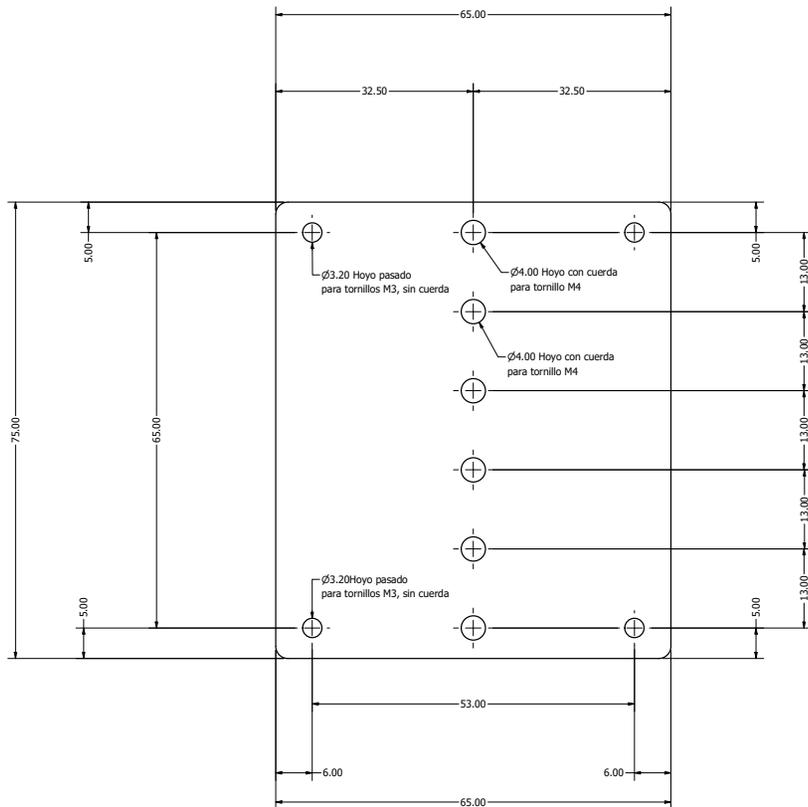
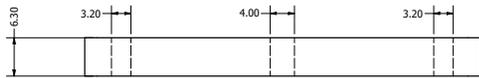
Todas las medidas están en mm.  
 Material: Aluminio  
 Se necesitan dos piezas de este modelo



Los dos hoyitos son completamente pasados, para tornillos M4



DRAWN	3/22/2020	Sujetador, Heat Sink	
CHECKED		TITLE	
QA		Las medidas están en mm.	
MFG			
APPROVED			
ALUMINIO		SIZE	DWG NO
		D	Sujetador_Plano
		SCALE	5 : 1
			SHEET 1 OF 1



DRAWN	11/8/2021	Base para una lente cilíndrica	
CHECKED		TITULO	
QA		Todas las medidas están en mm.	
MFG		Material: Aluminio.	
APPROVED		Tolerancia de $\pm 0.5\text{mm}$	
		SIZE	DWG NO
		D	Plano_Base_Lente_Cilindrica
		SCALE	2.5 : 1
			SHEET 1 OF 1

# Apéndice B

## Programas de Python

Para el desarrollo de la presente tesis, se escribieron distintos programas con el lenguaje *Python* con distintas finalidades. Desde comunicarse con el controlador de corriente y temperatura de la marca *MOGLABS*, hasta el análisis de los datos obtenidos presentados anteriormente en el Capítulo 6.

Los programas se presentan a continuación en el siguiente orden:

- *MOGDEVICE*, programa que tiene como finalidad comunicarse con el controlador *MOGLABS*.
- *Parámetros PID*, éste programa contiene distintas secciones que realizan distintas acciones, desde leer la información y el estado del dispositivo, mandar los valores para las constantes del controlador PID y graficar el comportamiento del sistema.
- *Potencia de Salida*, los siguientes programas fueron utilizados para graficar los datos obtenidos durante la caracterización del MOPA, así como para analizar el modo espacial de las imágenes tomadas. Se presenta un único programa sobre la caracterización, pues los otros programas solo cambian los datos a analizar.

# MOGDEVICE

December 3, 2021

## 1 MOGDEVICE

### 1.1 Comunicación con el Dispositivo MOGLABS

```
[1]: """
moglabs device class
Simplifies communication with moglabs devices

Compatible with both python2 and python3

v1.2: Fixed Unicode ambiguities, added explicit close(), fixed USB error in
→recv_raw()
v1.1: Made compatible with both python2 and python3
v1.0: Initial release

(c) MOGLabs 2016--2021
http://www.moglabs.com/
"""
```

```
[1]: '\nmoglabs device class\nSimplifies communication with moglabs
devices\n\nCompatible with both python2 and python3\n\nv1.2: Fixed Unicode
ambiguities, added explicit close(), fixed USB error in recv_raw()\nv1.1: Made
compatible with both python2 and python3\nv1.0: Initial release\n\n(c) MOGLabs
2016--2021\nhttp://www.moglabs.com/\n'
```

```
[2]: import time
import socket
import select
from struct import unpack
from collections import OrderedDict
import six
CRLF = b'\r\n'
```

```
[3]: # Handles communication with devices
class MOGDevice(object):
    def __init__(self, addr, port=None, timeout=1, check=True):
        assert len(addr), 'No address specified'
        self.dev = None
```

```

# is it a COM port?
if addr.startswith('COM') or addr == 'USB':
    if port is not None: addr = 'COM%d'%port
    addr = addr.split(' ',1)[0]
    self.connection = addr
    self.is_usb = True
else:
    if not ':' in addr:
        if port is None: port=7802
        addr = '%s:%d'%(addr,port)
    self.connection = addr
    self.is_usb = False
self.reconnect(timeout,check)

def __repr__(self):
    """Returns a simple string representation of the connection"""
    return 'MOGDevice("%s")'%self.connection

def close(self):
    """Close any active connection. Can be reconnected at a later time"""
    if self.connected():
        self.dev.close()
        self.dev = None

def reconnect(self,timeout=1,check=True):
    """Reestablish connection with unit"""
    # close the handle if open - this is _required_ on USB
    self.close()
    if self.is_usb:
        try:
            self.dev = serial.Serial(self.connection, baudrate=115200,
↳ bytesize=8, parity='N', stopbits=1, timeout=timeout, writeTimeout=0)
        except serial.SerialException as E:
            raise RuntimeError(E.args[0].split(':',1)[0])
    else:
        self.dev = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
        self.dev.setsockopt(socket.SOL_SOCKET, socket.SO_REUSEADDR, 1)
        self.dev.settimeout(timeout)
        addr, port = self.connection.split(':')
        self.dev.connect((addr,int(port)))
    # check the connection?
    if check:
        try:
            self.info = self.ask('info')
        except Exception as E:
            raise RuntimeError('Device did not respond to query')

```

```

def connected(self):
    """Returns True if a connection has been established, but does not
    →validate the channel is still open"""
    return self.dev is not None

def _check(self):
    """Assers that the device is connected"""
    assert self.connected(), 'Not connected'

def versions(self):
    """Returns a dictionary of device version information"""
    verstr = self.ask('version')
    if verstr == 'Command not defined':
        raise RuntimeError('Incompatible firmware')
    # does the version string define components?
    vers = {}
    if ':' in verstr:
        # old versions are LF-separated, new are comma-separated
        tk = ',' if ',' in verstr else '\n'
        for l in verstr.split(tk):
            if l.startswith('OK'): continue
            n,v = l.split(':',2)
            v = v.strip()
            if ' ' in v: v = v.rsplit(' ',2)[1].strip()
            vers[n.strip()] = v
    else:
        # just the micro
        vers['UC'] = verstr.strip()
    return vers

def cmd(self,cmd):
    """Send the specified command, and check the response is OK. Returns
    →response in Unicode"""
    resp = self.ask(cmd)
    if resp.startswith('OK'):
        return resp
    else:
        raise RuntimeError(resp)

def ask(self,cmd):
    """Send followed by receive, returning response in Unicode"""
    # check if there's any response waiting on the line
    self.flush()
    self.send(cmd)
    resp = self.recv().strip()
    if resp.startswith('ERR:'):

```

```

        raise RuntimeError(resp[4:].strip())
    return resp

def ask_dict(self,cmd):
    """Send a request which returns a dictionary response, with keys and
    ↪values in Unicode"""
    resp = self.ask(cmd)
    # might start with "OK"
    if resp.startswith('OK'): resp = resp[3:].strip()
    # expect a colon in there
    if not ':' in resp: raise RuntimeError('Response to '+repr(cmd)+' not a
    ↪dictionary')
    # response could be comma-delimited (new) or newline-delimited (old)
    splitchar = ',' if ',' in resp else '\n'
    # construct the dict (but retain the original key order)
    vals = OrderedDict()
    for entry in resp.split(splitchar):
        key, val = entry.split(':')
        vals[key.strip()] = val.strip()
    return vals

def ask_bin(self,cmd):
    """Send a request which returns a binary response, returned in Bytes"""
    self.send(cmd)
    head = self.recv_raw(4)
    # is it an error message?
    if head == b'ERR:': raise RuntimeError(self.recv().strip())
    datalen = unpack('<L',head)[0]
    data = self.recv_raw(datalen)
    if len(data) != datalen: raise RuntimeError('Binary response block has
    ↪incorrect length')
    return data

def send(self,cmd):
    """Send command, appending newline if not present"""
    if hasattr(cmd,'encode'): cmd = cmd.encode()
    if not cmd.endswith(CRLF): cmd += CRLF
    self.send_raw(cmd)

def has_data(self,timeout=0):
    """Returns True if there is data waiting on the line, otherwise False"""
    self._check()
    if self.is_usb:
        try:
            if self.dev.inWaiting(): return True
            if timeout == 0: return False
            time.sleep(timeout)

```

```

        return self.dev.inWaiting() > 0
    except serial.SerialException: # will raise an exception if the
→device is not connected
        return False
    else:
        sel = select.select([self.dev], [], [], timeout)
        return len(sel[0])>0

def flush(self, timeout=0, buffer=256):
    self._check()
    dat = ''
    while self.has_data(timeout):
        chunk = self.recv(buffer)
        # handle the case where we get binary rubbish and prevent TypeError
        if isinstance(chunk, six.binary_type) and not isinstance(dat, six.
→binary_type): dat = dat.encode()
        dat += chunk
    return dat

def recv(self, buffer=256):
    """Receive a line of data from the device, returned as Unicode"""
    self._check()
    if self.is_usb:
        data = self.dev.readline(buffer)
        if len(data):
            while self.has_data(timeout=0):
                segment = self.dev.readline(buffer)
                if len(segment) == 0: break
                data += segment
            if len(data) == 0: raise RuntimeError('Timed out')
    else:
        data = b''
        while True:
            data += self.dev.recv(buffer)
            timeout = 0 if data.endswith(CRLF) else 0.1
            if not self.has_data(timeout): break
    try:
        # try to return the result as a Unicode string
        return data.decode()
    except UnicodeDecodeError:
        # even though we EXPECTED a string, we got raw data so return it as
→bytes
        return data

def send_raw(self, cmd):
    """Send, without appending newline"""
    self._check()

```

```

if self.is_usb:
    return self.dev.write(cmd)
else:
    return self.dev.send(cmd)

def recv_raw(self,size):
    """Receive exactly 'size' bytes"""
    self._check()
    parts = []
    tout = time.time() + self.get_timeout()
    while size > 0:
        if self.is_usb:
            chunk = self.dev.read(min(size,0x2000))
        else:
            chunk = self.dev.recv(min(size,0x2000))
        if time.time() > tout:
            raise DeviceError('timed out')
        parts.append(chunk)
        size -= len(chunk)
    buf = b''.join(parts)
    return buf

def get_timeout(self):
    """Return the connection timeout, in seconds"""
    self._check()
    if self.is_usb:
        return self.dev.timeout
    else:
        return self.dev.gettimeout()

def set_timeout(self,val = None):
    """Change the timeout to the specified value, in seconds"""
    self._check()
    old = self.get_timeout()
    if val is not None:
        if self.is_usb:
            self.dev.timeout = val
        else:
            self.dev.settimeout(val)
    return old

def load_script(filename):
    """Loads a script of commands for line-by-line execution, removing
    → comments"""
    with open(filename,"rU") as f: # open in universal mode
        for linenum, line in enumerate(f):

```

```
    # remove comments
    line = line.split('#',1)[0]
    # trim spaces
    line = line.strip()
    if len(line) == 0: continue
    # for debugging purposes it's helpful to know which line of the file
    → is being executed
    yield linenum+1, line
```

[ ]:

# Parametros\_PID

December 3, 2021

## 1 Ajuste parámetros PID

1.0.1 En este código se muestran varios programas con los cuales se cambian los parámetros PID del controlador de temperatura y corriente del TA, que es de la marca MOGLABS y es el modelo: LDD605

### 1.1 Información del Dispositivo

```
[ ]: #-----  
# ARF simple python example, (c) MOGLabs 2016-2021  
#-----  
from __future__ import print_function  
from mogdevice import MOGDevice  
  
# connect to the device  
dev = MOGDevice('192.168.52.49')  
# print some information  
print('Device info:', dev.ask('INFO'))  
print('Interlock status:', dev.ask('INTERLOCK'))  
print('Temperature:', dev.ask('TEMP'))  
  
#dev.cmd('TEC,ON')
```

### 1.2 Leer los parámetros PID

1.2.1 Se recomienda volver a correr este programa después de correr el siguiente programa que es el encargado de cambiar los parámetros PID.

```
[ ]: #-----  
# ARF simple python example, (c) MOGLabs 2016-2021  
#-----  
from __future__ import print_function  
from mogdevice import MOGDevice  
  
# connect to the device  
dev = MOGDevice('192.168.52.49')  
# print some information  
print('Device info:', dev.ask('INFO'))
```

```

print('P:', dev.ask('PID,P'))
print('I:', dev.ask('PID,I'))
print('D:', dev.ask('PID,D'))
print('')
print('Tset:', dev.ask('TSET'))
print('Tmin:', dev.ask('TMIN'))
print('Tmax:', dev.ask('TMAX'))

#dev.cmd('TEC,ON')

```

### 1.3 Cambiar parámetros PID

```

[ ]: #-----
# ARF simple python example, (c) MOGLabs 2016-2021
#-----
from __future__ import print_function
from mogdevice import MOGDevice

# connect to the device
dev = MOGDevice('192.168.52.49')
# print some information
print('Device info:', dev.ask('INFO'))

dev.cmd('PID,P,32')
dev.cmd('PID,I,4')
dev.cmd('PID,D,200')
dev.cmd('TSET,20')

print("P:"+dev.ask('PID,P'))
print("I:"+dev.ask('PID,I'))
print("D:"+dev.ask('PID,D'))

print(dev.ask('TSET'))

```

### 1.4 Tomar datos del comportamiento del controlador

```

[ ]: #-----
# ARF simple python example, (c) MOGLabs 2016-2021
#-----
from mogdevice import MOGDevice

import time
from datetime import datetime
import socket

# connect to the device

```

```

dev = MOGDevice('192.168.52.49')

datestr = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H.%M.%S')
fname = "TA_temperatures"+datestr+".csv"

while True:
    with open(fname,'a') as f:
        try:
            temp = dev.ask('TEMP')[:-2]
            float(temp)
            f.write("%f, %s\n"%(time.time(),temp))
        except socket.timeout:
            print('Timeout err: %d'%time.time())
        except ValueError:
            print('Value err: %d'%time.time())
    time.sleep(0.1)

```

## 1.5 Graficar el comportamiento del controlador

```

[ ]: import matplotlib.pyplot as pl
import numpy as np

fname = 'TA_temperatures2021-10-27 08.57.08 .csv'
time, temp = np.loadtxt(fname, unpack=True, delimiter=',')
pl.plot(time-time[0],temp)
pl.xlabel("Tiempo [s]")
pl.ylabel("Temperatura [°C]")
pl.title("P = 32, I = 4, D = 200")
pl.savefig(fname[:-3]+"png",dpi=200)
pl.show()

```

# Potencia\_Salida\_vs\_Corriente\_TA

December 3, 2021

## 1 Potencia de Salida vs Corriente en el TA

```
[106]: from numpy import *
import numpy as np
import scipy.optimize as opt
import pandas as pd
from matplotlib.pyplot import *
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
[107]: x = []
y = []
y2 = []
y3 = []
y4 = []
y5 = []
```

```
[108]: for line in open('Potencia_Salida_vs_Corriente_TA_x.txt', 'r'):
    values = [float(s) for s in line.split()]
    x.append(values[0])
for line in open('Potencia_Salida_vs_Corriente_TA_10mW.txt', 'r'):
    values = [float(s) for s in line.split()]
    y.append(values[0])
for line in open('Potencia_Salida_vs_Corriente_TA_15mW.txt', 'r'):
    values = [float(s) for s in line.split()]
    y2.append(values[0])
for line in open('Potencia_Salida_vs_Corriente_TA_20mW.txt', 'r'):
    values = [float(s) for s in line.split()]
    y3.append(values[0])
for line in open('Potencia_Salida_vs_Corriente_TA_25mW.txt', 'r'):
    values = [float(s) for s in line.split()]
    y4.append(values[0])
for line in open('Potencia_Salida_vs_Corriente_TA_30mW.txt', 'r'):
    values = [float(s) for s in line.split()]
    y5.append(values[0])
```

```
[109]: plt.plot(x, y, label='10mW')
plt.plot(x, y2, label='15mW')
```

```
plt.plot(x, y3, label='20mW')
plt.plot(x, y4, label='25mW')
plt.plot(x, y5, label='30mW')
plt.xlabel("Corriente en el TA [mA]")
plt.ylabel("Potencia de Salida [mW]")
plt.title("$P_{Out}$ vs Corriente en el TA")
plt.legend()
plt.savefig("PoutvsCorrienteTAb",dpi=1000)
```

[ ]:

[ ]:

# Análisis Modo Espacial

February 5, 2022

## 1 Análisis del Modo Espacial

```
[3]: from sklearn.mixture import GaussianMixture
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.ticker import NullFormatter
from scipy.stats import norm
from PIL import Image
import os
from numpy import *
```

```
[ ]: project_path = os.path.dirname(os.path.realpath(__file__)).replace('\\', '/') +
    → '/figures/'
#Se selecciona el archivo
filename = '900mA_10mW_75.jpg'
```

```
[ ]: #Ajuste Gaussiano
def gaussianmixture_fit(data, components):
    #Obtener la información
    obs_x, obs_y = array(range(len(data))), array(data)
    #Centrar los datos en el cero y normalizar los datos de y en el área de la
    → curva
    n_x = obs_x - obs_x[argmax(obs_y)]
    n_y = obs_y / sum(obs_y)
    #Generar una distribución que aproxime la curva
    line_distribution = random.choice(a = n_x, size = 100000, p = n_y)
    number_points = len(line_distribution)
    #Correr la aproximación
    gmm = GaussianMixture(n_components = components)
    gmm.fit(reshape(line_distribution, (number_points, 1)))

    gauss_mix = array([p * norm.pdf(n_x, mu, sd) for mu, sd, p in zip(gmm.means_.
    → flatten(), sqrt(gmm.covariances_.flatten()), gmm.weights_)])
    gauss_mixt_t = sum(gauss_mix, axis = 0)

    mu = gmm.means_.flatten()
    sd = sqrt(gmm.covariances_.flatten())
```

```

    p = gmm.weights_
    return (n_x, n_y, mu, sd, p, gauss_mixt_t)

width, height = 0.1280 * 6, 0.1024 * 6
rect_imagen = [0.20, 0.22, width, height]
rect_ax = [0.20, 0.10, width, 0.1]
rect_ay = [0.08, 0.22, 0.10, height]

fig = plt.figure(1, figsize=(8,8))
fig.suptitle('Modo vs Alineación \n' + filename, fontsize=25)

imagen = plt.axes(rect_imagen)
ax = plt.axes(rect_ax)
ay = plt.axes(rect_ay)

im = Image.open(project_path + filename, 'r')
imagen.imshow(im, extent=[0, width, 0, height])

imagen.axes.get_xaxis().set_visible(False)
imagen.axes.get_yaxis().set_visible(False)
ax.axes.get_xaxis().set_visible(False)
ax.axes.get_yaxis().set_visible(False)
ay.axes.get_xaxis().set_visible(False)
ay.axes.get_yaxis().set_visible(False)

```

```

[ ]: #Imágenes y ajustes
#-----Matrix_image
print('\n***Matrix_image***\n')
Matrix_image = array(im)
filas = [sum([row[i] for row in Matrix_image]) for i in
    →range(0, len(Matrix_image[0]))]
#Número de gaussianas
n = 1
x, y, mu, sd, p, mix = gaussianmixture_fit(filas, n)
print(sd, 'si funciona', mu)
ax.plot(x, y, '--', linewidth=0.5)
ax.plot(x, mix)
ax.set_xlim([min(x), max(x)])
ax.set_ylim([min(mix), max(mix)*1.2])

table_data=[['Gaussiana', 'mu', 'fwhm']]
data = []
for i in range(n):
    plot_g = array(p[i] * norm.pdf(x, mu[i], sd[i]))
    ax.plot(x, plot_g, ':', linewidth=0.5)
    ax.axvline(x=mu[i], color='red', linewidth=0.25)

```

```

    fwhm = 2*sqrt(2*log(2))*sd[i]
    ax.axvline(x= mu[i] + fwhm/2., color='blue', linewidth=0.5)
    ax.axvline(x= mu[i] - fwhm/2., color='blue', linewidth=0.5)

    data.append([mu[i], fwhm])

for i,j in enumerate(sorted(data, key=lambda i: i[0], reverse=False), start=0):
    table_data.append([i, j[0], j[1]])

table = ax.table(cellText=table_data, loc='bottom', cellLoc='center')
table.auto_set_font_size(False)
table.set_fontsize(6)
for cell in table._cells:
    table._cells[cell].set_height(0.2)
    table._cells[cell].set_width(1./3.)

for data in table_data:
    letra = ''
    for d in data: letra += str(d) + '\t'
    print(letra)

print(sd)

#-----Matrix_transpuesta
print('\n***Matrix_transpuesta***\n')
Matrix_transpuesta = array(im.transpose(Image.ROTATE_270))
columnas = [sum([row[i] for row in Matrix_transpuesta]) for i in
    range(0,len(Matrix_transpuesta[0]))]
#Número de gaussianas
n = 3
x, y, mu, sd, p, mix = gaussianmixture_fit(columnas, n)
print(sd, 'si funciona', mu)
ay.plot(y, x, '--', linewidth=0.5)
ay.plot(mix, x)
ay.set_xlim([min(mix), max(mix)*1.2])
ay.set_ylim([min(x), max(x)])

table_data = [[], [], []]
data = []
for i in range(n):
    plot_g = array(p[i] * norm.pdf(x, mu[i], sd[i]))
    ay.plot(plot_g, x, ':', linewidth=0.5)
    ay.axhline(y=mu[i], color='red', linewidth=0.25)

```

```

fwhm = 2*sqrt(2*log(2))*sd[i]
ay.axhline(y= mu[i] + fwhm/2., color='blue', linewidth=0.5)
ay.axhline(y= mu[i] - fwhm/2., color='blue', linewidth=0.5)

data.append([mu[i], fwhm])

for i,j in enumerate(sorted(data, key=lambda i: i[0], reverse=False), start=1):
    table_data[0].append(n-i)
    table_data[1].append(j[0])
    table_data[2].append(j[1])

table_data[0].append('Gausiana')
table_data[1].append('mu')
table_data[2].append('fwhm')

table = ay.table(cellText=table_data, loc='left',cellLoc='center')
table.auto_set_font_size(False)
table.set_fontsize(6)
for cell in table._cells:
    table._cells[cell].get_text().set_rotation(270)
    table._cells[cell].set_height(1./3.)
    table._cells[cell].set_width(0.2)

for data in (reversed(list(array(table_data).transpose()))):
    letra = ''
    for d in data: letra += str(d) + '\t'
    print(letra)

print(sd)

plt.show()

```

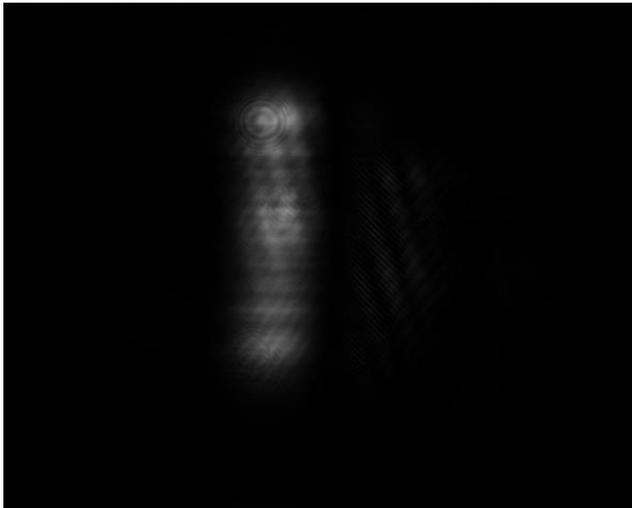
[ ]:

# Apéndice C

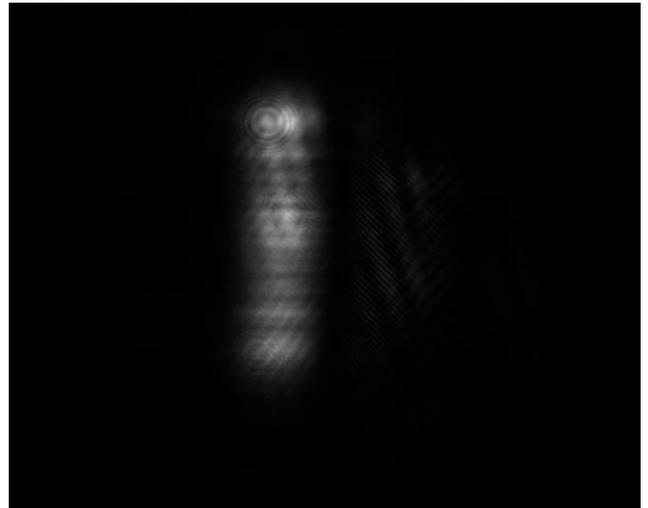
## Imágenes del Modo

Las fotografías capturadas con la cámara Thorlabs, para el estudio del modo del MOPA se presentan a continuación. Cada imagen tiene una pequeña descripción con las características del arreglo que representa dicha fotografía.

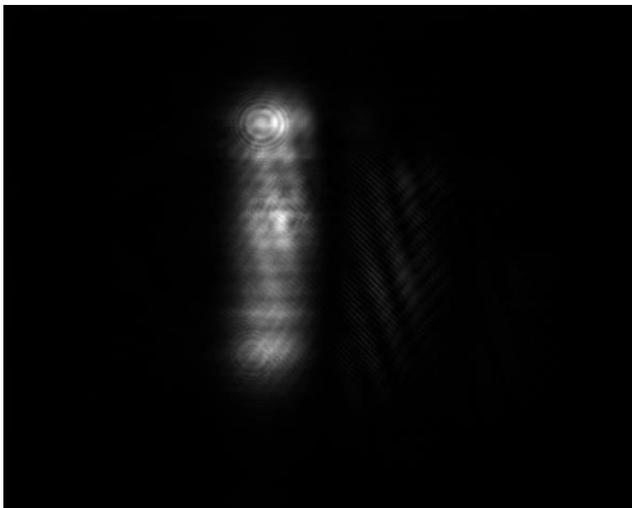
# Imágenes tomadas para: Modo en función de la potencia de entrada



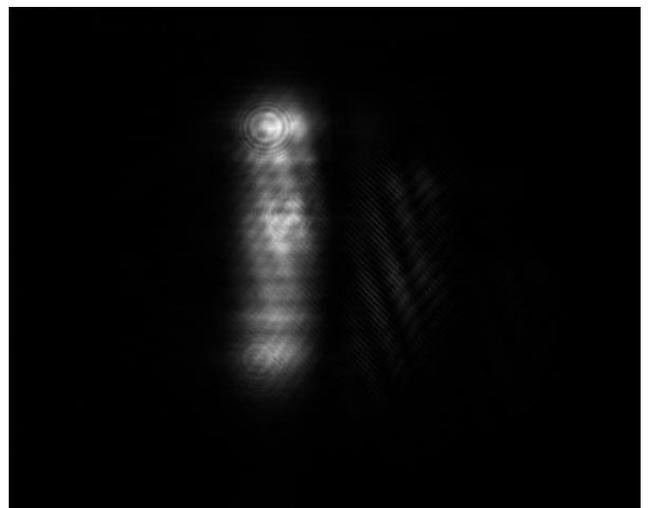
Potencia de entrada:  $10\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$



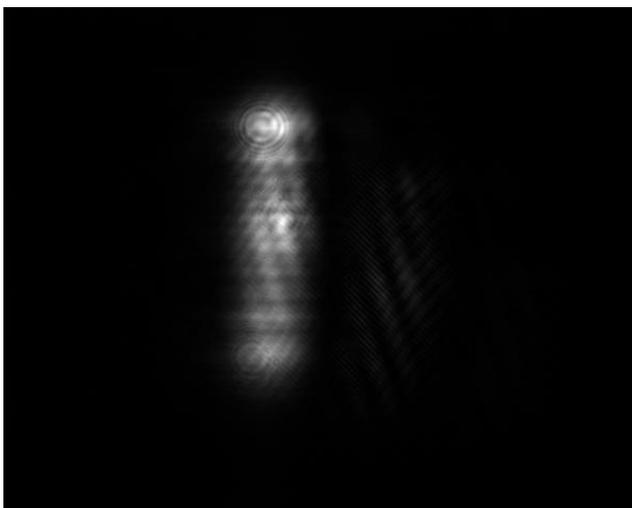
Potencia de entrada:  $15\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$



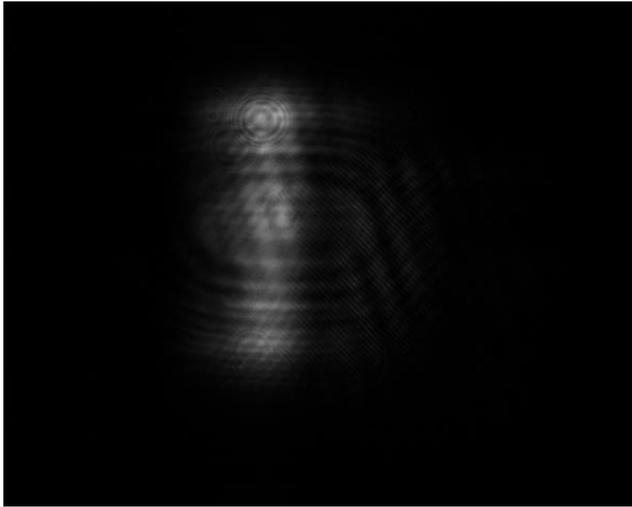
Potencia de entrada:  $20\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$



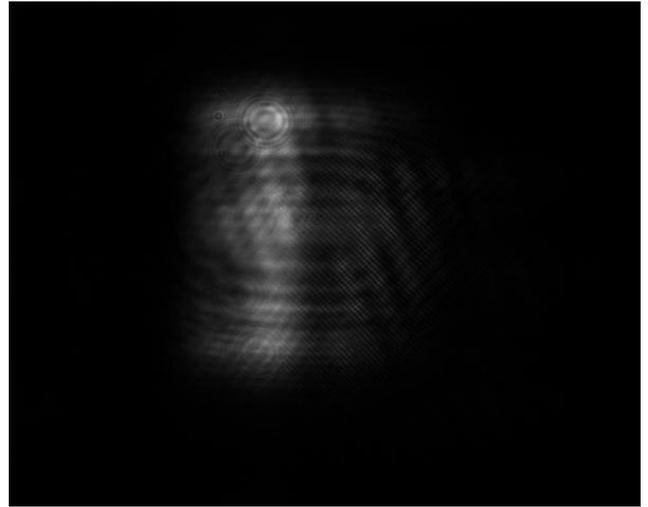
Potencia de entrada:  $25\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$



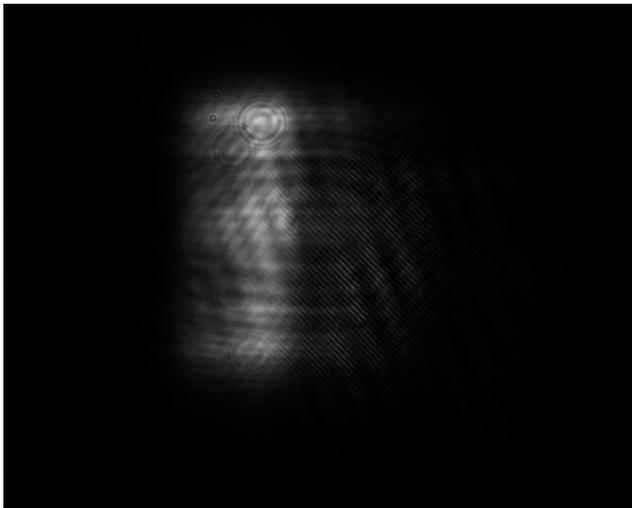
Potencia de entrada:  $30\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$



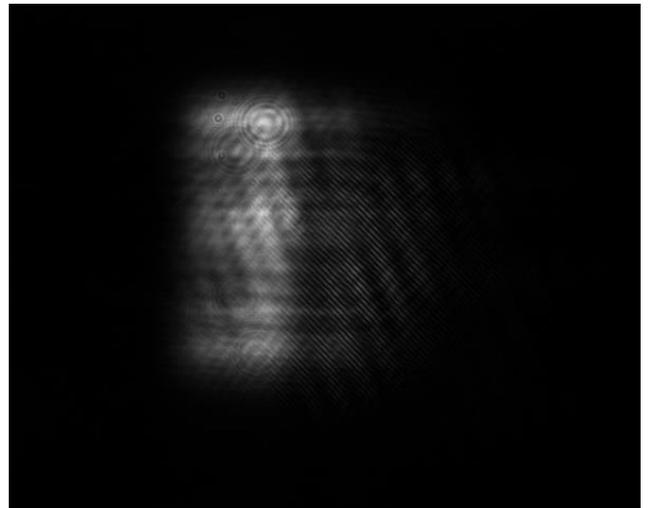
Potencia de entrada:  $10\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $900\text{ mA}$



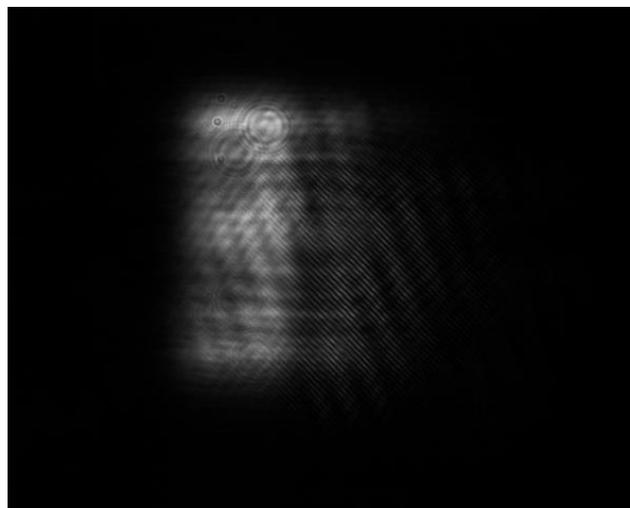
Potencia de entrada:  $15\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $900\text{ mA}$



Potencia de entrada:  $20\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $900\text{ mA}$

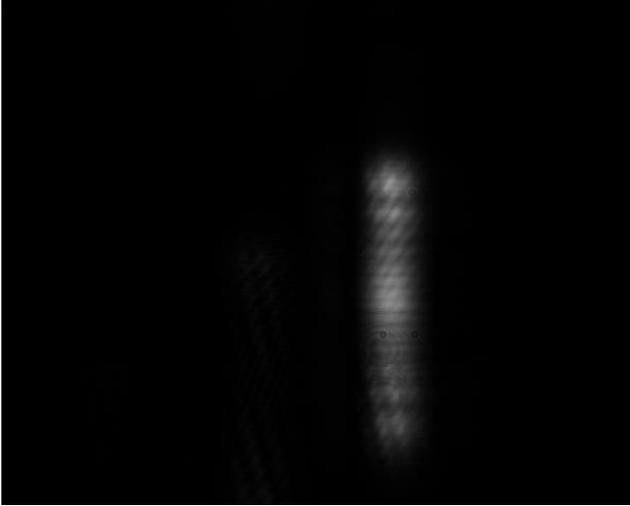


Potencia de entrada:  $25\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $900\text{ mA}$



Potencia de entrada:  $30\text{ mW}$   
Corriente en el TA:  $900\text{ mA}$

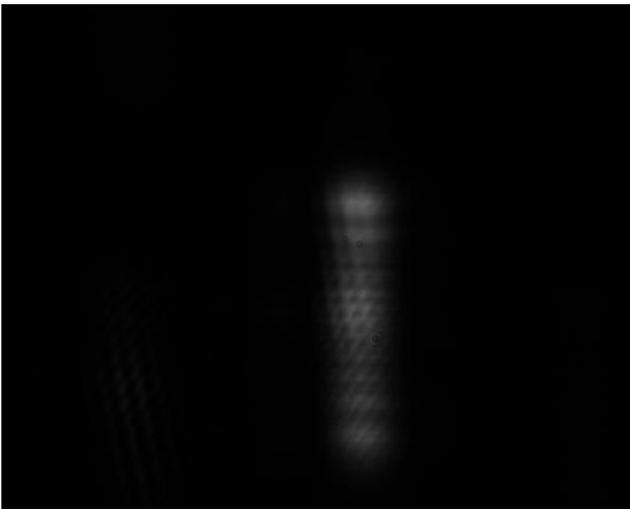
# Imágenes tomadas para: Modo en función de la distancia



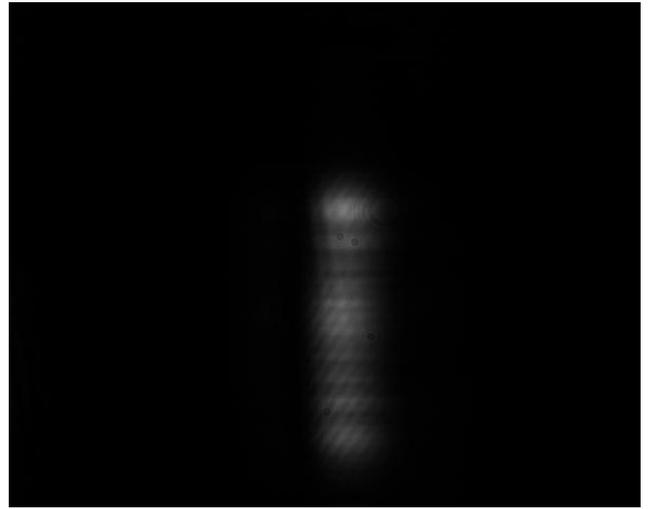
Distancia: *29 mm*  
Corriente en el TA: *400 mA*



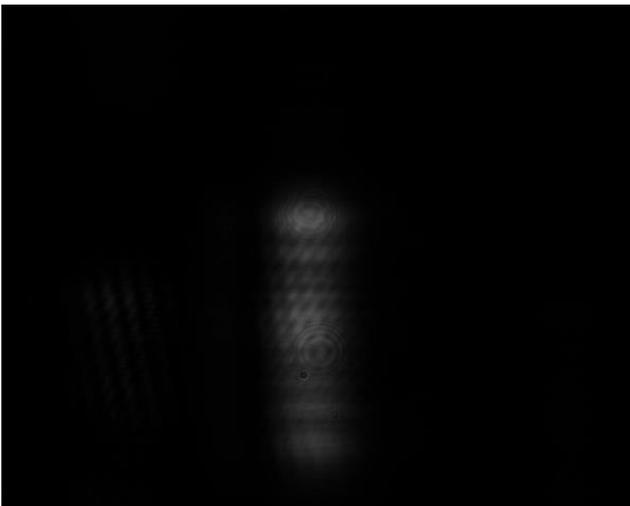
Potencia de entrada: *54 mm*  
Corriente en el TA: *400 mA*



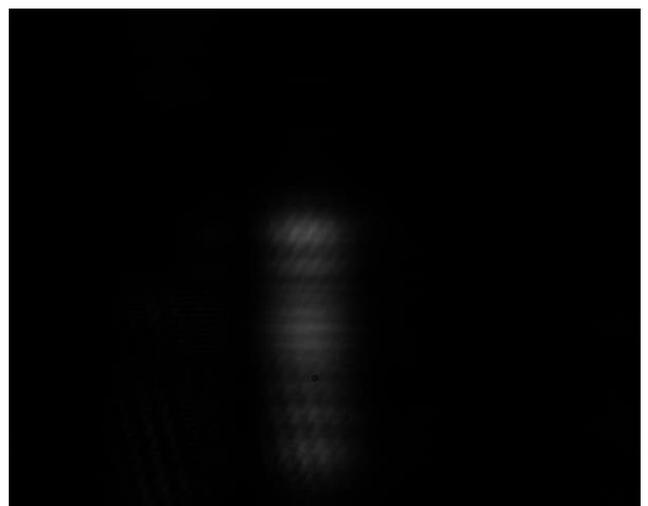
Potencia de entrada: *80 mm*  
Corriente en el TA: *400 mA*



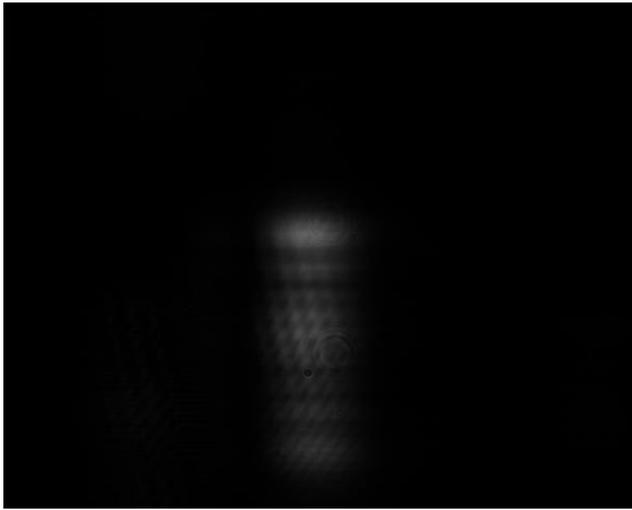
Potencia de entrada: *103 mm*  
Corriente en el TA: *400 mA*



Potencia de entrada: *130 mm*  
Corriente en el TA: *400 mA*



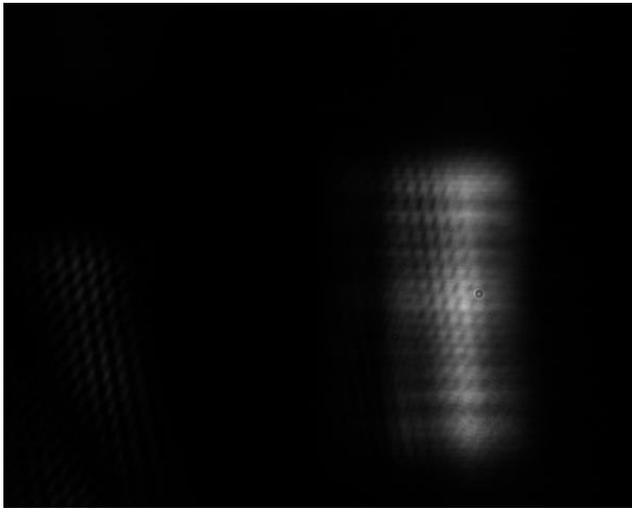
Potencia de entrada: *154 mm*  
Corriente en el TA: *400 mA*



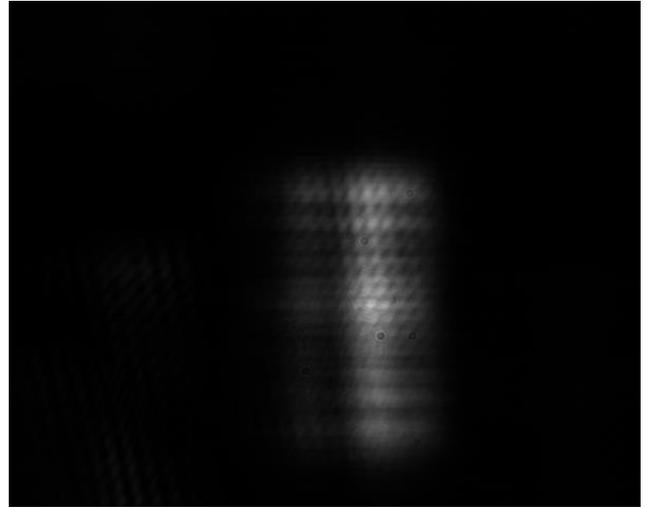
Distancia: *170 mm*  
Corriente en el TA: *400 mA*



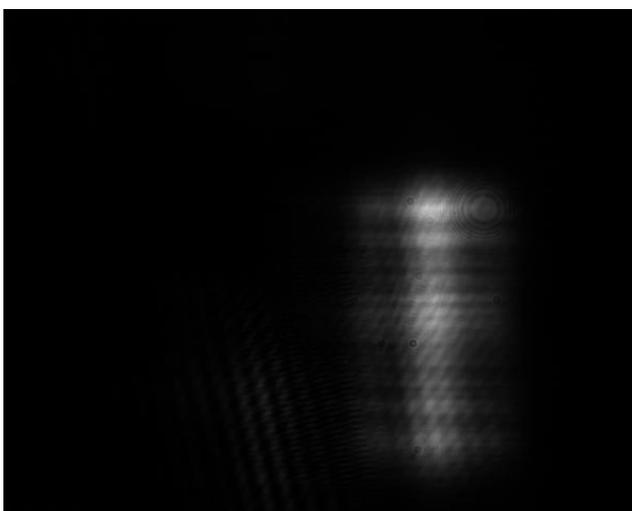
Potencia de entrada: *200 mm*  
Corriente en el TA: *400 mA*



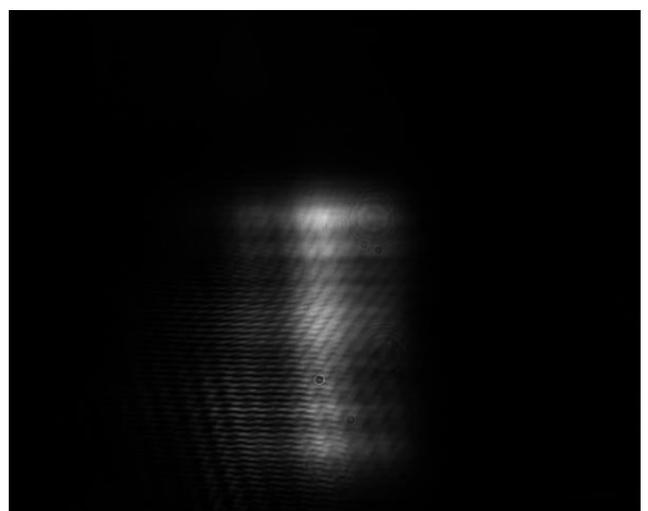
Potencia de entrada: *29 mm*  
Corriente en el TA: *900 mA*



Potencia de entrada: *54 mm*  
Corriente en el TA: *900 mA*



Potencia de entrada: *80 mm*  
Corriente en el TA: *900 mA*



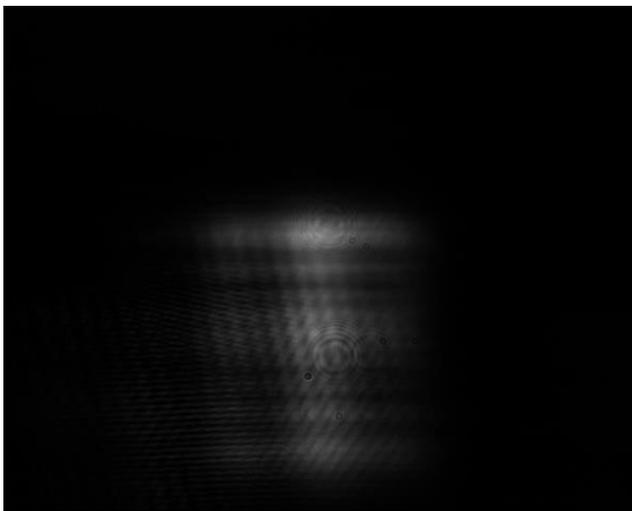
Potencia de entrada: *103 mm*  
Corriente en el TA: *900 mA*



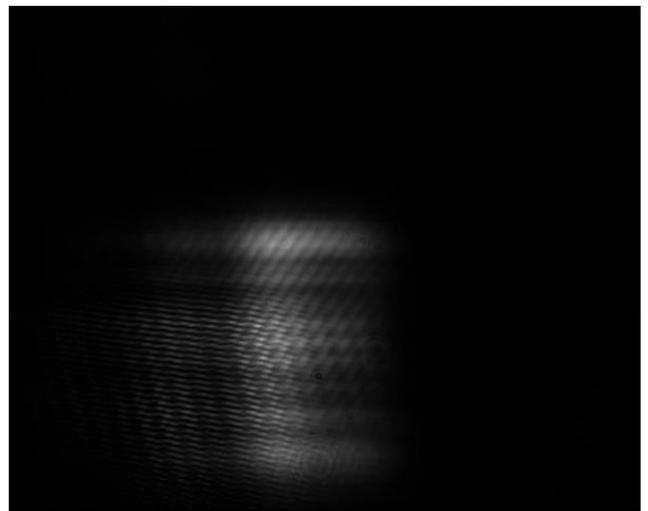
Distancia: *130 mm*  
Corriente en el TA: *900 mA*



Potencia de entrada: *154 mm*  
Corriente en el TA: *900 mA*

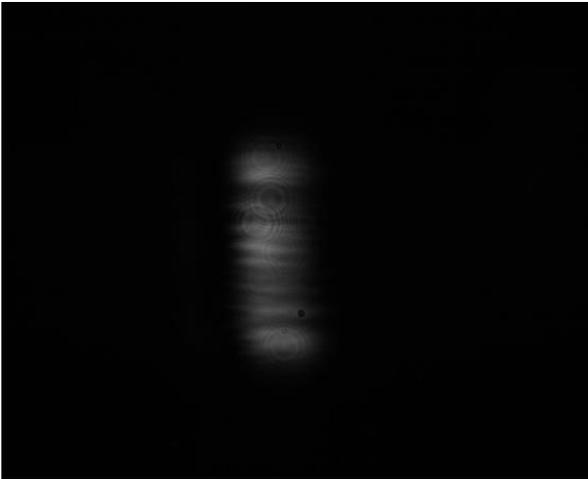


Potencia de entrada: *170 mm*  
Corriente en el TA: *900 mA*

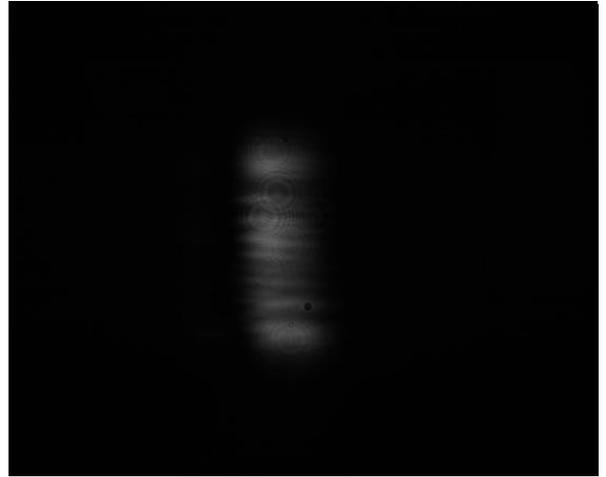


Potencia de entrada: *200 mm*  
Corriente en el TA: *900 mA*

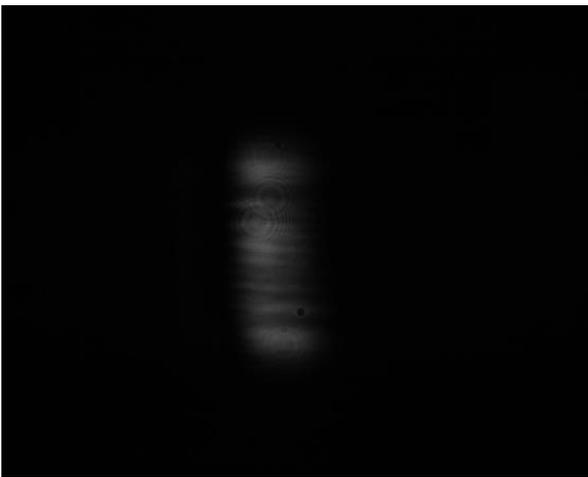
# Imágenes tomadas para: Modo en función del alineamiento



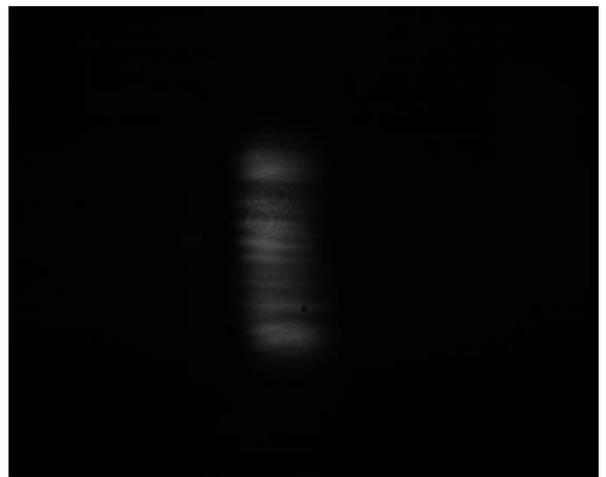
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $100\%$



Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $90\%$



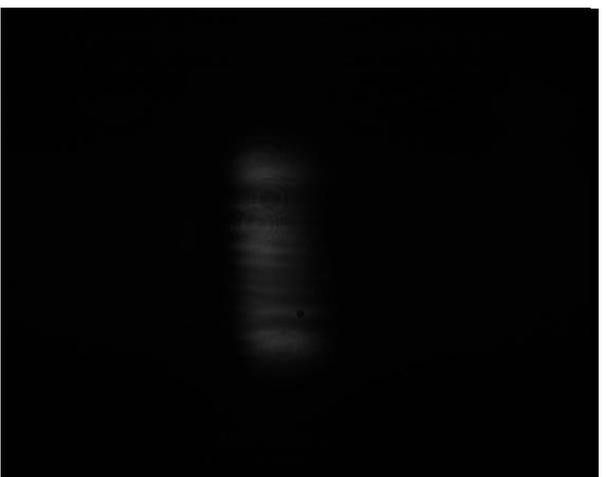
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $80\%$



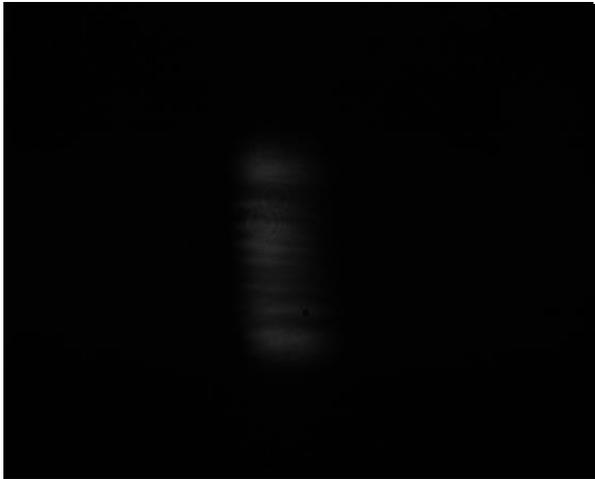
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $70\%$



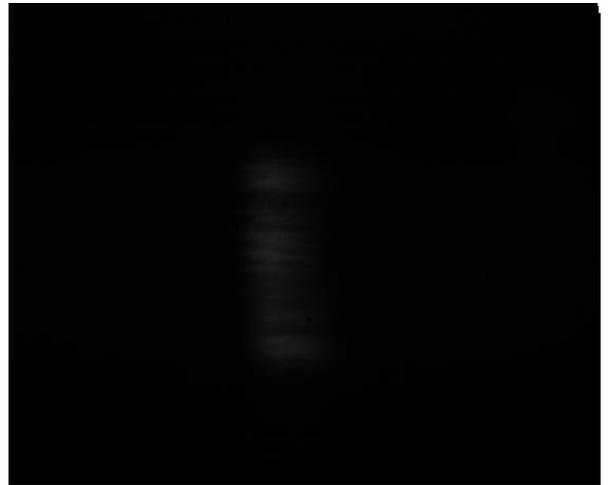
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $60\%$



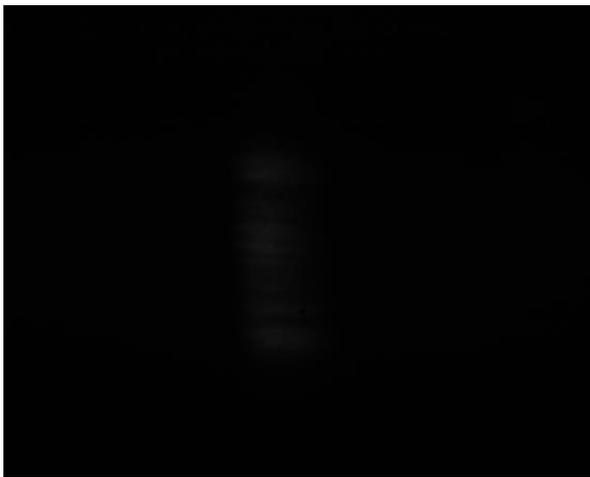
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $50\%$



Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $40\%$



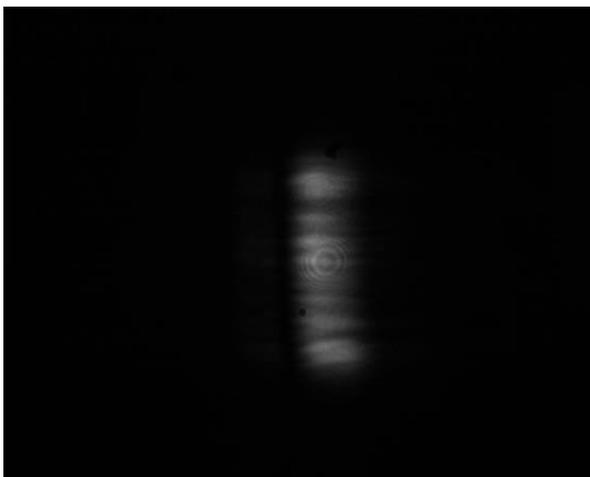
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $30\%$



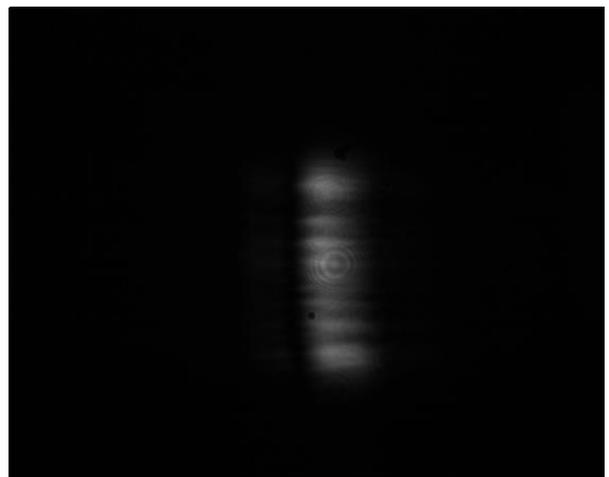
Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $20\%$



Corriente en el TA:  $400\text{ mA}$   
Alineación:  $70\%$



Corriente en el TA:  $900\text{ mA}$   
Alineación:  $100\%$



Corriente en el TA:  $900\text{ mA}$   
Alineación:  $95\%$

# Apéndice D

## DataSheets

Algunos de los *data sheets*, o fragmentos, necesarios para el diseño o la comparación de resultados.

## TAPERED AMPLIFIERS

### Semiconductor Optical Amplifier

#### General Product Information

Product	Application
670 nm Tapered Amplifier	Spectroscopy
C-Mount Package	



#### Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Unit	min	typ	max
Storage Temperature (non condensing)	$T_S$	°C	-40		85
Operational Temperature at Case (non cond.)	$T_C$	°C	0		30
Forward Current	$I_F$	A			1.2
Reverse Voltage	$V_R$	V			0
Output Power	$P_{opt}$	W			0.6

#### Measurement Conditions / Comments

Stress in excess of one of the Absolute Maximum Ratings may damage the laser. Please note that a damaging optical power level may occur although the maximum current is not reached. These are stress ratings only, and functional operation at these or any other conditions beyond those indicated under Recommended Operational Conditions is not implied.

#### Recommended Operational Conditions

Parameter	Symbol	Unit	min	typ	max
Operational Temperature at Case	$T_C$	°C		15	
Forward Current	$I_F$	A			1.0
Input Power	$P_{input}$	mW	10		50
Output Power	$P_{opt}$	W			0.5

#### Measurement Conditions / Comments

non condensing

with proper injection from a seed laser

#### Characteristics at $T_{LD} = 20\text{ °C}$ at BOL

Parameter	Symbol	Unit	min	typ	max
Design Wavelength	$\lambda_c$	nm		670	
Gain Width (FWHM)	$\Delta\lambda$	nm		10	
Temperature Coefficient of Wavelength	$d\lambda / dT$	nm / K		0.3	
Operational Current @ $P_{opt} = 0.5\text{ W}$	$I_{op\ Gain}$	A			1.0
Output Power	$P_{opt}$	W	0.5		
Amplification	G	dB		15	
Cavity length	$L_c$	$\mu\text{m}$		2000	

#### Measurement Conditions / Comments

see images on page 4

with proper injection from a seed laser

at recommended maximum forward current

## TAPERED AMPLIFIERS Semiconductor Optical Amplifier



Characteristics at  $T_{LD} = 20\text{ °C}$  at BOL cont'd

Parameter	Symbol	Unit	min	typ	max
Reflectivity at Front Facet	$R_{ff}$			3·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-3</sup>
Reflectivity at Rear Facet	$R_{rf}$			3·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-3</sup>
Input Aperture (at rear side)	$d_{in}$	μm		7.5	
Output Aperture (at front side)	$d_{out}$	μm		70	
Astigmatism	A	μm		430	
Input Divergence parallel ( $1/e^2$ )	$\Theta_{in  }$	°		tbid	
Input Divergence perpendicular ( $1/e^2$ )	$\Theta_{in\perp}$	°		51	
Output Divergence parallel ( $1/e^2$ )	$\Theta_{out  }$	°		9	
Output Divergence perpendicular ( $1/e^2$ )	$\Theta_{out\perp}$	°		51	
Beam quality factor	$M^2$				
Polarization				TE	

Measurement Conditions / Comments

estimated at recommended maximum forward current

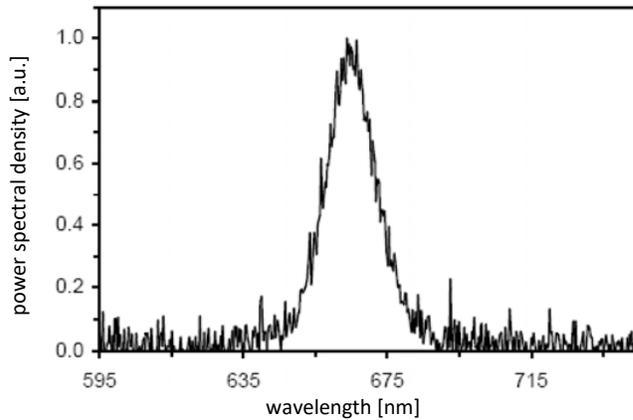
full angle

full angle

E field parallel to junction plane

Typical Measurement Results

Spectrum measured w/o injection



Performance figures, data and any illustrative material provided in this specification are typical and must be specifically confirmed in writing by eagleyard Photonics before they become applicable to any particular order or contract. In accordance with the eagleyard Photonics policy of continuous improvement specifications may change without notice.

# EYP-TPA-0670-00500-2003-CMT02-0000

Revision 0.91

2017-11-22

## TAPERED AMPLIFIERS Semiconductor Optical Amplifier

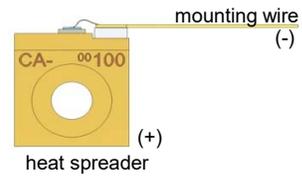
### Package Dimensions

Parameter	Symbol	Unit	min	typ	max
Height of Emission Plane	h	mm	7.05	7.10	7.20
C-Mount Thickness	t	mm		2.15	

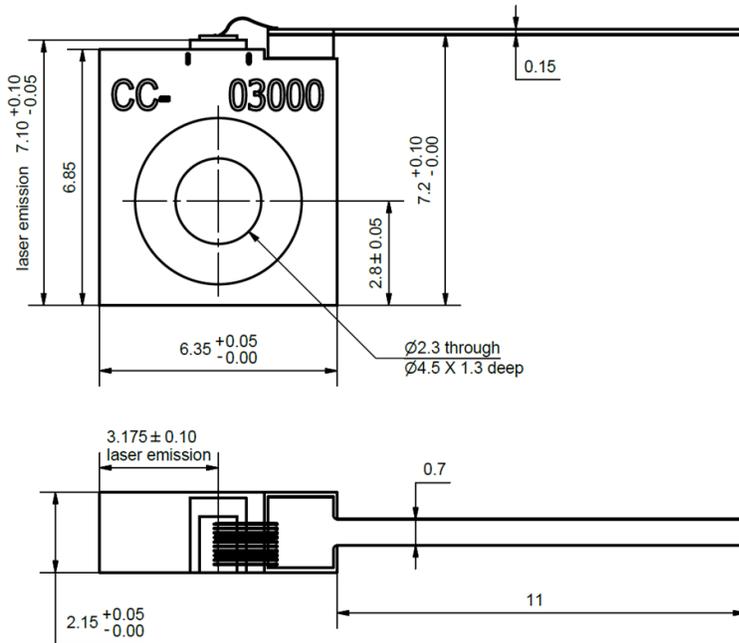
Measurement Conditions / Comments

### Package Pinout

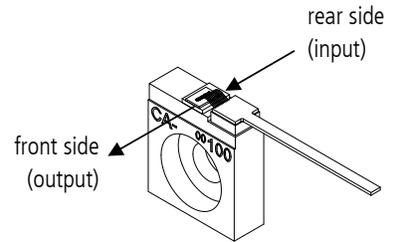
Mounting Wire	Cathode (-)
Housing	Anode (+)



### Package Drawings



AIZ-18-0413-1250



## TAPERED AMPLIFIERS

### Semiconductor Optical Amplifier

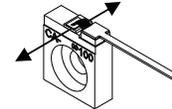
#### Unpacking, Installation and Laser Safety

Unpacking the laser diodes should only be done at electrostatic safe workstations (EPA). Though protection against electro static discharge (ESD) is implemented in the laser package, charges may occur at surfaces. Please store this product in its original package at a dry, clean place until final use. During device installation, ESD protection has to be maintained.

The TPA diode type is known to be sensitive against thermal stress. It should not be operated without appropriate injection from a seed laser. Operating at moderate temperatures on proper heat sinks will contribute to a long lifetime of the diode. The chip should be protected against moisture. A water vapor content below 5000 ppm is recommended for applications with high reliability requirements.

The laser emission from this diode is close to the invisible infrared region of the electromagnetic spectrum. Avoid direct and/or indirect exposure to the free running beam. Collimating the free running beam with optics as common in optical instruments will increase threat to the human eye.

Each laser diode will come with an individual test protocol verifying the parameters given in this document.



Laser Emission



IEC-60825-0



Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.40

**Applications**

- Temperature compensation, measurement and control (chassis mounting)

**Features**

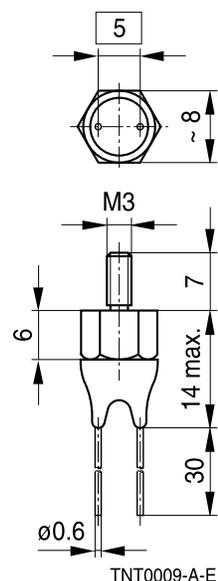
- Cost-effective
- Good thermal coupling through screw-type case (thread M3)
- Electrically isolated aluminum case
- Tinned copper leads

**Options**

- Tighter resistance tolerance available on request.

**Delivery mode**

Bulk

**Dimensional drawing**


Dimensions in mm  
Approx. weight 1 g

**General technical data**

Climatic category	(IEC 60068-1)		55/125/56	
Max. power	(at 25 °C)	$P_{25}$	450	mW
Resistance tolerance		$\Delta R_R/R_R$	$\pm 10$	%
Rated temperature		$T_R$	25	°C
Dissipation factor	(in air)	$\delta_{th}$	approx. 9	mW/K
Dissipation factor	(on chassis)	$\delta_{th}$	approx. 20	mW/K
Thermal cooling time constant	(in air)	$\tau_c$	approx. 75	s
Thermal cooling time constant	(on chassis)	$\tau_c$	approx. 15	s
Torque			approx. 0.5	Nm
Insulation resistance	(V = 100 V DC)	$R_{ins}$	> 100	MΩ
Test voltage	(t = 1 s)	$V_{test}$	2500	V AC

# Bibliografía

- [1] THOMAS S. KUHN. *La Estructura de las Revoluciones Científicas* Fondo de Cultura Económica (2015)
- [2] NATURE, *Quantum physics* nature portfolio, URL <https://www.nature.com/subjects/quantum-physics> (2021)
- [3] N. ZETTLI. *Quantum Mechanics Concepts and Applications* Wiley (2009)
- [4] NICK P. PROUKAKIS; K. BURNETT. *Quantum Gases: Setting the Scene*, de *Quantum Gases, Finite Temperature and Non-Equilibrium Dynamics* Imperial College Press (2013)
- [5] D. HERNÁNDEZ-RAJKOV, et al. *Experimental setup for the production of ultracold strongly correlated fermionic superfluids of  $^6\text{Li}$*  Revista Mexicana de Física, 66 (4): 388–403, (2020)
- [6] HAROLD J. METCALF. *Laser Cooling and Trapping* Springer, (2002)
- [7] R. PASCHOTTA, *Master Oscillator Power Amplifier* Encyclopedia of Laser Physics and Technology (2008)
- [8] R. K. PATHRIA; PAUL D. BEALE. *Statistical Mechanics* Elsevier (1996)
- [9] MEHRAN KARDAR. *Statistical Physics of Particles* Cambridge, (2007)
- [10] F. REIF. *Fundamentals of statistical and thermal physics* McGraw-Hill, (1965)
- [11] GIOVANNI MODUGNO, et al. *Collapse of a Degenerate Fermi Gas* Science, 297 (5590): 2240-2243, (2002)
- [12] CHARLES KITTEL. *Introduction to Solid State Physics* John Wiley and Sons, Inc (2005)
- [13] CHENG CHIN, et al. *Feshbach Resonances in Ultracold gases* Reviews of Modern Physics, 82(2): 1225-1286, (2010)
- [14] C.J. PETHICK, H. SMITH. *Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases* Cambridge University Press, (2008)

- [15] W. ZWERGER. *The BCS-BEC Crossover and the Unitary Fermi Gas* Lecture Notes in Physics 836, Springer, (2012)
- [16] A.J. MOERDIJK, et al. *Resonances in ultracold collisions of  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$  and  $^{23}\text{Na}$*  Physical Review A, 51(6): 4852-4861, (1995)
- [17] COURTEILLE, et al. *Observation of a Feshbach Resonance in Cold Atom Scattering* Physical Review Letters, 81(1): 69-72, (1998)
- [18] S. INOUE, et al. *Observation of Feshbach resonances in a Bose-Einstein Condensate* Nature, 392(6672): 151-154, (1998)
- [19] JOSÉ EDUARDO PADILLA CASTILLO. *Tesis de Maestría: Time-Averaged Optical Potentials for Trapping and Manipulating Ultracold Quantum  $^6\text{Li}$  Gases* UNAM, (2021)
- [20] JOSEP TARON, *Feshbach resonance: A one dimensional example* Am. J. Phys. 81(8), (2013)
- [21] P.A. FRASER; S.K. BURLEY, *A simple model of a Feshbach resonance* Eur. J. Phys. 3, 230-238, (1982)
- [22] S.N. BOSE, *Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese* Z. Phys. 26, 178 (1924)
- [23] A. EINSTEIN, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases* Sitzber. Preuss. Akad. 1924, 261 (1924)
- [24] A. EINSTEIN, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. 2. Abhandlung* Sitzber. Preuss. Akad. 1925, 3 (1925)
- [25] C.E. WIEMAN, E.A. CORNELL, *Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor* Science 269, 198-201 (1995)
- [26] K.B. DAVIES ET AL., *Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms* Physical Review Letters, 75(22):3969-3973 (1995)
- [27] E.P. GROSS, *Structure of a quantized vortex in boson systems.* Il Nuovo Cimento. 20(3), 454-477 (1961)
- [28] L.P. PITAEVSKII, *Vortex lines in an imperfect Bose gas* Sov. Phys. JEPT. 13(2), 451-454 (1961)
- [29] WILLIAM T. SILFVAST, *Laser Fundamentals* Cambridge University Press, (1996)
- [30] C.S. WILLET, *Introduction tu Gas Lasers: Population Inversion Mechanisms* Pergamon, (1974)
- [31] F.J. DUARTE; L. W. HILLMAN, *Dye Laser Principles* Academic Press, (1990)

- [32] W. KOECHNER, *Solid State Laser Engineering* Springer-Verlag, (1999)
- [33] P.J. DELFYETT; C. H. LEE, *Semiconductor Injection Lasers* Encyclopedia of Lasers and Optical Technology, Academic Press (1991)
- [34] P. DERRY; L. FIGUEROA; C. S. HONG, *Semiconductor Lasers Handbook of Optics*, vol. 1, McGraw-Hill (1995)
- [35] ROBERT L. BOYLESTAD, *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos* Prentice Hall, (2009)
- [36] HOOK, J.R.; H.E. HALL, *Solid State Physics* John Wiley and Sons, (2001)
- [37] SHOCKLEY WILLIAM, *The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors* Bell System Technical Journal. 28(3), 435-486 (1949)
- [38] MATTHIAS FUCHS. *Tesis de Maestría: Development of a high power stabilized diode laser system* University of Oregon, (2006)
- [39] MARK W. ZEMANSKY. *Heat and Thermodynamics* McGraw-Hill, (1997)
- [40] DIEGO HERNÁNDEZ RAJKOV. *Tesis de Licenciatura: Enfriamiento Doppler y sub-Doppler de un gas atómico de  ${}^6\text{Li}$*  UNAM, (2018)
- [41] JOHN F. O'HANLON, *A User's Guide to Vacuum Technology*, John Wiley and Sons, Inc, (2003)
- [42] J.DALIBARD; C. COHEN-TANNOUJJI, *Laser Cooling below the Doppler Limit by polarization gradients: simple theoretical models* Physical Review A, 90, 0433408 (2014)
- [43] A. ASPECT; E. ARIMONDO; R. KAISER; N. VANSTEENKISTE; C. COHEN-TANNOUJJI, *Laser Cooling below the One-Photon Recoil Energy by Velocity-Selective Coherent Population Trapping* Physical Review Letters, 61, 826 (1988)
- [44] R. GRIMM; M. WEIDERMÄLLER; Y.B. OVCHINNIKOV, *Optical Dipole Traps for Neutral Atoms* Adv. At. Mold. Opt. Phys., **42**, 95 (2000)
- [45] W. KETTERLE; N.J. VAN DRUTEN, *Evaporative Cooling of Trapped Atoms* Adv. At. Mold. Opt. Phys., **37**, 181 (1996)
- [46] M. GUEVARA-BERTSCH, et al. *Diseño y caracterización de un enfriador de átomos de tipo "desacelerador Zeeman"* Revista Mexicana de Física, 62: 175-182, (2016)
- [47] DALLIN S. DURFEE. *Ph.D. Thesis: Dynamic Properties of Dilute Bose-Einstein Condensates* MIT, (1999)

- [48] V. NATARAJAN *Modern Atomic Physics* Cap. 11 *CRC Press. Boca Raton*, (2015)
- [49] Y. CASTIN; H. WALLIS; J. DALIBARD, *Limit of Doppler Cooling*  
Journal of the Optical Society of America B, 6(11):2046 (1989)
- [50] J. PRODAN ET AL., *Stopping Atoms with Laser Light*  
Physical Review Letters, 54:992-995 (1985)
- [51] E.L. RAAB ET AL., *Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure*  
Physical Review Letters, 59(23):2631-2634 (1987)
- [52] V.S. BAGNATO, G.P. LAFYATIS. A. G. MARTIN, E.L. RAAB, R.N. AHMAD-BITAR AND D.E. PITCHARD, *Continuous stopping and trapping of neutral atoms*  
Physical Review Letters, 58:2194-2197 (1987)
- [53] R. PASCHOTTA, *Optical Intensity*  
Encyclopedia of Laser Physics and Technology (2008)
- [54] MICHAEL E. GEHM, *Preparation of an Optically-Trapped DEgenerate Fermi Gas of  $^6\text{Li}$ : Finding the Route to Degeneracy*  
Tesis de Doctorado, Duke University, (2003).
- [55] J.N. WALPOLE, *Semiconductor amplifiers and lasers with tapered gain regions*  
Optical and Quantum Electronics 28, 623-645 (1996)
- [56] BRIAN DEMARCO, *Tesis de Doctorado: Quantum Behavior of an Atomic Fermi Gas* University of Colorado, (2001)
- [57] JAYAMPATHI C. B. KANGARA, et al. *Design and construction of cost-effective tapered amplifier systems for laser cooling and trapping experiments* *American Journal of Physics*, 82 (8): 805–817, (2014)
- [58] JAYAMPATHI KANGARA. *Tesis de Maestría: Design and construction of tapered amplifier systems for laser cooling and atom trapping experiments* Miami University, (2012)
- [59] RYAN COLE. *Construction and Optimization of a Tapered Amplifier System for Applications in Ultra-Cold Plasma Research* Honors Theses. Paper 749. (2015)
- [60] R. PASCHOTTA, *Faraday isolators*  
Encyclopedia of Laser Physics and Technology (2008)
- [61] EUGENE HECHT. *Optics* Addison Wesley (2002)
- [62] KATSUHIKO OGATA. *Ingeniería de control moderna* Pearson, (2010)
- [63] MOGLABS, *Laser Diode Driver, LDD605 User Manual*  
URL [https://moglabs.com/products/laser-electronics/laser-diode-driver/MOGLabs\\_LDD\\_usermanual.pdf](https://moglabs.com/products/laser-electronics/laser-diode-driver/MOGLabs_LDD_usermanual.pdf) (2021)

- [64] DEPARTMENT OF PHYSICS, UNIVERSITY OF OREGON, *Tapered Amplifier Control Electronics*  
URL [https://atomoptics-nas.uoregon.edu/ta\\_circuit/](https://atomoptics-nas.uoregon.edu/ta_circuit/) (2022)
- [65] THORLABS, *Thorlabs, Analog Handheld Laser Power Meter Console, Specs*  
URL <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PM100A>  
(2022)
- [66] WILLIAM T. SILFVAST. *Encyclopedia of Physical Science and Technology* Elsevier Science, (2003)
- [67] THORLABS, *DCx Camera Functional Description and SDK Manual*  
URL <https://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=DCC1545M>  
(2022)
- [68] LEV PITAEVSKII; SANDRO STRINGARI. *Bose-Einstein Condensation and Superfluidity* Oxford University Press (2016)
- [69] CLAUDE COHEN-TANNOUJJI. *Quantum Mechanics, Volume 2* Wiley, (1973)
- [70] ERNESTO CARRO. *Tesis de Licenciatura: Diseño y proyección de trampas magnéticas para experimentos de gases ultrafríos de Litio* UNAM, (2016)